FACULTE DES LETTRES, ARTS ET SCIENCES HUMAINES (FLASH)

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

FACULTE DES SCIENCES TECHNIQUES (FAST)

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

Chaire Unesco Science, Technologie et Environnement (CUSTE)

Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale (LABEE)

Thèse de Doctorat

Présentée par :

Djafarou ABDOULAYE

Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Filière : Géographie et Gestion de l'Environnement

Spécialité : Géosciences de l'environnement et Aménagement du Territoire

N°……d'enregistrement: /EDP/FLASH/UAC

DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES ET SES INCIDENCES SUR L'ECOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU (NORD-BENIN)

Directeur de Thèse

M. Michel **BOKO**

Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Président	*M. Etienne DOMINGO, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Rapporteur	*M. Michel BOKO, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Examinateur	*M. Euloge K. AGBOSSOU, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Examinateur	*M. François de Charles OUEDRAOGO, Professeur Titulaire, Université de Ouagadougou,(Burkina Faso)*
Examinateur	*M. Expédit W. VISSIN, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Examinateur	*M. Germain GONZALLO, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*

Avec l'appui à la finalisation de la Commission Universitaire pour le Développement (CUD) Belgique

Soutenue le 17/03/ 2015

FACULTE DES LETTRES, ARTS ET SCIENCES HUMAINES (FLASH)

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

FACULTE DES SCIENCES TECHNIQUES (FAST)

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

Chaire Unesco Science, Technologie et Environnement (CUSTE)

Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale (LABEE)

Thèse de Doctorat

Présentée par :

Djafarou ABDOULAYE

Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Filière : Géographie et Gestion de l'Environnement

Spécialité : Géosciences de l'environnement et Aménagement du Territoire

N°……d'enregistrement: /EDP/FLASH/UAC

DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES ET SES INCIDENCES SUR L'ECOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU (NORD-BENIN)

Directeur de Thèse

M. Michel **BOKO**

Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Président	*M. Etienne DOMINGO, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Rapporteur	*M. Michel BOKO, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Examinateur	*M. Euloge K. AGBOSSOU, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Examinateur	*M. François de Charles OUEDRAOGO, Professeur Titulaire, Université de Ouagadougou,(Burkina Faso)*
Examinateur	*M. Expédit W. VISSIN, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*
Examinateur	*M. Germain GONZALLO, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*

Avec l'appui à la finalisation de la Commission Universitaire pour le Développement (CUD) Belgique

Soutenue le 17/03/ 2015

Sommaire

Dédicace **5**
Sigles et abréviations **6**
Remerciements **8**
Résumé **10**
Abstract **11**
Introduction **12**
CHAPITRE I : CADRE THEORIQUE ET CONCEPTUEL 14
1.1. Milieu d'étude 14
1.2. Problématique 16
1.3. Objectifs de l'étude 19
1.4. Hypothèses de travail 20
1.5. Clarification des concepts 20
1.6. Revue de littérature 26
CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE RECHERCHE 36
2.1. Recherche documentaire 36
2.2. Acquisition des données 36
2.3. Travaux de terrain 50
2.4. Méthodes de traitement des données 54
CHAPITRE III : FONDEMENTS BIOPHYSIQUES DE LA DYNAMIQUE 101
DE L'OCCUPATION DES TERRES 101
3.1. Caractéristiques biogéographiques 101
3.2. Caractéristiques socioéconomiques 117
CHAPITRE IV : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU 127
4.1. Analyse de la dynamique de l'occupation des terres en 1990, 2000 et 2010 127
4.2. Projections de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 143
4.3. Discussion 148
CHAPITRE V : VARIABILITE PLUVIOMETRIQUEET HYDROLOGIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU 152
5.1. Etude de la variabilité pluviométrique dans le bassin versant 152
5.2. Evolution interannuelle de l'écoulement de surface dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou 162
5.3. Variation des termes du bilan hydrologique et corrélations entre ces différents termes à Bétérou 166
5.4. Variation du coefficient de tarissement à Bétérou 170
5.5. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI par sous période dans le bassin versant 172
CHAPITRE VI : INCIDENCES DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES SUR L'ECOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU 180

6.1. Evolutions spatiales du NDVI et cumuls annuels moyens de pluie 180
6.2. Relations entre Pluie-NDVI et écoulement-NDVI 182
6.3. Effets de la dynamique de l'occupation des terres sur la disponibilité des ressources en eau à long terme dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 191
Conclusion générale 207
Bibliographie 210
Liste des photos 238
Liste de planches 239
Liste des tableaux 239
Liste des annexes 240
Annexe 1 : Publications 240
Annexe 2 : Règle de transition du modèle SpaCelle 242
Annexe 3 : Matrice de corrélation des données de pluie 243
Annexe 4 : Questionnaires 244
Tables des matières 249

Dédicace

A

mon père Abdoulaye ADAM,
ma mère Barikissou ALI,
mon épouse Mouïbatou TOURARE ALI S,
mon fils Abdoul Warissou

Sigles et abréviations

ACP :	:	Analyse en Composantes Principales
AGNPS	:	Agricultural Non-Point-Source Pollution Model
AMMA	:	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
AVHRR		Advanced Very High-Resolution Radiometer
ASCII	:	American Standard Code for Information Interchange
ASECNA	:	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
CATCH	:	Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
CEMAGREF	:	Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CENATEL	:	Centre National de Télédétection et de suivi écologique
CUSTE	**:**	Chaire Unesco « Science, Technologie et Environnement »
DG-Eau	:	Direction Générale de l'Eau
DMN	:	Direction de la Météorologie Nationale
ETP	:	Evapotranspiration Potentielle
FAO	:	Food and Alimentation Organization
Fig.	:	Figure
FOSA	:	Forestry Outlook Studies for Africa
GPS	:	Global Positioning System
HRU :	:	Unité de Réponse Hydrologique
HSPF	:	Heating Seasonal Performance Factor
IFN	**:**	Inventaire Forestier National
IFPRI	:	International Food Policy Research Institute
IGN	:	Institut Géographique National
INSAE	:	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
IRD	**:**	Institut de Recherche pour le Développement
LABEE	:	Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale
LH	**:**	Latin Hypercube
LH.OAT	**:**	Latin Hypercube One-factor-At-a-Time

LHME	:	Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau
MAEP	:	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MECCAGPDPE	:	Minist.re d'Etat Charg. de la Coordination de l'Action Gouvernementale, du Plan, du Développement et de la Promotion de l'Emploi
MIKESHE	:	Integrated Hydrological Modelling System
MMEE	:	Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
MODIS	:	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	:	National Aeronautic and Spatial Administration
NDVI	:	Normalized Deference Vegetation Index
NOAA	:	National Oceanic and Atmospheric Administration
OBEMINES	:	Office B.ninois des Mines
OHHVO	:	Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé
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
SI-FCN	:	Système d'Information sur les Forêts Classées du Niger
SIG	:	Systèmes d'Information Géographique
SPACELLE	:	Système de Production d'Automate Cellulaire Environnemental
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	:	Soil and Water Assessment Tool
UICN	:	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
UNEP	:	United Nations Environment Program
USDA	:	United States Departement of Agriculture
USGS	:	United States Geological Survey
TM	:	Thematic Mapper

Remerciements

La présente thèse, intitulée « **dynamique de l'occupation des terres et ses incidences sur l'écoulement dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou (Nord-Bénin)**» est réalisée dans le cadre de l'obtention du grade de Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi.

Ce travail constitue un tournant décisif de notre vie, et nous voudrions témoigner notre amour, respect et notre reconnaissance à l'égard de toutes les personnes qui nous ont soutenues. Ce travail a pu également être mené à son terme grâce à l'appui, aux conseils et aux encouragements de plusieurs personnes. Qu'il nous soit permis de leur exprimer ici nos vifs remerciements.

Notre profonde gratitude va d'abord à notre Directeur de thèse, Monsieur le Professeur Michel BOKO, pour avoir accepté de diriger cette thèse malgré ses multiples occupations. Ses observations et ses contributions scientifiques ne nous ont nullement fait défaut. Qu'il reçoive ici, nos sincères et profonds remerciements pour ses grandes qualités scientifiques.

Un spécial merci et une reconnaissance toute particulière au Dr Expédit WilfridVISSIN, Maître de Conférences à l'UAC**.** Merci pour Tout et surtout pour tout le temps que vous avez sacrifié pour les conseils et les orientations.

C'est le moment pour nous de remercier les docteurs François TCHIBOZO et Jean Cossi HOUNDAGBA, pour nous avoir acceuilli au Laboratoire de Biogéographie et Expertise Environnementale (LABEE).

Nos remerciements vont également à l'endroit de la Coordinationdu Projet CUD pour nous avoir octroyé six mois de financement pour la finalisation de la présente thèse.

Nous remercions tout le personnel du Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale (LABEE) pour ses soutiens, principalement le Dr Brice TENTE (Chef du Laboratoire), le Dr Odile DOSSOU GUEDEGBE, le Dr Vincent OREKAN, le Dr José GNELE, le Dr Norbert AGOINON, le Dr Jean Bosco VODOUNOU, le Dr Auguste HOUINSOU, le Dr Mama DJAOUGA, le Dr Martin ASSABA, le Dr Ali RACHAD,

Jules ODJOUBERE, Innocent GBAÏ, Irené QUENUM, Maurice AZANLIN, HermannPLAGBETO, Simon ALLAGBE, Clément ADJIRE, Gérald TOVIDE, Darius BOSSOU Azizou SABI YO BONI et Félix DONOU.

Nous adressonsnos remerciements à tout le personnel du laboratoire Pierre Pagney, ‘’Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement’’ notamment le professeur Christophe HOUSSOU, le professeur Constant HOUNDENOU, le professeur Euloge OGOUWALE, le Dr Ibouraïma YABI, le Dr Ernest AMOUSSOU, le Dr Henri TOTIN, le Dr Cyr Gervais ETENE,le Dr Yacine Wilfrid BOKO, le Dr Romaric OGOUWALE, le Dr Guy WOKOU, le Dr Gervais ATCHADE, le Dr Arsène AKOGNONGBE, le Dr Imorou OUOROU BARE, Messieurs Philippe CHABI et Fidèle MEDEHOU.

Nous tenons à remercier aussi le Dr Obarè BAGODO et le Dr Moussa GIBIGAYE pour leurs conseils tout au long de ce travail.

Nos sentiments de reconnaissance et de gratitude vont aussi à l’endroit de nos amis et frères Dr Ismael TOKO, Dr Ousséni AROUNA, Messieurs Soufouyane ZAKARI, Latifou LEFFI, Elliott DOSSOU-YOVO, Housérou DJIBRIL, Abibou MOHAMED, Joseph DJEVI et Marcellin ASSOGBA.

Nous adressons également notre reconnaissance à Monsieur André KINDJINOU qui a accepté de suivre l'évolution de ce travail. Ses conseils, ses orientations et ses critiques ont été très précieux. Nous ne saurions oublier les populations du bassin de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou, de même nous ne pourrions terminer sans manifester notre reconnaissance à tous ceux qui, d’une manière ou d’une autre, nous ont soutenus dans la réalisation de ce travail.

Résumé

La dynamique actuelle de l'occupation des terres du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, qui fait l'objet de la présente thèse, est guidée par l'interaction de trois principaux facteurs : les facteurs naturels dominés par les changements climatiques, les facteurs anthropiques marqués par une intense activité agricole, pastorale et le contexte socioculturel. L'objectif global de la thèse est d'étudier l'influence de la dynamique de l'occupation des terres sur l'écoulement à l'échelle du bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou. La cartographie des unités d'occupation des terres sur la base des images satellitaires, la modélisation prospective, la collecte des données socioéconomiques et l'analyse du modèle SWAT ont été les principales méthodes utilisées.

En effet, la cartographie des changements spatio-temporels des unités d'occupation des terres a révélé que la superficie des formations végétales naturelles est en régression. Ainsi, de 104 419 ha de forêt dense semi-décidue en 1990, 78 867 ha sont demeurés stables. Le reste a été transformé en mosaïques de champs et de jachères (10 282 ha), en plantations (3 302 ha) et en savanes arborées et arbustives (2 154 ha) en 2010. En ce qui concerne les forêts galeries, de 34 977,88 ha en 1990, elles se sont converties en plantations (1 273 ha) puis en mosaïques de champs et de jachères (231 ha).Sur 162 025 ha de forêts claires et de savanes boisées en 1990, environ 128 498 ha sont restés inchangées en 2010. Par ailleurs, 17 563 ha et 12 710 ha ont été respectivement transformés en mosaïques de champs et de jachères et en plantations. En outre, de 1990 à 2010,198 003 ha de savanes arborées et arbustives sont demeurées intactes, alors que 12 358 ha ont été transformés en plantations et 36 546 ha en mosaïques de champs et de jachères. Quant aux plantations qui occupaient une superficie de 10 216ha en 1990, 8 351 ha sont demeurés inchangés. Le reste a été transformé en mosaïques de champs et jachères (1 559 ha) en 2010.

La dynamique prospective a révélé que les savanes arborées et arbustives seront réduites de 20,95 % à environ 16,39 % en 2020, puis à 12,19 % en 2030. Simultanément, les agglomérations vont s'étendre de 0,45 % en 2010 à 1,48 % en 2020 puis à 2,90 % en 2030. De même, les champs et jachères pourraient s'étendre de 37,96 % à 63,91 % en 2030. Les variations du NDVI peuvent être directement liées à la variabilité des précipitations. Pendant la grande saison sèche qui commence en novembre et s'étend jusqu'au mois d'avril, on assiste à une régression des lames d'eau précipitées et écoulées dans le bassin versant. Pendant la saison sèche, l'élevation du NDVI pourrait s'expliquer par le fait que la végétation est alimentée par l'écoulement souterrain.

La variabilité spatio-temporelle de l'écoulement de surface dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou montre que les sous-bassins versants pourraient avoir des écoulements de surface les plus élevés à l'horizon 2022 ; ce qui favoriserait une plus grande disponibilité de l'eau de surface mais également des risques accrus d'érosion.

Mots clés : dynamique, occupation des terres, hydrologie, NDVI, bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

Abstract

The current dynamics of the land use and land cover of watershed land of Oueme basin at Beterou'soutletis the subject of the present thesis. This dynamics is guided by the interaction of three factors: natural factors dominated by climate change, human factors marked by intense agricultural and pastoral activities and socio-cultural context. The overall objective of the thesis is to study the influence of the dynamics of land use on runoff in the catchment basin of Oueme River at the outlet of Beterou. Mapping of land cover units based on satellite images interpretation, prospective modeling, collecting socio-economic data and analysis of the SWAT model were the main methods used in this thesis.

Indeed, the mapping of spatial and temporal changes in land tenure units revealed that the area of natural vegetation is declining. Thus, from 104 419 ha of semi-deciduous dense forest in 1990, 78867 ha are currently stable. The remainednatural vegetation is turned into mosaics of fields and fallow land (10282 ha), plantations (3302 ha), and tree and shrub savana (2 154 ha) in 2010. With regard to the 34 977.88 ha of gallery forests ha in 1990, they were then converted to plantations (1273 ha) and mosaic of fields and fallow land (231 ha). For 162025 ha of woodland and savanna woodlands in 1990, about 128498 ha were unchanged in 2010. In addition, 17563 ha and 12710 ha, were transformed respectively into mosaics of fields and fallow and plantions. Indeed, from 1990 to 2010, 198003 ha of tree and shrub savana remained intact while 12,358 ha have been turned into plantations and 36 546 ha into mosaic of fields and fallows. As for plantations occupying an area of 10216 ha in 1990, 8351 ha remained natural vegetation. The remaining land was turned into mosaics and fallow fields (1 559 ha) in 2010.

The prospective dynamics revealed that tree and shrub savana will be reduced from 20.95 % to about 16.39 % in 2020 and to 12.19 % in 2030. Simultaneously, agglomerations will expand from 0.45 % in 2010 to 1.48 % in 2020, and 2.90 % in 2030. Similarly, fields and fallow could range from 37.96 % to 63 91 % in 2030. The changes in NDVI can be directly related to rainfall variability. During the long dry season that begins in November and extends until April, there is a decline in water galleries and rushed past in the watershed. During the dry season the high aspect NDVI rise up could be explained by the fact that the vegetation is fed by groundwater flow. The spatial and temporal variability of surface runoff in the Oueme watershed at Beterou shows that subwatershed could have increased surface area of flows by 2022; which would promote greater availability of surface water but also increase risks of erosion.

Keywords: dynamics; land use and land cover; hydrology, NDVI, Oueme watershed Beterou's outlet

Introduction

La dynamique de l'occupation des terres dans un bassin versant est un facteur clé de l'estimation des pressions humaines sur les cours d'eau, qu'elle soit positive ou négative (Lalande *et al.*, 2012). Ces pressions varient dans le temps et dans l'espace (Allan, 2004 ; Johnson et Host, 2010). La dynamique de l'occupation des terres modifie aussi de façon significative les interactions terre-atmosphère, influence la biodiversité et les cycles biogéochimiques. De même, une forte pression tant anthropique que climatique sur les sols entraîne une dégradation du couvert végétal (Loireau, 1998 ; Mahé *et al.*, 2000 ; Mahamane, 2007).

Des études antérieures (Lamachère, 1994 ; Seguis*etal.*, 2003) ont démontré que les états de surface ont d'influence prépondérante sur les processus hydrologiques dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest. Ainsi, les modes de transformation du milieu naturel ont permis d'identifier quatre types d'occupation des terres qui sont : la végétation naturelle (y compris les jachères), les surfaces cultivées, les sols nus (sols complètement dégradés et dénudés) et les plans d'eau (barrages et autres retenues d'eau).

Par ailleurs, l'eau est en équilibre précaire avec les écosystèmes à des rythmes alarmants sur de vastes étendues, en raison des actions anthropiques. En effet, le surpâturage, l'extension des superficies cultivées due à la croissance démographique, le prélèvement du bois de feu ont entraîné une dégradation de la couverture végétale, au point que les débits des rivières qu'ils alimentent sont devenus torrentiels avec un important contenu de sédiments en saison humide (Dewispelaere, 1990). Ainsi, pour certains auteurs, les changements d'usage du sol expliquent 60 % de l'augmentation du débit des cours d'eau observée depuis quelques décennies (Souley, 2008). Ces changements d'usage du sol impliquent de *facto* des modifications d'albédo, de rugosité mais aussi des changements de teneur en eau du sol et d'évapotranspiration. En effet, la dégradation du couvert végétal occasionne une réduction de l'humidité du sol et de l'évaporation en augmentant l'albédo. Elle a aussi pour effet d'accroître la température de l'air au sol et à proximité du sol, tout en réduisant le bilan radiatif en surface et en aggravant le déficit du bilan radiatif des systèmes surface-atmosphère à des échelles locales.

Les études hydrologiques ont montré que les coefficients d'écoulement ont fortementaugmenté sur certains hydro-systèmes de l'Afrique de l'Ouest, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale (Diello, 2006 ; Lalande *et al.*, 2012). Ces ruissellements apparaissent plus favorables dans les zones caractérisées par une diminution du couvert végétal, une extension des surfaces cultivées et des surfaces dégradées (Albergel, 1987 ; Leduc *et al.*, 2001 ; Mahé *et al.*, 2002 et 2003). Toutefois, l'ampleur de l'écoulement est fortement tributaire de la variabilité actuelle du climat (Nicholson, 2001 ; Kamagaté, 2006 ; Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010).

Cette thèse, structurée en six chapitres, est une contribution aux débats scientifiques sur le rapport existant entre les précipitations, l'occupation des terres et les ressources en eau.

- Le premier chapitre aborde le cadre théorique et conceptuel de l'étude.
- Le deuxième chapitre met en exergue l'approche méthodologique adoptée pour conduire la présente étude.
- Le troisième chapitre traite des fondements biophysiques et de la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou.
- Le quatrième chapitre présente la dynamique de l'occupation des terresdu bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.
- le cinquième chapitrecomporte essentiellement l'évolution de la variabilité pluviométrique dans le bassin versant de l'Ouéméà l'exutoire de Bétérou.
- Le sixième et dernier chapitre est consacré à l'incidence de la dynamique de l'occupation des terressur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

CHAPITRE I : CADRE THEORIQUE ET CONCEPTUEL

Ce chapitre présente dans un premier temps le cadre théorique de l'étude. Il comporte les objectifs de l'étude et les hypothèses de recherche. Il établit par ailleurs, une synthèse bibliographique à travers le point des connaissances. Dans un second temps, ce chapitre présente le cadre conceptuel mis en exergue dans l'étude.

1.1. Milieu d'étude

Le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou est localisé dans le Nord du Bénin. Il appartient aux zones agro climatiques (la zone Ouest Atacora, la zone cotonnière du centre Bénin et la zone vivrière du Sud Borgou.) (fig. 1). Le bassin versant à l'exutoire de Bétérou qui fait objet de cette thèse est localisé au Nord Bénin. La superficie qu'elle couvre est de 10076,71 km². Ce bassin versant a été très équipé au cours de ces dernières décennies dans le cadre du projet CATCH et du programme AMMA. C'est ainsi une région de référenceconnue sur le plan international sous l'appellationOHHVO.

Du point de vue climatique, le bassin versant bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou est sous l´influence du climat tropical de type soudanien. Ce climat est caractérisé par deux saisons : une saison sèche (novembre à mars) et une saison pluvieuse (avril à octobre). La pluviosité moyenne annuelle est de 1150 mm et l´ETP moyenne annuelle oscille autour de 1500 mm (Toko, 2008).

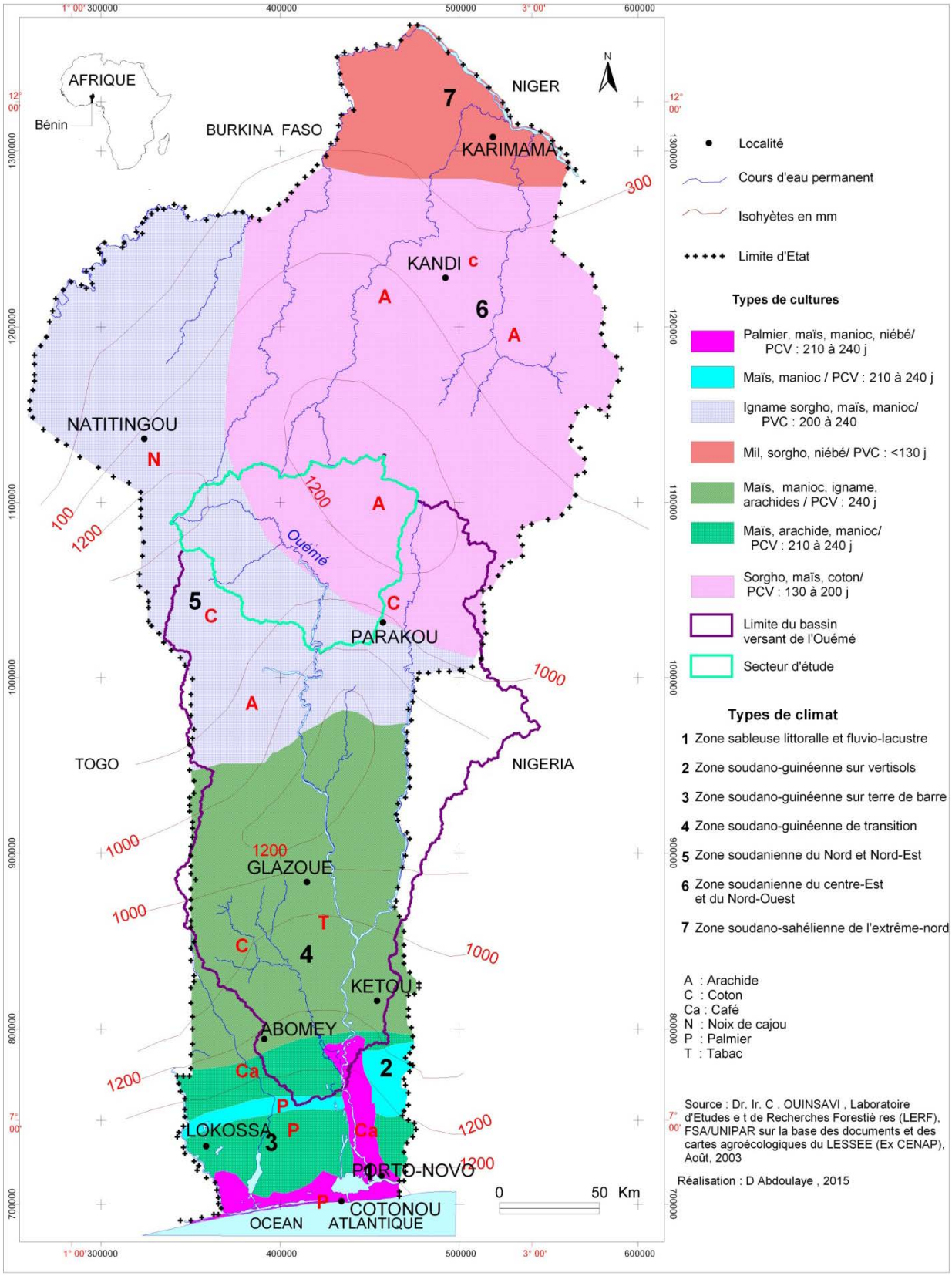


Figure 1: Localisation du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou dans lazone agroclimatique du Bénin

La dynamique paysagère actuelle du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou est guidée par l'interaction de trois principaux facteurs : les facteurs naturels dominés par les changements climatiques, les facteurs anthropiques marqués par une intense activité agricole et pastorale et le contexte socio-culturel.

1.2. Problématique

En Afrique de l'Ouest, l'effet de la baisse pluviométrique sur le régime hydrologique a été très important avec une diminution de 40 % des écoulements dans la région soudanienne (Afouda et Adisso, 1997). Il a été enregistré une baisse relativement brutale de la pluviométrie ; ce qui a entraîné une diminution sensible des ressources en eau et des productions qui en dépendent (Vissin, 2001).

De nombreuses études ont été menées pour montrer l'impactde la dynamique des états de surface sur les ressources en eau, surtout dans la région ouest-africaine (Houndénou, 1992 ; Vissin, 1998, 2001 et 2007; Afouda et Depraetere, 2001, Amoussou, 2010). En effet, l'extrême sensibilité des bassins versants fait de ceux-ci des secteurs privilégiés pour l'étude des mécanismes de la variabilité hydrologique (Vissin, 2007). Les changements éventuels dans le cycle hydrologique des fleuves apparaissent graduellement au bout d'une longue période et sous les conditions hydro-climatiques variées (Wesselink *et al.*, 1995; Ouédraogo, 2001).

Dans le bassin versant supérieur du fleuve Ouémé à Bétérou, la variabilité pluviométrique est marquée par une diminution des hauteurs de pluie et du nombre de jours de pluie (Lelay, 2006). Cette situation entraîne une diminution des ressources en eau et la dégradation du couvert végétal. Par ailleurs, l'analyse des hydrogrammes dans le bassin versant supérieur du fleuve Ouémé à Bétérou a montré une diminution des volumes d'eau écoulés (Kamagaté, 2006). Selon le même auteur, le coefficient d'écoulement varie entre 11 % en année sèche à près de 30 % au cours des années humides, comme 2003.

Dans le contexte des études sur les changements climatiques, le suivi de l'évolution de l'utilisation et de l'occupation des terres représente un enjeu important pour les années

futures (Dubreuil *et al*., 2004). De plus, la connaissance des variations spatio-temporelles de l'occupation et de l'utilisation du sol est un des éléments-clés permettant d'effectuer des simulations de l'évolution des climats, notamment à partir de l'exploitation de longues séries d'images satellites (Champeaux *et al.*, 2000).

Ainsi, les effets directs ou indirects des mauvaises pratiques agricoles adoptées par les paysans sont la dégradation de la végétation, l'extension des espaces nus, la destruction des écosystèmes, la baisse de la pluviométrie, la pollution du milieu par les produits dérivés des pesticides et engrais chimiques (Adam, 2005). Les modifications affectantla couverture végétale dans le bassin versant du Niger ontune influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface (Vissin, 2007). La nature de la couverture végétale intervient sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eauà la surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et écoulement de surface (Gregoire *et Giovani.*, 1990).

Par ailleurs, dans les régions tropicales sèches de l'Afrique de l'Ouest, les évolutions régressives du couvert végétal lors des trois ou quatre dernières décennies posent de nombreuses questions en termes d'interprétation du milieu et ses écosystèmes (Ballouche, 2004). Selon le même auteur, le recul des formations forestières, boisées ou mixtes, leurs transformations qualitatives au profit des formations ouvertes, entrainant la dégradation du bilan hydrique, la déstabilisation du sol et de multiples processus d'érosion, correspondent à ce qu'il convient d'appeler une « aridification du paysage ».

Dans un bassin versant, les caractéristiques du couvert végétal déterminent les ressources en eau réelle, c'est-à-dire l'eau stockée par le milieu, par rapport aux ressources en eau potentielles que sont les précipitations. Ainsi, toute modificationdes états et de la structure de la couverture végétale a des impacts sur les ressources en eau du bassin versant (Cosandey *et al.,* 2003). Les changements éventuels dans le cycle hydrologique du fleuve apparaissent graduellement au bout d'une longue période et sous les conditions hydro-climatiques variées (Ouédraogo, 2001). Tapsoba (1997) a montré que dans la région de l'Afrique de l'ouest, la pluviométrie a, en moyenne, baissé de 180 mm après

1970 par rapport à la période antérieure. Par ailleurs, cette situation a été démontrée au Bénin par de nombreux auteurs, notamment Perard et Bokonon-Ganta(1993), Boko (1988), Adjovi (1991); Houndénou (1999) et Vissin (2001 et 2007). Pour ces auteurs, la pluviométrie au Bénin est caractérisée par une grande variabilité spatio-temporelle non maîtrisée. Ils ont constaté une baisse relativement brutale des hauteurs de pluie, ce qui a entraîné une diminution sensible des ressources en eau et des productions qui en dépendent. Pour Vissin (2001), cette modification du régime pluviométrique est la source de la diminution des écoulements des grands organismes fluviaux du Bénin.

Par contre d'autres auteurs, ont estimé qu'en dehors de la baisse pluviométrique responsable de la diminution des écoulements, plusieurs autres facteurs sont amplificateurs de cette situation. Pour Lamachère (1994), en zones sahélienne et soudanienne, les labours ou les sarclages et la croissance du couvert végétal herbacé modifient radicalement le comportement hydrodynamique du sol cultivés. De même Fournier *et al.,* (2000) ont montré que les jachères génèrent de faibles ruissellements à l'échelle des bassins versants. Par conséquent, une diminution de leur superficie peut accroître, dans des proportions importantes, les ruissellements locaux ou régionaux accompagnés de manifestations érosives.

Vissin (2007) a montré que les modifications affectant la couverture végétale du bassin versant du Niger, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface. Mais la plupart des études sur la dynamique des écoulements dans ce bassin versant se sont concentrées sur les impacts de la variabilité pluviométrique sur les différents termes du bilan hydrologique. Or, c'est la combinaison de la variabilité pluviométrique et les états de surfaces qui influent sur les écoulements du bassin versant.

Les travaux publiés dans le domaine de l'utilisation des terres en relation avec les climats sont donc nombreux et divers (Akongnongbé, 2014 ; Assaba, 2014 ; Amoussou, 2010). Ils vont de simples analyses de la relation végétation/climat, à des exploitations en analyse spatiale et en aide à la décision. Les territoires concernés se rencontrent à l'échelle mondiale, continentale, sous-régionale, au niveau d'un pays ou d'un bassin

versant spécifique, mais peu au niveau d'un exutoire de bassin versant surtout dans les pays en développement.

Fort de tout ce qui précède, un questionnementest suscité:

- Quels sont les fondements biophysiques de la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant du fleuve Ouémé à Bétérou ?

- Comment évoluent les unités d'occupation des terres dans le temps et dans l'espace dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou ?

- Quels sont les effets de la dégradation des unités d'occupation des terres sur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou ?

C'est pour répondre à ces interrogations, que le sujet intitulé sur **« dynamique de l'occupation des terres et ses incidences sur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou (Nord-Bénin) »** a été choisi.

La présente recherche revêt une originalité au niveau des approches spatio-temporelles adoptées par son application à un exutoire de bassin versant dans le cas spécifique de la dynamique d'utilisation des terres et de l'écoulement. C'est ce qui justifie la conduite de la présente étude sur la « dynamique de l'occupation des terres et ses incidences sur l'écoulement dans le bassin versant de Ouémé à l'exutoire de Bétérou ».

1.3. Objectifs de l'étude

L'objectif global de cette thèse est d'étudier l'influence de la dynamique de l'occupation des terres sur l'écoulement à l'échelle du bassin versant du fleuve Ouémé à Bétérou.
De façon spécifique, il s'est agi de :

- identifier les causes géographique et anthropique de la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou;

- cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou;

- analyser la variabilité pluviohydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou;

- déterminer l'influence de la dynamique de l'occupation des terres sur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs hypothèses ont été formulées.

1.4. Hypothèses de travail

La présente recherche est fondée sur les hypothèses de travail suivantes :

- la combinaison des facteurs géographiques et socioéconomiques induit la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

- les principales unités naturelles du couvert végétal connaissent une évolution régressive sous l'effet des activités anthropiques dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou;

- la dynamique hydrologique dépend de plusieurs facteurs dont les facteurs climatiques, édaphiques et du couvert végétal ;

- les écoulements dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou sont liés aux types d'occupation des terres.

Pour permettre une même compréhension des termes de cette étude, la clarification conceptuelle des sous-thèmes s'avère indispensable.

1.5. Clarification des concepts

Les concepts clarifiés sont regroupés par centre d'intérêt.

Dynamique de la végétation

La dynamique de la végétation est le phénomène par lequel différentes plantes se succèdent à un même endroit au cours du temps, en fonction des conditions du milieu, et

notamment du type de sol ; c'est alors une tendance naturelle des groupements végétaux à se rapprocher du climax (Ozenda, 1982).

Occupation des terres

Jansen, (2008) affirme qu'il n'existe pas une définition universellement acceptée de l'occupation du sol, mais reconnaît que plusieurs tentatives ont été faites dans ce sens, notamment par l'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). Pour Turner *et al.*,(1995), l'occupation du sol est l'état biophysique de la surface de la Terre ainsi que de l'environnement sous-jacent de cette surface. En effet, la nature de la couverture végétale 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 écoulement de surface (Grégoire *et Giovani,* 1990). Pour un bassin versant donné, les caractéristiques du couvert végétal déterminent les ressources en eau réelle, c'est-à-dire l'eau stockée par le milieu par rapport aux ressources en eau potentielles que sont les précipitations. Ainsi, toute modification des états et de la structure de la couverture végétale a des répercussions sur les ressources en eau du milieu (Cosandey *et al.*, 2003).

Pour Moser (1996) à l'origine, le terme désignait le type de végétation couvrant le sol, mais le sens a été élargi par la suite pour inclure les installations humaines, telles que les bâtiments et les routes, et d'autres aspects physiques de l'environnement comme les sols, les éléments de la biodiversité et les cours d'eau de surface et souterrains.

L'utilisation de ce concept paraît donc adaptée au présent contexte, puisque la présente thèse considère comme occupation des terres, l'ensemble du couvert végétal, les installations humaines, le mode d'utilisation des terres *(land use)* présentant des effets sur les processus hydrologiques du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.

Ecoulements

Le débit de la rivière est composé principalement de trois types d'écoulement :

- l'écoulement direct de surface qui représente le ruissellement. C'est un écoulement rapide ;

- l'écoulement retardé souterrain, appelé débit de base. Alimenté par les nappes d'eaux souterraines, c'est un écoulement lent à cause du transit de l'eau dans le sol et le sous-sol ;

- l'écoulement dit hypodermique, sous-entend, quant à lui, un écoulement au niveau de la couche superficielle du sol.

Bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

Le bassin versant est la surface d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac. Le bassin versant se définit comme l'aire de collecte considérée à partir d'un exutoire, limitée par le contour à l'intérieur duquel se rassemblent les eaux précipitées qui s'écoulent en surface et en souterrain vers cette sortie (Baok, 2007).

Aujourd'hui, le concept de BVR (Bassin Versant Représentatif) semble de plus en plus pertinent face à différentes problématiques environnementales. C'est pourquoi ont été mis en place différents réseaux internationaux, comme par exemple le réseau européen ERB (pour European network of experimental and Representative Basins) destiné notamment à favoriser les échanges et à coordonner la recherche en hydrologie. L'emploi du terme « *bassin versant* » est relativement récent. Son emploi se répand quand les chercheurs appréhendent le fait hydrologique, en particulier le débit, comme un fait spatial, comme le produit d'un espace géographique saisi dans toutes ses dimensions, dans toute sa dynamique (Lambert, 1973). Pour Loup (1974), le bassin-versant est une surface réceptrice des eaux qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe. Il le définit par rapport à sa morphométrie, à ses caractères climatiques, à sa géologie, à sa végétation, à ses sols. Aujourd'hui, en hydrologie, le bassin-versant désigne la totalité de l'espace drainé par un système fluvial, quelle que soit sa taille. Brunet *et al*. (1992) définissent le bassin-versant comme toute étendue en amont d'une station de mesure et dont les eaux « versent » en ce point. Pour Fritsch (1995), c'est une unité fonctionnelle, à trois dimensions, composée d'un domaine souterrain englobant les unités géologiques et les différents horizons du sol et d'un domaine

superficiel et aérien qui est le lieu privilégié de la vie (plantes, animaux et hommes). Mais pour George et Verger (1996), un bassin-versant, encore appelé bassin hydrologique ou bassin de drainage, est l'espace géographique alimentant le cours d'eau qui le parcourt. Ce bassin a pour axe le cours d'eau principal et pour limite la ligne de partage des eaux le séparant des bassins-versants voisins.

Ainsi, un bassin-versant est l'ensemble du territoire drainé par un cours d'eau principal et ses tributaires. Les eaux souterraines qui alimentent les cours d'eau durant les périodes d'étiage en font partie intégrante, au même titre que les eaux de surface. C'est aussi la surface d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac. C'est l'espace géographique alimentant un cours d'eau et drainé par lui. Il a pour axe le cours d'eau principal et pour limite la ligne de partage des eaux (George et Verger, 1996). Le bassin versant se définit comme l'aire de collecte considérée à partir d'un exutoire, limitée par le contour à l'intérieur duquel se rassemblent les eaux précipitées qui s'écoulent en surface et en souterrain vers cette sortie (Brunet *et al*., 1992). Le bassin versant est limité par des frontières naturelles : les lignes de crêtes ou lignes de partage des eaux. De part et d'autre de ces lignes, les eaux des précipitations et des sources, ainsi que tous les éléments dissous ou en suspension (sédiments, pollution…), s'écoulent vers des exutoires séparés. Il constitue le territoire pertinent pour traiter les causes en amont d'un problème lié aux eaux de surfaces : déficit d'eau, pollution, poissons migrateurs, etc. Différents bassins versants se définissent en fonction de l'échelle de travail ou d'étude, depuis les parcelles de quelques dizaines de mètres carrés d'un minuscule affluent jusqu'aux façades continentales qui abreuvent les océans. Le bassin versant de l'Ouémé couvre les 2/3 du pays.Près de 6 milliards de m^3 d'eau soit 45 % sur les 13 milliards d'eau superficielle pour tout le pays. Près de 1,12 milliards soit 60 % des 2 milliards de m^3 d'eau (recharge en nappe) pour tout le pays. Selon Le Barbé *et al*., 1993, le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou forme un réseau très dense (grosse base de données hydrométéorologique et débimétrique depuis 1997) de données historiques des services opérationnels (DG-Eau/DMN du Bénin). La haute vallée de l'Ouémé couvre une superficie de 14 400 Km^2 et fait l'objet d'un suivi très renforcé des processus hydrologiques et des interactions surface-atmosphère à l'instar d'autres bassins de la sous-région. Le bassin de l'Ouémé à

l’exutoire de Bétérou couvre quant à lui, une superficie de 10 050 Km^2 et fait objet de cette étude.

Exutoire

L’exutoire est défini comme étant le point où convergent toutes les eaux d’un bassin versant (Farès, 2012). A l'intérieur d'un même bassin, toutes les eaux reçues suivent, du fait du relief, une pente naturelle et se concentrent vers un même point de sortie appelé exutoire.

Automate cellulaire

Un automate cellulaire est un système dont les éléments sont des cellules (Dubos-Paillard et Langlois, 2009). Chaque cellule est susceptible de traiter de l’information et d’agir comme un automate.

Selon Oloukoi et Mama (2009), chaque cellule est un automate et « l’automate cellulaire est un réseau de cellules interconnectées ». Ce réseau constitue une topologie : l’organisation des relations entre cellules, la structure de l’automate, définit un maillage où chaque cellule est une maille. Cette topologie correspond à un domaine spatial dont la dimension est soit :

- de dimension 1 (exemple de cellules qui n’ont que 2 voisines, comme les perles d’un collier, et s’organisent selon une ligne) ;
- de dimension 2 (exemple de cellules qui ont 4 voisines, selon des lignes et des colonnes, comme un damier de jeu d’échecs, et établissent un plan) ;
- ou de dimension 3 (exemple de cellules qui ont 6 voisines, les 4 voisines de la dimension 2 et 2 nouvelles, dans un plan orthogonal au premier, comme des appartements d’un immeuble avec des voisins « de l’étage du dessous » et « de l’étage du dessus », en plus des voisins du même étage).

Lorsque que l’on veut modéliser un espace géographique par automate cellulaire, on utilise généralement un automate de dimension 2, comme un plan ou une couche cellulaire. Cette représentation est analogue à une couche d’un système d’information géographique : une cellule est un lieu, positionné géographiquement par des coordonnées

de longitude et de latitude. La taille de la cellule représente une portion du territoire, et celui-ci est plus ou moins bien finement représenté selon la résolution des cellules, comme une image raster ou les sommets ou les arcs d'un réseau d'une couche vectorielle dans un SIG. En dimension 1, on pourrait représenter une route par un ensemble de cellules : chaque cellule est un tronçon de la route et est en relation avec une cellule en amont et une cellule en aval.

Dans la présente étude, c'est un automate cellulaire de dimension 2 dont il sera question : le système territorial du bassin de l'Ouémé à Bétérou, marqué par l'évolution de l'occupation des terres, est représenté par une surface constituée par une couche cellulaire.

Les interactions complexes entre les différents concepts définis sont simplifiées dans un cadre conceptuel (fig. 2) qui donne une vision synoptique de la démarche utilisée.

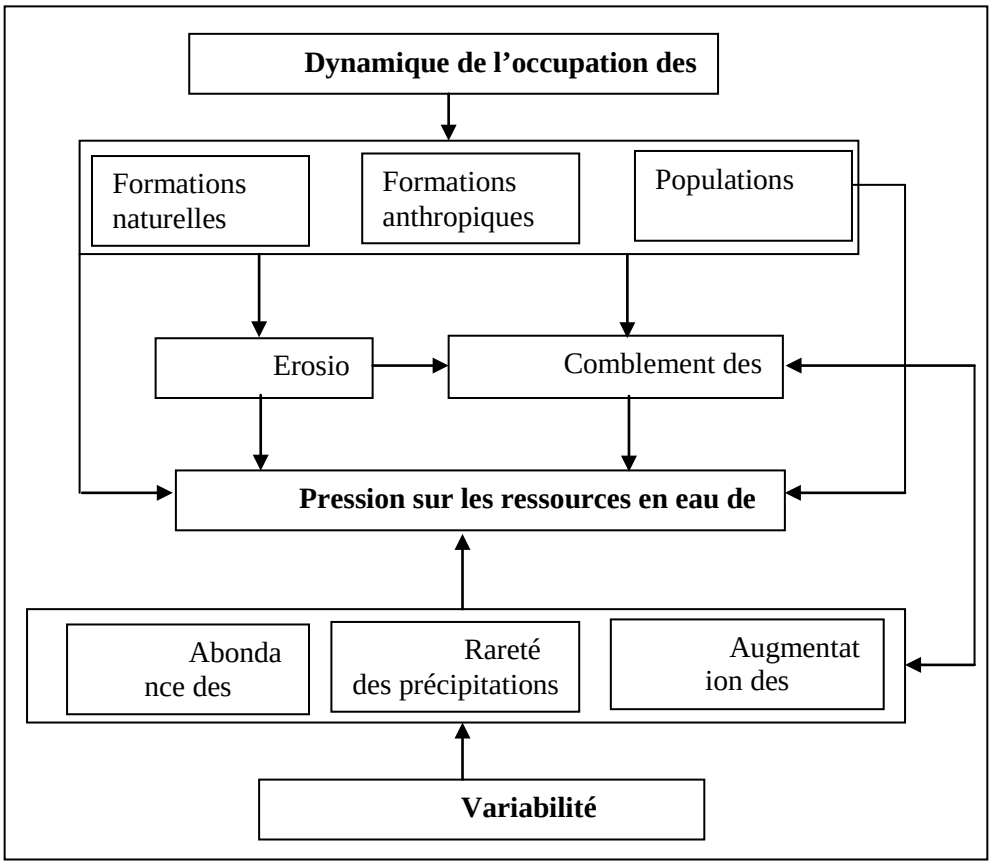


Figure 2: Cadre conceptuel de la recherche

L'analyse de la figure 2 montre que la dynamique de l'occupation des terres à travers les systèmes de cultures pratiqués, est parfois source d'érosion des sols. Cette érosion

constatée en amont participe au comblement des cours d'eau et des zones marécageuses en aval. De tout ce qui précède, il ressort que la dynamique qui s'opère au sein des différentes unités d'occupation des terres influe sur les termes du bilan hydrologique en général, mais plus spécifiquement sur l'écoulement dans le bassin du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

1.6. Revue de littérature

Les différents thèmes abordés dans cette partie prennent en compte :

- la dynamique de l'occupation des terres;
- les approches d'analyse de la dynamique de l'occupation des terres;
- les méthodes de simulation des écoulements ;
- les effets de l'occupation des terres sur l'écoulement.

1.6.1. Dynamique de l'occupation des terres

Il existe une littérature assez fournie sur la question de la dynamique de l'occupation des terres tant à l'échelle mondiale, régionale, nationalevoire locale.

En effet, lepaysage, espace géographique composé d'un ensemble d'écosystèmes en interaction,est dynamique (Bogaert etMahamane, 2005). Lacompréhension de cette dynamique spatio-temporelle est cruciale en raison des interactions avec les activités humaines (Schlaepfer, 2002). Ces activités humaines ont engendré une évolution du couvert végétal (Sounon *et al.*, 2007 ; Oloukoï *et al.*, 2006 ; Rindfuss *et al.*, 2008 ; Noumi *et al.*, 2011; Bokary, 2011 ; Arouna *et al.*, 2011). La dégradation de la végétation et des ressources forestières y attenantes est devenue aujourd'hui l'un des problèmes environnementaux majeurs dans les pays en développement, notamment en Afrique (ONU, 2005). Cette dégradation du couvert végétal contribue largement aux changements globaux car la végétation est l'un des éléments importants du système environnemental.

Fisher *et al.* (2001) ont souligné que le taux le plus élevé de l'extension spatiale des espaces agricoles proviendrait de l'Afrique et de l'Amérique latine. Ils ont aussi projeté qu'une partie substantielle additionnelle de l'Europe et de l'Amérique du Nord sera

emblavée pour le développement agricole, afin de pouvoir faire face aux prochains défis des sollicitations alimentaires. En Algérie, Labani *et al*. (2006) ont révélé que l'analyse de la dynamique de l'occupation des terres contribue à la compréhension de l'orientation des systèmes de production et à la maîtrise des causes pour une meilleure utilisation de l'espace et de l'environnement.

Dans le même contexte,les travaux de Bamba (2010)ont permis de montrer que la configuration et la composition de l'occupation des terres en République Démocratique du Congo ont changé entre 1960 et 2005 surtout du fait des activités du paysage favorisant l'avancée du processus de savanisation dans ce paysage initialement dominé par la forêt. Par conséquent, l'augmentation de la pression sur les ressources naturelles s'accentue. Selon le même auteur, l'analyse diachronique du paysage peut servirà montrer l'effet des actions anthropiques sur l'occupation des terresdecetteprovince. Il a été observé une intensification de la pression anthropique sur les ressources naturelles ainsi qu'une surexploitation du sol du fait du déboisement systématique le long de grands axes routiers et à des mauvaises pratiques culturales (Bizangi, 2004).

Au Bénin, de nombreux travaux ont été réalisés sur la dynamique de l'occupation du sol. La dégradation de l'environnement et des formations végétales au profit des espaces agricoles a été mise en évidence par Borgui et Leffi (1992) dans le versant ouest du cours de l'Okpara. Dans la forêt classée de Touï-Kilibo, Codjia et Gnagna (1993) ont constaté que les superficies des formations denses diminuent au profit des jachères et des espaces cultivés.

Tenté (2000) dans une approche qui intègre l'analyse diachronique et la diversité floristique, a étudiéla dynamique de l'occupation des terres dans la chaine de l'Atacora. Il a abouti à une description des formations végétales dans leur état actuel, tout en évoquant la dégradation des formations ligneuses. Selon le même auteur, si la dégradation de ces formations augmente avec la même vitesse, elle pourra être irréversible et une grande partie des espèces disparaîtra.

Pour Vissin (2007), les types d'occupation des terres ont beaucoup changé entre 1979 et 1992 dans le bassin versant béninois du fleuve Niger. Les formations végétales naturelles

ont subi une régression sensible tandis que les formations anthropiques ont connu une progression. Pour l'auteur, cette dynamique des types d'occupation des terres est, en grande partie, liée à la croissance démographique qui induit des défrichements pour la recherche de terres arables.

Selon Amoussou (2010), les activités humaines modifient l'occupation des terres et les techniques utilisées pour la mise en valeur agricole associées aux conditions naturelles influencent l'état du couvert végétal dans le bassin versant du Mono. L'auteur a révélé que la superficie des formations végétales naturelles est passée de 82,27 % en 1974 à 41,50 % en 2010 au profit des champs et des jachères dont la superficie est passée de 8,77 % à 53,17 %. Entre ces deux dates, les forêts denses sèches ont complètement régressé en se convertissant en d'autres unités d'occupation des terres. En effet, ces résultats sont similaires aux résultats de plusieurs études menées sur l'évolution du couvert végétal dans différentes zones géographiques du Bénin.

Oloukoï *et al.* (2006) en étudiant la dynamique de l'occupation des terres dans le Département des Collines adjacent à la partie nord-ouest de la Commune de Djidja, ont conclu que les formations végétales naturelles régressent au profit des champs et des jachères.

Les recherches effectuées par Orékan (2007) sur l'application du modèle CLUE-S (Conversion of Land-Use and its Effects at Small regional extet, (Verburg *et al.*, 2002) à la dynamique de l'occupation du sol et de l'utilisation des terres à l'échelle locale en région de savane dans le Centre Bénin, indiquent que l'agriculture itinérante sur-brûlis est le principal système agricole pratiqué dans le secteur et que l'exploitation incontrôlée des forêts et la pratique de feux de végétation sont des pratiques courantes. Ces résultats montrent qu'au Centre du Bénin, entre 1991 et 2000, 8 % des forêts ont été dévastées; 20 % de savane boisée et 5 % de savane arbustive ont été converties respectivement en savane arbustive et en champs.

Pour Judex *et al.*, (2006), dans le Centre du Bénin une comparaison des années 1991 et 2000 montre quel'augmentation du nombre de terres agricoles et d'agglomérations est évidente. Les communes à forte croissance démographique comme Tchaourou et

Djougou accusent une augmentation des terres agricoles de 36 % et 40 % respectivement. L'étude montre que l'extension des terres agricoles se fait principalement aux dépens des savanes et des forêts.

Ces changements dans l'utilisation du sol indiquent qu'il existe différentes dynamiques dans différentes régions.

Un peu plus au nord, dans la Commune de Tchaourou et précisément dans les localités de Igbomakro et de Wari-Maro, Orékan (2007) et Sounon (2011), en analysant l'impact de la colonisation agricole sur le couvert végétal, sont parvenus à la conclusion que les formations végétales régressent au profit des champs et des jachères. Ainsi, la végétation est certainement devenue la composante des surfaces terrestres la plus intensivement surveillée par satellite (Escadafal, 2007).

Dans le même ordre d'idée, Arouna (2012) a montré que les formations végétales climaciques étant un état de référence dans l'analyse de l'évolution dans le temps d'une végétation, leur disparition signifie alors qu'elles ont été converties en d'autres unités de l'occupation des terres telles que les cultures, les jachères, etc.

1.6.2. Approches d'analyse de la dynamique de l'occupation desterres

Les études de modélisation de la dynamique de l'occupation des terres en général et des changements de la dynamique spatio-temporelle de la végétation en particulier, ont été faites avec assez de complexité de telle sorte que la généralisation et la comparaison des résultats sont devenues difficiles (Rindfuss *et al.*, 2008).Les méthodes d'étude de la dynamique de l'occupation des terres sont tributaires des disciplines scientifiques et des échelles spatiales d'analyse (Verburg, 2002). Les chercheurs des sciences sociales utilisent des méthodes beaucoup plus descriptives (Oloukoï, 2013). Selon Tenté (2005), la dynamique de l'occupation des terres est analysée à partir de l'approche diachronique qui est une étude rétrospective du couvert végétal. Cette approche est l'une des méthodes les plus importantes pour l'étude des changements environnementaux. De nos jours, la littérature récente stipule que cette méthode à elle seule, est insuffisante, vu les complexités de l'environnement. Dès lors, les études récentes associent à cette approche

historique de la dynamique de l'occupation des terres, une enquête socio-économique sur les facteurs explicatifs des changements observés (Oloukoï, 2013).

L'étude de l'occupation des terres est également réalisée à partir des techniques de la Télédétection et des Systèmes d'Information Géographiques (Lambin *et al*., 1999). Les analyses multi-temporelles, réalisées à partir d'images satellitaires à haute résolution (1 à 30 mètres de résolution spatiale) jusqu'à présent, ont permis de mettre en évidence les processus de dégradation environnementale en Afrique subsaharienne. Dans ces études, des photographies aériennes des années cinquante et soixante-dix sont le plus souvent comparées avec des images TM de LANDSAT ou HRV de SPOT des deux dernières décennies. A noter également l'utilisation des images ASTER datant de l'époque de la guerre froide et, plus récemment, des images à très haute résolution comme IKONOS (un mètre de résolution spatiale en mode panchromatique) et Quicbird (80). Ces études sont le plus fréquemment supportées par des missions de réalité de terrain ainsi que par des enquêtes auprès des populations locales. Les résultats qui en découlent sont généralement similaires: d'une part, une diminution importante des zones boisées et de la végétation en général et, d'autre part, une augmentation remarquable du sol dégradé qui se marque souvent par une remise en mouvement du sol par la déflation éolienne (Chamard et Courel, 1979; Kuberow,1994; Lindqvist et Tengberg, 1994; Pare et Tallet, 1999; Valentin et d'Herbes, 1999; Gueye et Ozer, 2000; N'Djafa Ouaga et Courel, 2000; Gonzalez, 2001;Mainguet *et al.*, 2001; Cuny et Sorg, 2003 ; Hountondji, 2008).

La modélisation de la dynamique d'occupation des terres exige assez d'informations sur la relation entre l'occupation des terres et les facteurs socio-économiques et biophysiques (Verburg, 2000). Les approches utilisées diffèrenten fonction des objectifs et du cadre de l'étude. Certains modèles sont développés pour simuler et explorer l'occupation actuelle des terres, alors que d'autres s'intéressent aux changements possibles dans le futur (Oloukoï, 2006 et 2013). Pour le dernier cas, le modèle CLUE-S (Conversion of Land-Use and its Effects at Small regional extet),qui est un modèle de la dynamique de l'occupation des terres utilisé au Costa Rica pour simuler les changements, est une référence (Veldkamp, 1996).

Les modèles de changements de l'occupation des terres sont des outils utiles pour (i) explorer les divers mécanismes par lesquels ces changements interviennent et les variables sociales, économiques et spatialesqui en sont à la base (Batty et Longley, 1994, (ii) projeter les potentiels futurs impacts environnementaux et économiques desdits changements et (iii) évaluer l'influence despolitiques alternatives et des régimes de gestion sur l'occupation des terres et les modèles de développement.

Diello (2007) a utilisé un modèle de population basé sur des fonctions logistiques calibrées pour générer les données de surfaces cultivées et de surfaces envégétation naturelle sur la période 1950-2050 sur un bassin versant. Pour y parvenir, l'auteur a émis des hypothèses socio-économiques et des équations traduisant la dynamique d'évolution des indicateurs afin d'évaluer le taux annuel de variations de chaque indicateur. Plusieurs auteurs (Fournier *et al*., 2000 ; Yacouba *et al*., 2002) ont pu caractériser le degré d'écoulement de chaque type d'état de surface.

Pour projeter la dynamique future de l'utilisation et occupation du sol au Centre du Bénin, Orékan, 2007 et Judex, 2006,ont implémenté le modèle statistique, spatial et explicite, CLUE-S. Les données relatives à l'utilisation et à l'occupation des terres obtenues à partir d'images satellitaires et de données socio-économiques ont été les principaux paramètres d'entrée. Avec cette méthode, des scénarii futurs de changements spatiaux dans l'utilisation et l'occupation des terres ont été calculés. Le calibrage du modèle a été mis en œuvre par l'utilisation de données historiques décrivant l'occupation du sol entre 1991 et 2000.

Dans le bassin versant de l'Alibori au Bénin, Boko (2012) a associé au modèle CLUE-S, les cartes d'occupation des terres réalisées antérieurement, les facteurs identifiés et spatialisables, et d'autres paramètres comme l'élasticité, les modèles de régression, la matrice de conversion pour simuler l'évolution de l'occupation des terres de 2009 à 2050 en se basant sur un scenario optimiste de conservation des aires protégées.

La cartographie de la végétation sur la base des données de la télédétection, la modélisation prédictive, l'utilisation de la matrice de transition, la phytosociologie et l'analyse des perceptions des populations locales, sont devenues les méthodes

privilégiées dans l'étude des changements de l'occupation des terres et ses implications sur l'environnement (Oloukoï *et al.*, 2006, Bamba, 2010 ;Arouna, 2012 ; et Boko, 2012). Dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, objet de la présente thèse, une étude de la dynamique des unités d'occupation des terres et sa modélisation jusqu'en 2030 sont nécessaires pour le devenir des différentes unités du couvert végétal et autres formes d'occupation des terres.

1.6.3. Méthodes de simulation des écoulements

Plusieurs approches ont été utilisées pour caractériser l'écoulement dans les bassins versants en Afrique subsaharienne en général et au Bénin en particulier.

En effet, Mahé et Olivry (1995) ont montré que les variations des précipitations et les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale sont liés aux flux d'humidité associés à la mousson et à l'alizé maritime de l'Atlantique. A partir des écarts centrés réduits des précipitations annuelles, les auteurs ont pu montrer que la hauteur de pluie a diminué progressivement de 1951 à 1989, avec une rupture en 1970. Ainsi, selon eux, le déficit pluviométrique des décennies 1970 et 1980, a conduit àune forte diminution du coefficient d'écoulement sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Ces diminutions semblent liées à une modification des caractéristiques de la réponse du sol aux précipitations et à un changement des relations rivière-aquifère.

Le Barbé *et al.*, (1993) ont étudié, à travers le modèle hydrologique PLECBEN, la régionalisation des écoulements annuels sur le bassin versant de Ouémé supérieur et les zones de grès de Sota à Coubéri et Sota à Gbassè. Le Lay (2002) s'est occupé de la caractérisation hydrologique et de la simulation numérique des écoulements sur le bassin versant de la haute vallée de l'Ouémé à travers deux conceptuels simples à pas de temps mensuel (le modèle GR2M et celui de Conway). Il a ensuite tenté une comparaison avec les résultats du modèle hydrologique PLECBEN et a noté que les résultats obtenus avec le modèle PLECBEN sont assez satisfaisants mais s'avèrent médiocres pour le modèle GR2M et très médiocres pour le modèle de Conway ceux-ci fonctionnant au pas de temps mensuel.

Vissin (2007) a montré que l'analyse du critère de Nash appliqué aux écoulements moyens donne des valeurs satisfaisantes (supérieures à 60 % pour la plupart). Il a conclu que les modèles GR4J et GR2M présentent une certaine efficacité à simuler les écoulements aux pas de temps journalier et mensuel. Il a ensuite mentionné que dans les sous-bassins versants de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Coubéri, les modèles ont identifié une tendance nette à la baisse du cycle hydrologique.

1.6.4. Effets de l'occupation des terres sur l'écoulement

La dégradation des états et de la structure de la couverture végétale a des répercussions sur les ressources en eau (Grégoire et Giovanni, 1990 ; le Barbé *et al*, 1993 ; Cosandey*et al.*, 2003 ; Vissin, 2007).Ceci est conforme aux résultats de Mahé et Olivry (2005), qui soulignent pour certaines régions du Sahel, qu'avec la régression des formations naturelles, la progression des cultures, les écoulements augmentent, même dans un contexte de déficit pluviométrique.

Selon Lamachère (1994), la position de la surface élémentaire sur le versant est également susceptible de faire évoluer plus ou moins rapidement les caractéristiques de son état de surface en fonction des apports hydriques. L'auteur précise toutefois que l'étude de l'évolution des états de surface et de leur comportement hydrodynamique est un domaine encore très peu exploré en zones sahélienne et soudanienne.

PourIdiéti (2004 et 2009), la question de l'eau est influencée par une géologie assez rigide rendant difficile l'infiltration, un relief à deux unités (Chaîne de l'Atacora à fortes pentes et Plaine de la Pendjari) et une végétation dégradée qui accentuent l'écoulement, une activité agricole qui contribue à la désertification et en conséquence au déficit de l'eau).

Amoussou (2005) dans une étude antérieure portant sur l'environnement des écosystèmes du bassin versant de Couffo et sur l'occupation des terres,a identifié les facteurs de dégradation et leur impact sur l'écoulement et la sédimentation. Ainsi, la régression de la superficie des jachères de 26 % sur le Couffo en 2000 par rapport à celle de 1982, peut

accroître le ruissellement : la réduction continue des espaces en jachères induite par la croissance démographique accentuerait la production des écoulements de surface.

Selon Amoussou (2010), la pression humaine a entraîné une diminution de plus de 60 % des formations de forêts et de savanes arborées, qui jouent un rôle modérateur sur l'écoulement, facilitent l'infiltration et ralentissent les apports solides vers les lits des cours d'eau. La dégradation du couvert végétal naturel de plus de 24 % de 1982 à 2000 dans le sous-bassin versant du Couffo, pose la question de son rôle sur l'évolution du comblement du système lagunaire suite au ruissellement de surface.

Quant à Vissin (2007), il estime que les faibles coefficients d'écoulement et la faible corrélation entre écoulement et la recharge, montrent que la précipitation ne constitue pas le seul paramètre expliquant le fonctionnement hydrologique du bassin versant, mais qu'interviennent aussi le substratum géologique et les états de surface.Riad (2003) souligne que l'analyse des données physiques et hydro pluviométriques par différents outils statistiques, s'est avérée nécessaire pour caractériser l'influence des caractéristiques physiques sur la répartition et l'évolution spatio-temporelle des écoulements superficiels, afin de mieux comprendre le comportement hydrodynamique au sein des bassins versants étudiés.

Par ailleurs, Grégoire et Giovanni (1990) ont utilisé le suivi par télédétection pour détecter des changements dans les états de surface des bassins versant s versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio de Corubal. Les données enregistrées ont montré les possibilités qu'elles offrent pour la caractérisation des changements saisonniers des états de surface pouvant avoir des répercussions sur les écoulements. Les auteurs soulignent aussi que, partant de ces enregistrements, des indices ou paramètres descriptifs des changements d'états de surface peuvent être définis.

Fowé *et al.* (2011) ont observé une augmentation des superficies en savanes et en cultures au détriment du sol nu et une forte décroissance de la capacité de rétention en eau du sol entre 1972-1992 due à une dégradation avancée du bassin versant liée aux activités anthropiques (destruction du couvert végétal, perte de fertilité des sols).

Eu égard à tout ce qui précède, la thématique de l’occupation et de l’utilisation des terres peut être analysée par le biais de plusieurs techniques et méthodes dont la télédétection. Dans le cadre de la présente étude, la dynamique de l’occupation des terres et son impact sur l’écoulement est étudiée par l’entremise de la cartographie par approche Télédétection et Système d’Information Géographique (SIG).

Conclusion partielle

La présente recherche revêt une originalité au niveau des approches spatio-temporelles adoptées par son application à l’exutoire d’un bassin versant dans le cas spécifique de la dynamique d’utilisation des terres et de l’écoulement. L’impact s’explique souvent, quel que soit son effet effectif, comme le résultat d’une utilisation du territoire.

L’insuffisance d’écrits pertinents sur la thématique «impact de la dynamique de l’occupation des terres sur l'écoulement» constitue alors une motivation à développer une recherche dans ce sens.

Cette partie théorique développée, nécessite une méthodologie adéquatepour atteindre les objectifs fixés.

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre traite de la recherche documentaire, du choix des localités d'enquête, la présentation des données et matériels utilisés, la démarche méthodologiqueet des différentes approches utilisées pour analyser les simulations des unités d'occupation des terres et des écoulements. La démarche méthodologique adoptée pour les recherches est intimement liée aux objectifs spécifiques de l'étude.

2.1. Recherche documentaire

Elle a consisté à mener des recherches à travers les différentes bibliothèques et centres de documentation. Il s'agit principalement des bibliothèques de la Faculté des Lettres Arts et Sciences Humaines, de la Faculté d'Agronomie, du Centre de documentation du Campus numérique de l'Université d'Abomey-Calavi, de la bibliothèque Centrale de l'Université. En plus, certains documents personnels ainsi que des sites web (www.google.com, www.sholargoogle.com,) ont été consultés.

La recherche documentaire a permis d'appréhender et de délimiter les grands ensembles du milieu physique et d'acquérir des connaissances de base sur l'état d'occupation des terres. Pour ce faire, les cartes topographiques et les cartes d'occupation des terres ont été exploitées. Ceci a permis d'approfondir les connaissances sur certains aspects du thème.

2.2. Acquisition des données

Il s'agit dans cette section de préciser la source des données collectées et de montrer leur utilité. Ce sont : les données planimétriques, pluviométriques, hydrologiques, de végétation et socio-économiques. Les stations pluviométriques retenues obéissent à des critères de longueur de séries et de qualité des données, comme prévu par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

2.2.1. Données planimétriques

Elles concernent essentiellement :

- le fond topographique IGN au 1/200.000sur lequel figurent le réseau routier, les cours d'eau et quelques villages du secteur d'étude ;

- la carte pédologique au 1/200 000 (ORSTOM, 1977), des feuilles de Djougou, Parakou, Bembèrèkè et Natitingou ;

- la carte géologique au 1/200 000(OBEMINES, 1989), feuilles de Djougou, Parakou et Nikki ;

- une image multi spectrale Landsat TM de février 1990 : Path192/Row 53;

- une image multi spectrale Landsat ETM+ de décembre 2000 Path192/Row 53; Path192/Row 54;

- une image multi spectrale Landsat ETM+ de novembre 2010 : Path192/Row 53;Path192/Row 54;

- une image Google Earth de 2013 pour la réalisation des cartes de l'occupation des terres ;

- des séries temporelles d'image MODIS-NDVI, de 1982 à 2010.

La planche 1 présente les trois images satellitaires utilisées dans le cadre de cette thèse.

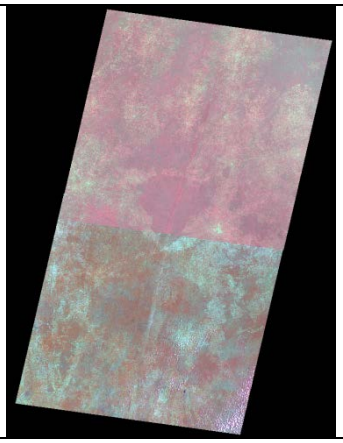
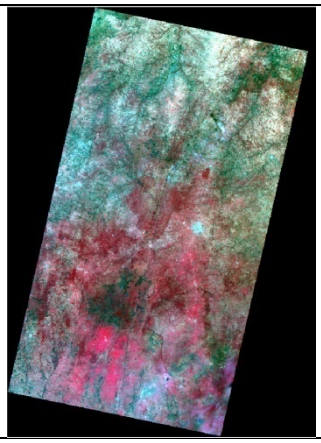
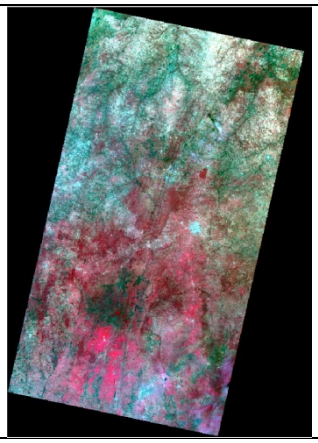
		

Image Landsat TM de février 1990 : scène du Nord-Bénin	Image LandsatETM+ de décembre 2000 : scène du Nord-Bénin	Image Landsat ETM+ de novembre 2010 : scène du Nord-Bénin

Planche 1: Images satellitaires exploitées

Les caractéristiques des images utilisées sont détaillées comme suit (tableau I).

Tableau I: Caractéristiques des données satellitaires utilisées

Données	Dates d'acquisition	Nombre de bandes	Capteur	Résolution spatiale
Landsat	1990	7	TM	30 m
Landsat	2000	7	ETM+	30 m
Landsat	2010	7	ETM+	30 m
Google Earth Pro	Août 2013	-	-	1,1m
Bandes spectrales en Km	TM1 0,45-0,56 TM2 0,52-0,60 TM3 0,63-0,69 TM4 0,76-0,90 TM5 1,55-1,75 TM6 10,04-2,5 TM7 2,10-2,35	TM1 0,45-0,56 TM2 0,52-0,60 TM3 0,63-0,69 TM4 0,76-0,90 TM5 1,55-1,75 TM6 10,04-12,5 TM7 2,10-2,35	TM1 0,45-0,56 TM2 0,52-0,60 TM3 0,63-0,69 TM4 0,76-0,90 TM5 1,55-1,75 TM610,04-2,5 TM7 2,10-2,35	-
Couverture au sol	19.6x266 km	170X182, 5 km	60x 60 km	-
Cycle orbital	-	jours	26 jours	-

Source : http://glovis.usgs.gov ou bien http://earthexplorer.usgs.gov.

2.2.2. Données pluviométriques et hydrologiques

Au Bénin, les données pluviométriques sont gérées conjointement par la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) de la Représentation Nationale de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne (ASECNA) et la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau). Ces institutions ont compétence à collecter et centraliser les relevés météorologiques de terrain et en vérifier la fiabilité. Les données de cette étude exclusivement pluviométriques aux pas de temps mensuel et annuel, ont été obtenues auprès du Service climatologique de l'ASECNA à Cotonou sur la période de 1965 à 2010. Elles ont ensuite été reprises et complétées, grâce à la banque de données de LACEDE) de l'Université d'Abomey-Calavi et celle du programme AMMA. Le choix de cette période a été fait pour deux raisons :

- considérer un maximum de station pour couvrir un plus vaste espace géographique possible pour les besoins cartographiques des indices définis plus loin;

- travailler sur une longue série pour obtenir des analyses fréquentielles fiables. La période choisie (1965-2010) est la série la plus longue commune à toutes les stations considérées.

Quant aux données hydrologiques, elles ont été essentiellement fournies par la Direction Générale de l'Eau et le Laboratoire d'Hydrologie et de la Maîtrise de l'Eau (LHME) de la Faculté des Sciences Agronomique de l'UAC. Elles concernent les débits journaliers et mensuels du fleuve Ouémé à la station de Bétérou, sur la période 1965-2010. Mais ces séries sont pour la plupart lacunaires et inutilisables. Les données de l'Evapotranspiration Potentiel (ETP) décadaire et de température issues de la station synoptique de Parakou et couvrant également la même période.

Un réseau de douze (12) stations répondant à une meilleure répartition spatiale a été retenu pour les analyses et pour vérifier l'existence d'une rupture de stationnarité. Ces stations ne sont pas de la même génération. En conséquence, les relevés ne couvrent pas des périodes identiques. En outre, on note des lacunes qui constituent un handicap pour une analyse approfondie. Par ailleurs, il se pose le problème de la qualité et de la fiabilité des observations dans le secteur d'étude. La figure ci-dessous (fig. 3) présente la répartition des stations climatologiques retenues pour l'analyse.

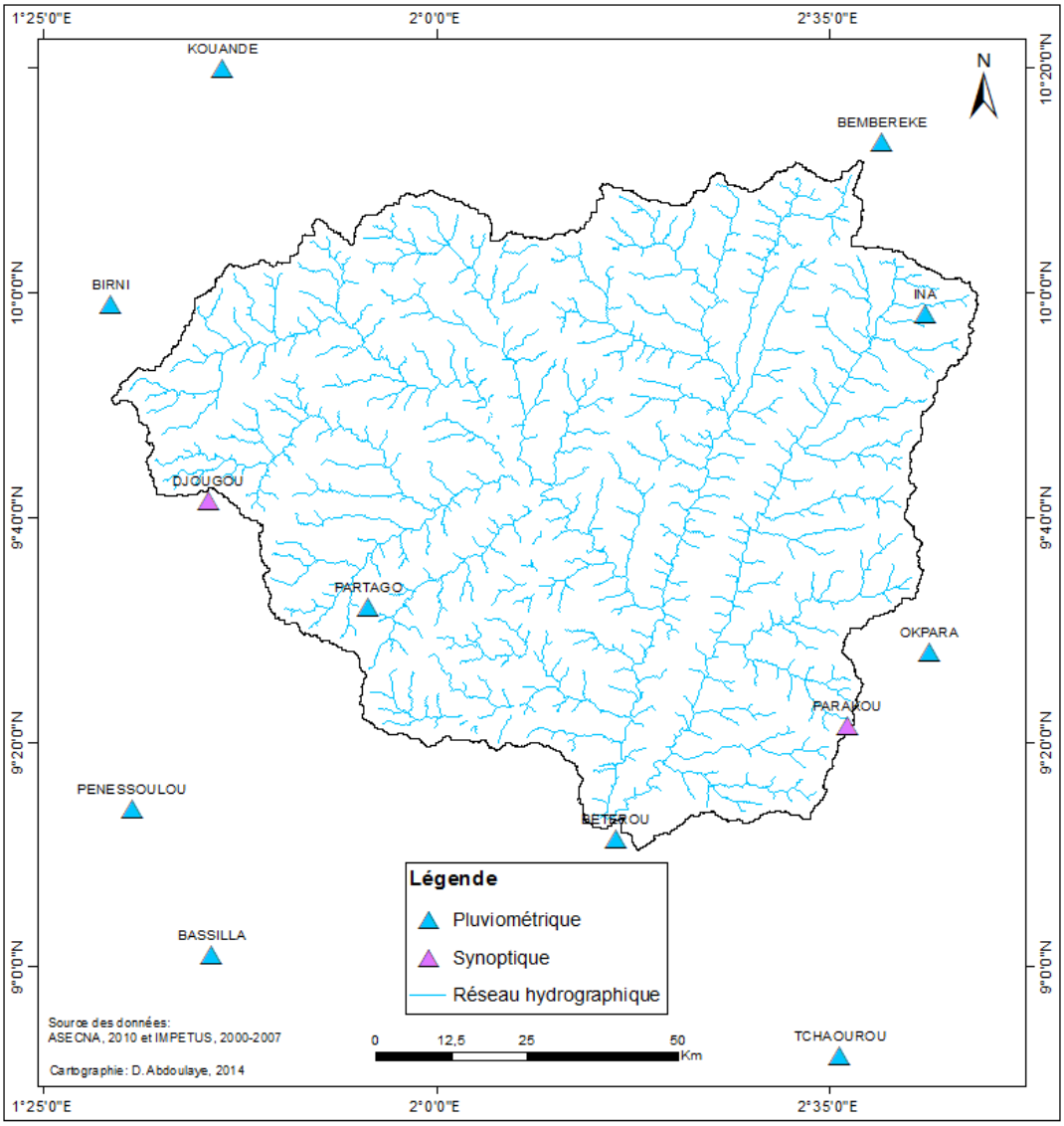


Figure 3: Stations climatologiques installées dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

2.2.3. Données de végétation fournie par MODIS-NDVI

Le choix de l'imagerie MODIS NDVI, disponible depuis 1982, s'explique par plusieurs raisons : sa gratuité, la taille des scènes qui est adaptée à l'étendue géographique du phénomène étudié et sa haute résolution temporelle (une image tous les 1 à 2 jours) qui compense sa faible résolution spatiale (pixel de 250 m à 500 m de côté pour les données spectrales utilisées). Le tableau II présente les principales caractéristiques du capteur MODIS.

Tableau II : Caractéristiques du capteur MODIS

Paramètres d'orbite	
Orbite	Héliosynchrone, quasi-polaire, circulaire
Altitude	705 km
Cycle orbitale	Journalier (tous les deux jours vers l'équateur)
Intersection avec l'équateur	Descendant (TERRA)Ascendant (ACQUA)
Heure	10h30 13h30
Largeur de visée	2330 km
Orbite	Héliosynchrone, quasi-polaire, circulaire
Caractéristiques du capteur	
Nombre bandes spectrales	36
Résolution spatiale	250 m (Bandes 1-2) ,500 m (Bandes 3-7), 1000 m (Bandes 8-36)
Intervalle spectral (µm)	Bandes 1 – 7 utilisées pour l'observation de la terre
Bande 1	0,620 – 0,670
Bande 2	0,841 – 0,876
Bande 3	0,459 – 0,479
Bande 4	0,545 – 0,565
Bande 5	1,230 – 1,250
Bande 6	1,628 – 1,652
Bande 7	2,105 – 2,155
Types d'images proposées	
Calibration	MOD01/MOD02/MOD03
Atmosphère	MOD04/MOD05/MOD06/MOD07/MOD08/MOD35
Terre	MOD09/MOD11/MOD12/MOD13/MOD14/MOD15/MOD16
Cryosphère	MOD09/MOD11/MOD12/MOD13/MOD14/MOD15/MOD16 MOD17/MOD43/MOD44/MCD45
Océan	MOD10/MOD29
Types d'images proposées	MOD18/MOD19/MOD20/MOD21/MOD22/MOD23/MOD24 MOD25/MOD26/MOD27/MOD28/MOD36/MOD37/MOD39

***Source** : MODIS website, 2010*

Parmi les 68 produits standards proposés, un produit MODIS, correspondant à un produit de synthèse, a été utilisé. Le produit MOD13Q1, considéré comme le produit de référence pour la caractérisation des dynamiques de la végétation, est celui pour lequel les séries temporelles font l'objet de développement méthodologique. Dans le tableau III les principales caractéristiques y sont présentées.

Tableau III: Descriptif du produit MODIS (MOD13Q1 v5)

Paramètres	Caractéristique
Résolution spatiale	250 m
Bandes spectrales	1-2-3-7
Indices de Végétation	NDVI
Bande qualité	1 par indice de végétation – codée sur 16 bits avec 11 paramètres - description disponible dans (Huete A.R. *et al.* 1999)
Résolution temporelle	16 jours
Projection	Sinusoïdale
Adresse téléchargement	Earth Observation System (EOS) Data Gateway (http://lpdaac.usgs.gov)

***Source** : MODIS website, 2010*

Le produit MOD13Q1 correspond à des synthèses produites à partir des données journalières de Réflectance de Surface corrigées des effets atmosphériques (MOD09GQK) acquises sur une période de 16 jours. Les valeurs initiales de pixel sont étalées entre 0 et 255, où la valeur des pixels augmente avec la présence de la végétation. Chaque pixel de 250 m contient les valeurs de Réflectance de Surface dans les bandes 2 et 3, et les valeurs pour l'indice de végétation NDVI.

La disponibilité des images depuis 1982 pour les trois produits MODIS permet de définir une période d'analyse longue (1982-2010). Au total, 720 images MODIS ont été téléchargées sur la période de 2001 à 2010 et 418 images MODIS pour la période allant de 1982 à 2000.

2.2.4. Données socioéconomiques

Ces informations concernent essentiellement les données démographiques et les données provenant des enquêtes de terrain.

Les données du Recensement Général de la Population et de l'habitation (RGPH) du Bénin (1992, 2002 et 2013 date du dernier recensement) à l'échelle de village, d'arrondissement et communale sont utilisées. Les données démographiques en complément des données d'occupation des terres, ont permis de décrire le niveau d'anthropisation dans le bassin et d'évaluer la dynamique de la pression démographique.

Les enquêtes de terrain ont permis de collecter les informations sur les groupes socio-culturels des populations qui travaillent dans le bassin, ainsi que les activités auxquelles ils se livrent, l'utilisation qu'ils font des ressources du bassin, les déterminants de la dynamique de l'occupation des terres. Ces données, complétées aux informations quantitatives permettent de mieux cerner la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant.

2.2.5. Critique et reconstitution des données pluviométriques et hydrologiques manquantes

Un travail a consisté à identifier et à combler les lacunes contenues dans les séries de mesures. En effet, des lacunes et discontinuités dans les séries chronologiques des pluies et débits ont été remarquées pendant certaines années ou mois d'une année.

- **Elimination des données douteuses**

Une élimination de la base de données de toutes les erreurs aléatoires flagrantes dues à des fautes de frappe ou à la saisie des relevés, parfois purement inventés par les lecteurs a été faite.

Ainsi, cet exercice a entraîné la suppression de certaines données trop douteuses. Ce contrôle n'a permis d'éliminer que les valeurs manifestement fausses. Pour ce qui est de la qualité des données, il est à préciser qu'au niveau des stations pluviométriques, que seules ont été prises en compte dans cette étude les stations ayant un taux de lacunes inférieur à 5 %. Cette méthode a déjà fait l'objet de plusieurs études (Agbidinoukoun et Gbaguidi, 2007 ; Zannou, 2006, Vodounnon, 2008, Akognongbé, 2008, Agbidinoukoun, 2011). En effet, le comblement de lacunes proprement dit a consisté à repérer parmi les stations retenues, celles qui se rapprochent en latitude l'une de l'autre. Une fois ces stations repérées, il s'est agit d'appliquer une régression linéaire à ces stations afin d'y déceler une probable corrélation entre ces données de stations différentes mais suffisamment proches en latitudes (Musy et Maglaine, 1992, Meylan et Musy, 1998, Vodounnon, 2008, Akognongbé, 2008 et Amoussou, 2010).

Ainsi, dans le but de combler ces déficits, une reconstitution des données manquantes a donc été faite. Il est cependant indispensable, avant de traiter ces données, de se préoccuper de leur qualité et de leur représentativité au moyen de la méthode du double cumul et des régressions entre postes voisins corrélés. Le principe de cette méthode graphique consiste à vérifier l'homogénéité des valeurs mesurées de la station à tester en les corrélant avec celles de référence. Cette opération permet de combler les lacunes, de tester l'homogénéité des séries de données et de critiquer les données brutes du réseau pluviométrique et hydrométrique. Cette comparaison utilise au pas de temps choisi, non pas les valeurs observées mais leur cumul (Meylan et Musy, 1998). Par ailleurs, la méthode suggère que l'évaluation des données manquantes à une station soit déterminée à partir des valeurs provenant de la station voisine présentant le meilleur coefficient de corrélation et ayant fonctionné durant le mois manquant. La méthode la plus simple pour combler, sans erreur majeure les lacunes des séries, est de remplacer la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance mensuelle des stations pluviométriques et hydrométriques (Musy et Maglaine, 1992).

- **Reconstitution des données manquantes**

La fiabilité du comblement des données manquantes de pluies et de débits mensuels dépend essentiellement de la qualité des données existantes. Elle dépend en partie aussi de la significativité climatique et hydrologique des unités géographiques à l'intérieur desquelles une homogénéisation entre les stations peut être faite (Mahé, 1992).

En effet, une vérification manuelle systématique a été réalisée sur les fichiers de données brutes des hauteurs de pluie et des débits journaliers de l'ensemble du réseau hydropluviométrique. La comparaison des données des fiches originales de l'ASECNA avec les données de la base de données d'AMMA pour la correction des lacunes de la période d'après 1984 ne garantitrien quant à la fiabilité des résultats. Une méthodologie a donc été adoptée pour le traitement des données pluviométriques. En effet, dans le cadre des recherches hydrologiques, il est nécessaire de déterminer les hauteurs de pluies moyennes dans le bassin-versant. Celles-ci ont été estimées par interpolation des pluies

mensuelles mesurées sur les différentes stations et cela pour chacun des mois de la période d'étude.

La méthode utilisée pour obtenir la pluie moyenne dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou s'est inspirée de celle utilisée par Akognongbé et Vodounnon (2008) et Amoussou (2010). Cette méthode a permis de décrire de façon explicite l'organisation des champs de pluie en fonction des coordonnées géographiques (latitude, longitude) et de l'altitude, puis de spatialiser par interpolation cubique l'information résiduelle non décrite par ces trois variables. Cette méthode s'inspire de celle de Benichou et Le Breton (1987), mais sans inclure la notion de « paysage topographique », du fait de la faiblesse relative des dénivellations du secteur de recherche. Cette méthode est aussi indispensable pour l'évaluation de la ressource en eau sur le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou car les résultats ne sont acceptables que lorsqu'il a été procédé à une interpolation ou à un krigeage des données pluviométriques sur le bassin. Ainsi, même si les cumuls événementiels permettraient d'estimer leur variabilité spatiale, seuls les champs des cumuls d'un certain nombre d'événements peuvent être correctement estimés par interpolation. Cette interpolation comporte quatre étapes à savoir :

- ✓ **Régression linéaire multiple**

C'est une généralisation directe à plusieurs variables explicatives de la régression linéaire simple. C'est un modèle statistique réalisé en combinant différents prédicateurs (xj) supposés explicatifs, et visant à expliquer au mieux la variable à prévoir (y) (Oettli, 2008). Ainsi, on suppose donc que $y$et les $\{xj\}$ sont liés par une relation linéaire sous la forme :

$$\hat{y} = a_1x_1 + a_2x_2 + a_jx_j\ldots\ldots\ldots + a_px_p + a_0$$

Avec :

$\hat{y}$: l'estimation de y calculée a l'aide de l'équation ;

x_j: un régresseur ($j = 1, 2, \ldots, p$) ;

a_j: le coefficient associe ($j = 1, 2, \ldots, p$) ;

a_0: une constante.

L'annulation des dérivées partielles des équations linéaires permet de déterminer les coefficients qui rendent minimale la somme des carrés des écarts. La droite de régression partage en réalité les points expérimentaux en deux groupes dont les écarts, par rapport à la droite de régression, sont respectivement positifs et négatifs et se compensent exactement (Delhez, 2005 et Amoussou, 2010). La régression multiple est utilisée ici pour estimer les précipitations à partir des trois régresseurs suivants : latitude, longitude, altitude.Le coefficient de détermination s'écrit :

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{N}(yi-\bar{y})^2}$$

Avec *N*, le nombre de stations

Il constitue une mesure de validité du modèle linéaire de régression, exprimée comme le rapport de la variance expliquée par le modèle linéaire et de la variance totale des données. Ce coefficient varie entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 montre un bon accord entre les données et le modèle linéaire. Lorsque l'accord est de moins en moins bon, le coefficient r^2décroit vers sa valeur minimale 0.

La mesure absolue de l'accord entre les données et le modèle linéaire est donnée par l'erreur standard de l'estimation d'équation, soit :

$$S\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N-2}\sum_{i=1}^{N}(yi - \hat{y}i)^2}$$

Avec *N-2* qui représente une estimation du nombre de degré de liberté, basée sur le fait que les coefficients sont estimés à partir de l'ensemble des données du bassin versant.

Cependant, en régression multiple, il est aussi nécessaire de déterminer le coefficient de corrélation partielle qui mesure la liaison entre deux variables lorsque l'influence d'une troisième (ou de plusieurs autres) reste constante sur les deux variables comparées. La formule suivante décrit le calcul de la corrélation partielle entre *y* (la pluie) et x1(la latitude) en tenant x2(longitude) et x3(l'altitude) constants :

$$r_{y,\,x1/x2,\,x3} = \frac{ryx1 - (ryx2xrx1x2)\,(ryx3xrx1x3)}{\sqrt{(1 - r2yx2)\,(1 - r2x1x2)\,(1 - r2yx3)\,(1 - r2x1x3)}}$$

r_{yx1}: le coefficient de corrélation simple entre la variable y et la variable x1;

r_{yx2}: le coefficient de corrélation simple entre la variable y et la variable x2 ;

La corrélation partielle permet d'apprécier l'implication des coordonnées géographiques et du relief dans la répartition spatiale des précipitations dans le bassin versant. Ce coefficient se teste a l'aide d'un paramètre *F* de Fisher-Snedecor a 1 et *n-p* (p désigne le nombre de régresseurs de l'équation de régression multiple, ici 3) degrés de liberté (Borcard, 2006, cité par Amoussou, 2010). Le carré du coefficient de corrélation partielle $r^2_{y,x1/x2,x3}$ mesure la proportion de la variation de *y* expliquée par x1 indépendamment de l'influence de *x2* et *x3*. Ce coefficient est calculé pour les moyennes mensuelles de précipitations. Donc, à chaque mois correspond un coefficient de corrélation partielle qui traduit l'influence des paramètres x1, x2 et x3 sur y.

Les douze modèles de régression multiple sont ensuite utilisés pour fournir une première spatialisation, c'est-à-dire une estimation des précipitations moyennes mensuelles en tout point du bassin versant, défini par la position en latitude, en longitude et en altitude.

Apres ce stade de la régression linéaire multiple, on calcule pour chaque station un ratio exprimant le rapport entre la pluie moyenne mensuelle observée et la pluie moyenne estimée par le modèle de régression (ratio moyen). De façon similaire est calculé le ratio entre la pluie mensuelle de chaque année et la pluie estimée par la régression multiple pour cette même année.

- ✓ **Interpolation cubique des ratios moyens et la reconstitution des champs moyens mensuels**

Les ratios obtenus décrivent la répartition de la pluie, indépendamment des coordonnées géographiques et de l'altitude. Ils ne représentent qu'une fraction de la variabilité spatiale de la pluie. Au départ, disponibles seulement dans chacune des stations, ils sont ensuite interpolés afin d'obtenir, pour chaque mois, une valeur en chacun des points de grille du bassin versant. Cette interpolation est fondée sur le traitement mathématique de la

variation spatiale du ratio considéré. L'espace géographique du bassin versant est appelé ici « champ » et noté *D*. Le ratio examiné est représenté par une certaine donnée localisée sur le bassin versant. Une telle mesure est nommée « variable régionalisée » et elle est vue comme une fonction numérique (Matheron, 1971) définie sur le champ.

Elle est notée [*z*(*s*), *sεD*] *où S* = (*x*, *y*) et représente un point du champ identifié par ses coordonnées géographiques. La valeur de cette fonction en un point particulier *si*, notée *z*(*si*), porte alors le nom de « valeur régionalisée » (Wackernagel, 2003). L'interpolation spatiale répond au besoin de connaitre la valeur d'une variable régionalisée en un site so du champ *D*, autre que l'un des sites d'observation. Elle se définit ainsi par la prévision de la valeur d'une variable régionalisée en un site ou elle n'a pas été mesurée à partir des valeurs régionalisées observées z(s1) à z (sn) (Arnaud et Emery, 2000). La valeur prédite en *s0* est notée $\hat{z}(s0)$.

La méthode retenue ici repose sur une interpolation cubique qui s'appuie sur la triangulation de Delaunay, cité par Baillargeon, 2005. La triangulation se base sur le partage de l'espace étudié en polygones de Thyessen (Baillargeon, 2005). Par cette méthode, l'estimation de la valeur régionalisée en *s0* prend la forme d'une moyenne pondérée des valeurs régionalisées observées aux différents sommets du polygone.

L'interpolation cubique s'effectue en ajoutant une surface, souvent à un polynôme, dans chacun des triangles. Les valeurs régionalisées des stations pluviométriques du champ, formant les sommets du grand triangle dont sont issus les petits triangles, sont incluses pour l'interpolation. 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. Par exemple, la prévision en un point so s'écrit :

$$\hat{z} = \frac{A1z(s1) + A2z(s2) + A3z(s3)}{A1 + A2 + A3}$$

L'avantage de la méthode d'interpolation cubique de l'espace est de donner une représentation exacte à l'échelle locale. Elle n'utilise que les observations localisées assez prés du point de prévision selon un critère de voisinage. Cette méthode d'interpolation simple est déterministe, car elle ne modélise pas la variable régionalisée

par une variable aléatoire. Elle est suffisante dans le contexte de l'étude effectuée pour deux raisons :

- le nombre de stations est insuffisant pour établir un variogramme pour le krigeage ;

- les essais de krigeage n'ont pas permis de déceler une structure suffisante du champ pluviométrique, au-delà de ce qui est décrit par le modèle, qui tienne compte des coordonnées géographiques et de l'altitude. Cette interpolation cubique a été appliquée d'abord aux ratios, afin de reconstituer les champs moyens mensuels. Pour cela, les valeurs de pluies estimées en tout point sont multipliées par les ratios interpoles en ce même point. La même démarche a été utilisée pour déterminer les champs d'anomalies interannuelles.

- ✓ **Interpolation cubique des ratios interannuels à la moyenne et la reconstitution des champs interannuels**

Elle vise à la reconstitution finale des champs moyens interannuels de pluie. Elle fait intervenir la liaison entre les ratios moyens interpoles de chaque mois ([R_{moy} (m, x, y)]), et les pluies estimées de chaque mois par le modèle de régression linéaire, en prenant en compte des coordonnées géographiques et l'altitude *([$P_{moy_estimée_modèle}$ (m, x, y, alt)])*.

Il s'agit du calcul pour chaque mois de chaque année entre 1965 et 2010 (janvier 1965 a décembre 2010) des écarts a la moyenne mensuelle, ce qui permet d'obtenir les précipitations annuelles en chaque point de grille du bassin versant. Une reconstitution finale des valeurs interannuelles de précipitations de chaque mois et chaque année de la période 1965-2010, est obtenue par :

$$P_{estimée}\,(m, a, x, y) = ([P_{moy_estimée_modèle}\,(m, x, alt) x Rmoy(m, x, y)])$$

m: mois ; a : années ; x : latitude ; y : longitude ; alt : altitude

Une validation croisée de type « leave-one-out » a permis une vérification des données estimées par rapport à celles observées.

- ✓ **Validation croisée des précipitations estimées**

Une pratique recommandée pour valider l'estimation et le choix des échantillons de voisinage pour l'interpolation, consiste à effectuer une validation croisée. Elle permet de comparer la qualité prédictive des modèles sur la base d'un critère d'erreur. Cette méthode, adoptée par l'ACMAD et le CILSS (1998), Philippon (2002) et Amoussou (2010), fut développée par Lachenbruch et Mickey (1968) dans le cadre de recherches sur l'estimation de l'erreur de modèles d'analyse discriminante. Elle permet par exemple d'évaluer la performance de modèles de prévision des précipitations saisonnières (Philippon, 2002). Le principe consiste à séparer la base initiale (l'ensemble des stations pluviométriques utilisées) en trente-quatre sous-ensembles.

La procédure consiste dans chaque échantillon à retirer successivement chacune des trente-quatre stations d'observation pour ensuite la prévoir (selon la méthodologie ci-dessus, c'est-à-dire régression linéaire multiple puis interpolation) à partir des autres données. Cette opération est donc répétée trente-quatre fois. Pour chaque station, on obtient ainsi une vraie valeur que l'on compare à une valeur estimée pour vérifier si le modèle fournit des estimations fiables.

Plus précisément, soit p_i^* l'estimation obtenue par interpolation au point *i* (en enlevant la valeur observée p_i) ainsi que la variance de l'interpolationδ_{ki}^2. Il peut se définir un résidu $r_i = pi - p_i^*$ et un résidu normalisé $n_i = \frac{ri}{\sigma_{ki}}$. Le résidu constitue l'erreur d'estimation.

2.3. Travaux de terrain

2.3.1. Echantillonnage

Pour la collecte des données socio-économiques, la cible visée est constituée des actifs agricoles dans le bassinversant. L'unité statistique est la portion de la commune concernée par le bassinversant. À cet effet, la taille de l'échantillon a été déterminée suivant la méthode de Schwartz (1995).

Calcul de la taille de l'échantillon : $\boldsymbol{X = (Z_{\propto})^2 \times p(1-p)/i^2}$;

Avec : X = la Taille de l'échantillon ;$\boldsymbol{Z}_{\propto}$= écart réduit correspondant à un taux de sondage 95 % ($\boldsymbol{Z}_{\propto}$=1,96) ; $\boldsymbol{p = n/N}$; avec p = proportion des actifs agricoles desdix-sept (17) localités retenues (n) par rapport au nombre total d'actifs agricoles dans le bassinversant à l'exutoire de Bétérou (N).

Ainsi :$\boldsymbol{p = \frac{n}{N} = \frac{64379}{289218} = 0,2225}$soit 22,26 % ;$\boldsymbol{i =}$ précision désirée égale à 5 % et $\boldsymbol{1 - p = 77,74}$ %, Donc $\boldsymbol{X = 1,96^2 * \frac{0,22(1-0,22)}{0,05^2} \approx 266}$ **personnes**

La taille de l'échantillon soumise à l'enquête est égale à 266 personnes. Ce nombre a été réparti de façon aléatoire dans les vingt-cinq (25) villages en fonction de la taille de la population par village et de sa position géographique dans le bassin versant.Le tableau II présente la répartition des localités parcourues par commune lors des investigations de terrain.

Deux critères sous-tendent le choix des communes et arrondissements. Il s'agit de :

- la position géographique de la commune/arrondissement dans le bassin versant ;
- la taille des actifs agricoles dans les communes/arrondissements.

Quant aux villages, leur choix est basé sur le niveau d'anthropisation.

Tableau IV: Répartition de l'échantillon par localités sélectionnées

Communes traversées par le bassin	Arrondissements traversés par le bassin	Nombre de Villages traversés par le bassin	Communes retenues dans le bassin	Arrondissements retenus dans le bassin	Villages retenus dans le bassin	Population agricole	Nombre de personnes enquêtées
Parakou	1er Arrondissement	3	Parakou	1er Arrondissement	Tourou	4642	19
N'Dali	N'Dali,	6	N'Dali	N'Dali	Woba Karou	4750	20
	Bori,			Bori	Bori	2401	10
	Ouénou,				Sonnoumon	3823	16
	Sirarou			Ouénou	Ouénou	3200	13
Bembèrèkè	Ina	6	Bembèrèkè	Ina	Ina	1976	8
					Gessou-Sud	2366	10
Sinendé	Fô-Bouré	2	Sinendé	Fô-Bouré	Fô-Bouré	510	2
				Fô-Bouko	Serou	585	2
Pehunco	Pehunco	1	-	-	-	-	-
Copargo	Pabégou	1	Copargo	Pabégou	Pabégou	2649	11
Djougou	Djougou, Bariénou, Béléfoungou, Kolokondé, Onklou, Patargo, Sérou	30	Djougou	Djougou	Batoulou	2096	9
				Béléfoungou	Djapingou	909	4
					Béléfoungou	2139	9
					Sosso	211	1
				Kolokondé	Kolokondé	4638	19
					Foumbea	1714	7
					Kpébouko	1676	7
				Onklou	Onklou	6178	26
					Bakou	2827	12
					Daringa	1782	7
				Patargo	Patargo	8442	35
					Dabagou	1496	6
Tchaourou	Bétérou Sanson		Tchaourou	Bétérou	Yebessi	777	3
				Sanson	Barérou	419	2
					Sanson	2182	9
Kouandé	Birni	1	-	-	-	-	-
09 Communes	**18 Arrondissements**	**62 Villages**	**07 Communes**	**12 Arrondissements**	**25 Villages**	**64388**	**266**

Source des données *: INSAE, 2012 et travaux de terrain 2013*

Le choix des personnes questionnées repose sur au moins sur l'un des critères suivants : (i) être âgé d'au moins quarante (40) ans, (ii) avoir vécu dans la localité tout au moins les vingt-cinq (25) dernières années avant l'enquête et (iii) être un acteur du développement agricole. Les autres personnes ressources (personnel des CeRPA, intellectuels communautaires, etc.) sont choisies en fonction de leur responsabilité dans le développement agricole du milieu ou de leur connaissance de la dynamique de l'occupation des terres.

2.3.2. Outils et techniques de collecte des données

Pour mener à bien ce travail, un certain nombre de matériels appropriés ont été utilisés.

Deux types de questionnaires et un guide d'entretien élaborés ont permis d'appréhender comment les activités anthropiques impactent sur la dynamique de l'occupation des terres.

A ces outils s'ajoutent :

- un GPS (Global Positioning System) de marque Garmin GPS Map 60CSX pour le relevé des coordonnées des unités vérifiées sur le terrain dans le cadre de la campagne « vérité terrain », en vue de la validation des cartes ;
- un appareil photographique numérique Sony Cyber-shot muni de GPS (10.2 Méga pixel) pour la prise des vues ;

Dans le cadre de cette recherche, la Méthode Accélérée de Recherche Participative (MARP) a permis de collecter les informations auprès des populations paysannes, du personnel d'encadrement, des intellectuels communautaires (personnes ayant une bonne connaissance des faits climatiques et qui en détiennent la mémoire à travers les canaux informationnels traditionnels), etc. A cette technique, s'ajoute le diagnostic rapide ou le Rapid Rural Appraisal (RRA). Il a consisté à effectuer des visites exploratoires dans les localités choisies où la collecte des informations est faite. Il est utilisé pour identifier les faits porteurs et les tendances lourdes en rapport avec les différentes activités agricoles. Il a également aidé à l'identification des personnes ressources impliquées dans le développement agricole dans le bassin versant.

En définitive, la collecte des données est fondée sur : l'observation minutieuse, l'entretien (direct ou indirect), l'interview et le focus-group (photo 1 et photo 2) pour l'acquisition des données et informations. L'ensemble des différentes données collectées ont été soumises à des traitements à l'aide d'outils appropriés.



Photo 1: Entretien individuel à Sonnoumon dans la Commune N'Dali
Prise de vue, Abdoulaye, avril 2012



Photo 2: Focus groupe à Patargo dans la Commune de Djougou
Prise de vue, Abdoulaye, avril 2012

Sur la photo 1, on observe un enquêté habillé en bleu répondant aux questions de l'enquêteur dans le village Sonnoumon. La photo 2 illustre un entretien en focus groupe constitués de 20 cultivateurs et de deux facilitateurs assis à côté de l'enquêteur à Patargo.

2.4. Méthodes de traitement des données

2.4.1. Outils de traitement des données

Des logiciels de traitement des images, du SIG et d'analyse statistique ont été utilisés. Il s'agit de :

- Logiciel ERDAS Imagine 2011 version 11.0.2, un logiciel de traitement numérique des images de Leica Geosystems Geospatial Imaging, ce logiciel est utilisé dans :
  - les corrections radiométriques et géométriques ;
  - l'assemblage des bandes ;
  - le mosaïquage ;
  - le découpage de notre zone d'étude ;
  - la classification supervisée des images satellitaires ;
  - l'évaluation de la classification.
- Logiciel ArcGISversion 10.1, un logiciel SIG de ESRI (Environmental Systems Research Institute), il est développé pour faciliter la gestion et l'analyse des données spatiales afin de répondre à une problématique donnée. Ce logiciel a été utilisé dans ce travail pour :
  - la création, l'habillage et l'édition des cartes ;
  - la détection de changement entre les différentes images satellitaires ;
  - l'analyse de quelques données statistiques.
- modèle SpaCelle version 5,un automate cellulaire spatial (2D) multicouches, qui fonctionne à base de règles de transition. C'est un logiciel de simulation numérique des unités d'occupation du sol. Ce logiciel nous a permis de faire des projections de la dynamique d'occupation des terres aux horizons 2020 et 2030 ;

- modèle SWAT est un modèle semi-distribué, déterministe à base principalement physique, développé et amélioré plusieurs fois par différents auteurs. Ce modèle est utilisé pour étudier le fonctionnement hydrologique du bassin versant ;

- Map Source pour le déchargement des informations du GPS ;

- IfanView pour l'extraction et l'importation des images des cartes réalisées pourleur insertion dans le texte

- Sphinx Plus4.5.0.19 pour le traitement des fiches d'enquêtes et l'analyse des données.

Des logiciels d'analyse statistiques, d'importation et de conversion des données :

- Le tableur Excel a été utilisé pour la représentation graphique des statistiques extraites desrésultats cartographiques, la conversion et l'importation ou l'exportation des données sous d'autres formats compatibles avec d'autres programmes informatiques tels que la conversion des données GPS en format .xlsx ;

- SPSS : ce logiciel a été utilisé dans le cadre d'analyse statistique des données ;

- R 2.14 pour la lecture des fichiers de données lourdes et des analyses statistiques

2.4.2. Traitement des images satellitaires

L'étude de la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant au cours du temps (1990-2010), a consisté initialement en une classification supervisée de chaque image satellite. Les classifications ont été suivies par une analyse de détection de changement pixel-par-pixel afin d'identifier et de corriger les trajectoires improbables. Une fois que ces images ont été classifiées et corrigées, la qualité du post-traitement a été évaluée afin de valider ou non les corrections faites. Les grandes lignes de cette démarche sont présentées comme suit (fig. 4.)

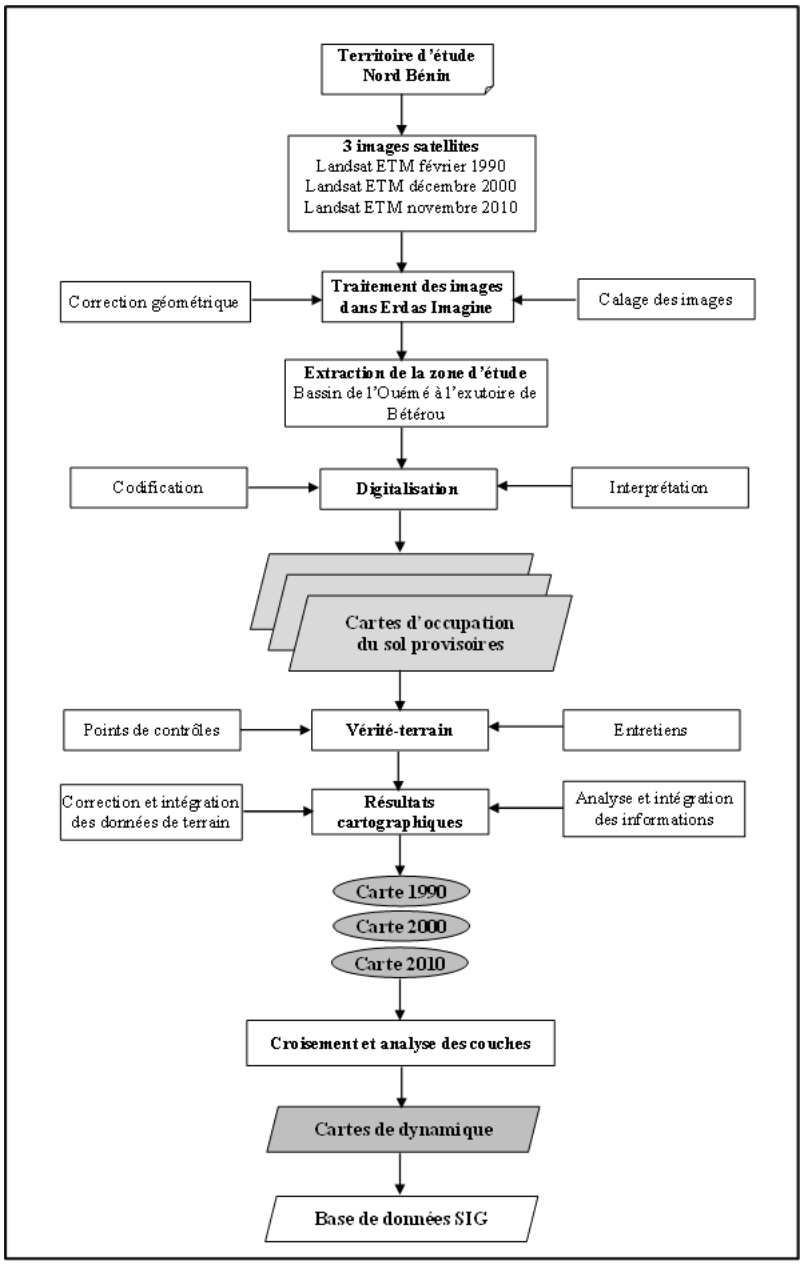


Figure 4: Méthodologie de la cartographie d'occupation des terres sous ArcGIS

2.4.3. Prétraitements

Les prétraitements sont des opérations effectuées sur les images, afin d'améliorer leur aspect radiométrique et géométrique pour en extraire des informations fiables.

2.4.3.1. Importation et combinaison des bandes

Les images satellitaires sont généralement fournies sous forme de bandes individuelles. Ces dernières doivent être importées puis combinées afin de constituer une image multi spectrale. Les images Landsat sont fournies au format Geotiff de l'USGS, avec ses sept

(7) bandes. Mais pour la classification de ces différentes images, elles sont enregistrées sous le format « img », fichier issu du logiciel Erdas Imagine.

2.4.3.2. Amélioration visuelle des images

Le rehaussement de l'image ou amélioration des contrastes a pour but d'améliorer l'apparence visuelle des images, ce qui en facilite l'analyse visuelle et l'interprétation.

La composition colorée consiste en la superposition des canaux afin d'avoir une image en couleur (fausse ou vraie couleur). On attribue les couleurs additives rouge, vert et bleu a trois canaux différents qu'on superpose : 5, 4, 3 pour Spot HRV et 1, 2, 3pour Landsat-TM. C'est ce qui permet d'obtenir une image en couleur. En effet, le capteur du satellite Landsat T M comprend sept (07) canaux tandis que celui du satellite Spot HRV en compte trois.

2.4.3.3. Corrections géométriques

La base de données étant constituée d'images provenant du satellite Landsat, des corrections géométriques ont été réalisées. Les corrections des images ont été obtenues avec une erreur quadratique moyenne de 0,05 pixel d'image Landsat. Cette valeur est inférieure au seuil de 0,2 pixel recommandée par Townshend *etal*. (1992) et Dai et Khorram (1998), comme étant le seuil idéal afin d'obtenir une erreur de moins de 10 % lors de la superposition des images pour l'analyse de la détection de changements.

Selon Mas (1999), si deux images différentes doivent être utilisées pour une analyse quantitative basée sur l'information radiométrique, comme dans le cas des analyses multi-date d'images pour la détection de changements d'états de surface, alors ces images devraient être ajustées pour compenser les divergences radiométriques. À cette fin, tous les canaux des images Landsat utilisées ont été convertis de leurs valeurs numériques initiales (de 0 à 255) en réflectance au-dessus de l'atmosphère 23 ("Top of Atmosphere - ToA - reflectance"), suivant Chander et Markham (2003) et Chander *etal.* (2009).

2.4.3.5. Extraction de la zone d'étude : création du masque

Les scènes des images étant lourdes (couvrant de vastes superficies 185 km x 185 km), il est nécessaire d'extraire une image couvrant uniquement la zone d'intérêt pour faciliter le processus de traitement à l'écran.

Il convient de rappeler que le fichier peut être enregistré sous n'importe quel format d'utilisation d'un autre logiciel. Dans le cadre de cette étude, les fichiers ont été enregistrés sous le format ".img" pour l'exporter dans ArcGIS 10.1 du bassin versant comme le montre la planche 2.

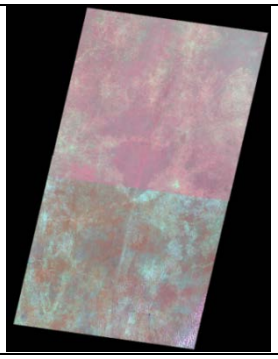
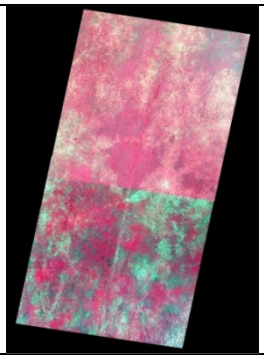
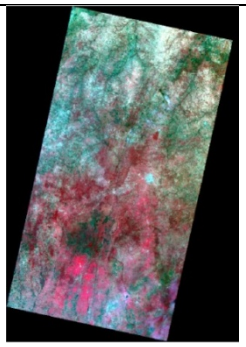
		

Image Landsat TM de février 1990 : scène du Nord-Bénin	Image LandsatETM+ de décembre 2000 : scène du Nord-Bénin	Image Landsat ETM+ de novembre 2010 : scène du Nord-Bénin

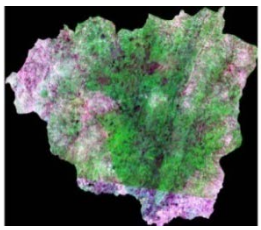
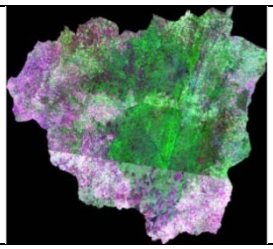
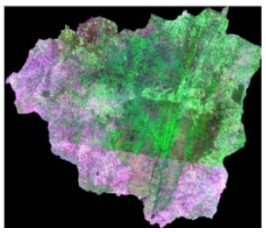

		

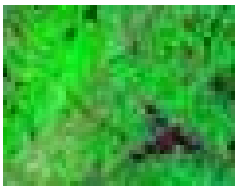
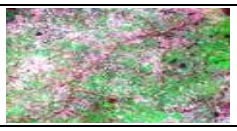
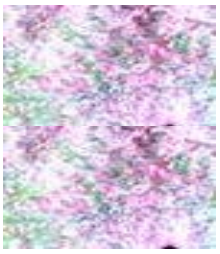
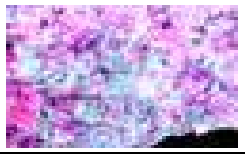
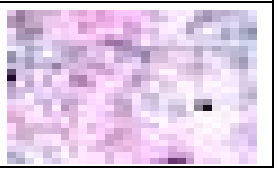
Image Landsat 1990 : TM du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou	Image Landsat ETM+ 2000 : bassin versant de l'Ouémé à Bétérou	Image Landsat ETM + 2010 dubassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Planche 2 : Secteur d'étude extrait des images satellitaires en infrarouge fausses couleurs ramenés en image vraies couleurs par la combinaison 4, 3, 2 dans Erdas Imagine

2.4.4. Classification d'images

La classification est limitée à la zone incluse dans le secteur d'étude pour chaque image. Pour chaque image, des zones d'entrainement ont été définies (à l'intérieur du masque) sur la base d'interprétation visuelle desimages et de données auxiliaires (obtenues principalement à partir des interviews de producteurs de la zone). La végétation a été divisée en trois (03) classes principales (tableau V) : les forêts, les savanes et les formations anthropiques.

Tableau V: Détails des classes de l'occupation des terres du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

Classes	Sous classes	Définition	Exemples : Image Landsat 2010
Forêts	Forêt dense sèche	Végétation très dense, peuplement continu d'arbres à caractèresempervirent de près de 10m (white, 1983)	
	Forêt claire et savaneboisée	Végétation composée principalement d'arbres, avec des sous-bois peu développés avec un recouvrement des cimes de 40% au plus (white, 1983). Les arbres sont souvent à feuilles caduques avec un indice de végétation faible en saison sèche. Noter la présence de brûlis	
Savane	Savane arborée et arbustive	Végétation relativement dense mais avec des arbres de taille inférieure à 10 m, sous-bois arbustif. Noter la présence de brûlis	
Formations anthropiques	Mosaïques de champs et de jachères	Surfaces cultivées, d'étendues variables situées à proximité des centres urbains ou le long des routes. Ces parcelles sont souvent à nu pendant la période sèche ; leur réflectance sera maximale Ancienne parcelle cultivée laissée à l'abandon avec un enfrichement progressif. Confusion possible avec la classe de savane arbustive. Noter la présence de brûlis	
	Plantations	Cette classe regroupe les parcelles d'anacardiers, reconnaissable à leur forme régulière, avec plantation d'arbres réguliers. S'ajoute les vergers, souvent de forme carrée.	
Agglomérations	Village-Route	Comprend les centres abrités, les routes asphaltées, et les pistes. Zone où la végétation naturelle a été éliminée sur de larges étendues (white, 1983)	

***Source** : Travaux de Abdoulaye (2013) adapté de Leroux (2012)*

Pourchaqueimageetchaquesous-classedevégétation,leszones d'entraînement ont été divisées en deux groupes (Heller *et al.*, 2012), en moyenne deux tiers des zones d'entraînement ont été utilisés pour classifier les images, tandis que le tiers restant des zones d'entrainement a été utilisé pour vérifier (ou évaluer) la qualité de la classification des images. Pour chaque sous-classe, les échantillons ont été sélectionnés de manière uniforme. Le nombre total de pixels échantillonnés (à l'intérieur du masque) varie de 540 à 423 pour les classes des forêts denses, de 423 à 215 pour les forêts claires, de 659 à 128

pour les classes savanes, de 245 à 845 pour les classes de mosaïques de champs et jachèreset de 47 à 198 pour la classe des agglomérations (tableau VI).

Tableau VI: Distribution du nombre total de pixels des zones d'entrainement par image et par sous-classe d'occupation

Sous-classes	**LandsatTM 1990**	**LandsatETM+ 2000**	**Landsat ETM 2010**
Forêt dense sèche	540	423	521
Forêt claire et savane boisée	423	215	351
Savane arborée et arbustive	659	128	351
Mosaïques de champs et de jachères	245	845	485
Agglomération	47	198	112

***Source** : Traitement des images Landsat*

Dans la première étape du traitement, la méthode de la classification par maximum de vraisemblance a été appliquée. Cette méthode supervisée est probablement la méthode multi-canale la plus largement connue et utilisée pour la classification d'images. Des échantillons de pixels pour lesquels les classes d'occupation sont connues, sont nécessaires pour déterminer la classe d'appartenance de pixels d'une image (Jayroe *et al.*, 1976). L'algorithme de la méthode du maximum de vraisemblance suppose que les valeurs des pixels suivent une distribution gaussienne (Caloz et Collet, 2001), mais cela ne se vérifie pas toujours dans la réalité. Pour cette classification par maximum de vraisemblance, aucun seuil de probabilité n'a été utilisé.

L'évaluation de la classification a été faite à l'aide de la matrice de confusion et de l'indice de Kappa (Pontius et Millones, 2008). La matrice de confusion donne une évaluation de la précision globale de la cartographie pour chacune des unités d'occupation des terres. L'indice Kappa évalue dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats de simulation et la situation réelle. Il s'étend de 0 à 1 et il se divise en cinq catégories (tableau V).

Tableau VII: Degré d'accord et valeur de Kappa

Accord	Indice Kappa
Accord très faible	0 – 0,20
Accord faible	0,21 – 0,40
Accord modéré	0,41 – 0,60
Accord substantiel	0,61 – 0,80
Accord presque parfait	0,81 – 1

***Source** : Pontius et Millones, 2008*

Plus la valeur de l'indice Kappa se rapproche de 1, plus les deux cartes comparées se ressemblent, tant du point de vue de la variété des unités d'occupation des terres que de leur disposition spatiale (regroupée, dispersée, etc.).L'indice Kappa (équation 1) est exprimé en termes de précision globale observée **(**équation 2) et de précision prévue (équation 3).

$$K = \frac{Pr(a) - Pr(b)}{1 - Pr(b)} \qquad (1)$$

$$Pr(a) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{Nc} x_{ii} \qquad (2)$$

$$Pr(b) = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{Nc} (x_{+i} * x_{i+}) \qquad (3)$$

Où :

K est l'indice de Kappa

Pr (a) est la précision globale observée

Pr (b) est la précision prévue

N_c est le nombre de lignes de la matrice de confusion

Nc est le nombre total d'observations

X_{ii} est le nombre d'observations dans la colonne i et la ligne (diagonale de la matrice)

X_{i+} et X_{+i} sont les totaux marginaux de la ligne i et la colonne i respectivement.

Latechniquede validation choisie utilise des données de vérité-terrain sélectionnées par une interprétation visuelle sur les trois images Landsat. Les pixels sélectionnés par interprétation visuelle ont été confirmés par les données auxiliaires disponibles. En outre,

pourcontrôlerlasélectiondepixelsdeszonesd’entraînementpourla classification et la validation de l'image, les zones « échantillons »ont été converties enfichierkml puis visualisées dans Google Earth©.

2.4.5. Détection de changements

La classification par maximum de vraisemblance, recèle des erreurs en raison de bruits induits par les similitudes des réponses spectrales de certaines catégories d'occupation des terres (Manandhar *et al.* 2009). La méthode du maximum de vraisemblance est basée sur l'utilisation de quelques échantillons qui pourraient ne pas être tout à fait représentatifs, bien que selon Hall *et al*. (1991), ces échantillons représentent les meilleures images qui peuvent être obtenues avec les données disponibles.

Afin de montrer l’évolution des unités d’occupation des terres au cours du temps, une série de transformations ensemblistes a été utilisée sous ArcGIS. La relation entre la même unité à deux dates différentes, permet d’extraire les zones stables, de régression et de progression de cette unité. On considère que T1 représente l’ensemble de pixels de la date 1 et que T2 est l’ensemble de pixels pour la date 2.

Après l’établissement des différents types de liaisons entre les trois dates, nous avons calculé les taux de changement entre les surfaces des unités d’occupation des terres entre les dates 1990 – 2000 (T1 – T2), les dates 2000 - 2010 (T2 – T3) et les dates 1990 -2010 (T1 – T3). Pour cela, l’équation proposée par la FAO en 1996 et dont l’utilisation est très courante dans les études sur le changement d’occupation des terres (Hoang*et al*.2008 ; Noyola-Medrano, 2006) est utilisée. Les valeurs positives représentent une progression de la surface de la classe pendant la période analysée et les valeurs négatives indiquent la perte de surface d’une classe entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro indiquent que la classe reste relativement stable entre les deux dates.

L'analyse de détection de changements des classes d’occupationa permis de détecter les trajectoires qui auraient été très peu probables d'observerdanslaréalité. Certaines de ces trajectoires estimées semblent incompatibles et vont à l'encontre des tendances observées dans la réalité. Par exemple, au sein de la zone d'étude, en raison de la forte

intensification de l'agriculture, il est rare de voir une transition des terres agricoles vers des unités de végétation naturelle. Par conséquent, afin d'harmoniser les résultats de la classification avec les tendances d'utilisation des terres observées sur le terrain, quelques règles simples de correction de trajectoire de pixel ont été définies :

- un pixel de végétation naturelle (forêt) peut évoluer vers des savanes ou des cultures, et il peut conserver son état d'origine ;

- un pixel de savane peut évoluer vers des cultures ou conserverson état d'origine; une évolution vers la végétation naturelle est peu probable ;

- un pixel de cultures ne peut que conserver son état d'origine.Une évolution vers la végétation naturelle est peu probable en raison de la pression sur les terres agricoles due à l'attrait croissant de rentes considérables réalisées sur les marchés par les cultures de maïs, d'igname et de coton.

2.4.6. Matrice de transition

La matrice de transition est une méthode qui permet de décrire de manière condensée, sous forme de matrice carrée, les changements d'état des éléments d'un système durant une période donnée. Cette matrice ne contient pas d'informations sur la distribution spatiale des changements ni sur leurs causes, mais tient uniquement compte des états des éléments aux temps initial et final (Schlaepfer, 2002).Ces matrices de transition permettent de caractériser la diminution ainsi que l'augmentation des unités de l'occupation des terres (Maréchal, 2012).

2.4.7. Méthode d'étude de la dynamique prospective des unités d'occupation des terres

Le but de cette partie est d'établir une cartographie de prospective spatiale, en termes de dynamiqueà partir d'un modèle de simulation adapté.

2.4.7.1. Choix d'un modèle de simulation de l'occupation des terres

Durant les dernières décennies, une variété de modèles ont été développés pour simuler les changements futurs des modes d'occupation et d'usage des sols. Il s'agit de CA_MARKOV sur IDRISI (Eastman, 2009), CLUE-S (Verburg *et al*., 2002, Verburg et Overmars *et al.*, 2009), DINAMICA (Soares-Filho *et al*., 2002), Land Change Modeler (disponible sur IDRISI et comme extension de ARC-GIS) (Eastman, 2009) et SpaCelle (Langlois, 2001)

Avec CA_MARKOV, DINAMICA et LCM, la quantité de changement est calculée à l'aide de chaînes de Markov, synthétisée sous forme d'une matrice de transition, généralement obtenue par la comparaison de cartes d'occupation et d'utilisation des sols à deux dates différentes. Avec CLUE-S et SpaCelle, l'utilisateur doit fournir les quantités (nombre de pixels) des catégories d'occupation des sols pour chaque année de simulation.

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 ou les cartes des futures occupations et utilisations des sols. Dans le premier cas, la carte des probabilités de changement est comparée avec la carte de la situation réelle. 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 ; 2) l'indice Kappa. DINAMICA calcule un indice de similarité floue (Hagen, 2003) qui permet de comparer les cartes d'occupation et d'utilisation des sols simulés et observés avec une certaine tolérance concernant la coïncidence spatiale. Dans CLUE-S et SpaCelle il n'existe pas d'outils d'évaluation propre. Mais, pour CLUE-S, l'évaluation de l'analyse de régression logistique est généralement basée sur une analyse ROC réalisée dans un autre logiciel, il en est de même pour SpaCelle avec une évaluation basée sur l'indice Kappa.

Les méthodes d'évaluation sont toutes orientées sur l'évaluation de la coïncidence spatiale entre les changements simulés et les changements observés.

Les programmes qui offrent plus de flexibilité pour développer des modèles personnalisés sont CA_Markov, DINAMICA et LCM. Les modèles peuvent être construits en tirant profit de la grande quantité d'outils et d'opérateurs disponibles dans ces programmes. En outre toutes les opérations peuvent être exécutées dans un environnement graphique, mais peuvent également être automatisées à l'aide de séquence de commandes et d'outils de programmation et les opérations préliminaires à la modélisation peuvent être faites dans le même environnement. Ceci peut être avantageux pour les nouveaux utilisateurs, car les procédures sont bien définies et documentées, mais devient un inconvénient quand l'utilisateur veut élaborer des modèles plus personnalisés.

En revanche, CLUE-S et SpaCelle ont une structure rigide qui définit un flux constant de procédures. Ce qui est avantageux pour les nouveaux utilisateurs, la programmation est facile, même pour les utilisateurs sans expérience de programmation, grâce à une interface graphique conviviale.

Tous les logiciels examinés sont gratuits sauf celui sur IDRISI dont le prix reste abordable (de 675 US$ pour une licence universitaire à 275 US$ pour une licence étudiante). Toutefois, IDRISI est un logiciel de SIG et de traitement d'image très complet. DINAMICA, IDRISI et SpaCelle sont mis à jour régulièrement alors que CLUE-S date de 2002.

Le tableau VIII synthétise les méthodes et outils disponibles pour chacun des modèles évalués.

Tableau VIII: Caractéristiques de quelques outils de modélisation

Outil de modélisation	Quantités de changements	Probabilité du changement	Relation variables d'influence/	Programmation informatique
CA_Markov	Chaînes de Markov	Carte d'aptitude	Evaluation multicritères	Oui
CLUE-S	Données externes	Carte d'aptitude	Régression logistique	Oui
DINAMICA	Chaînes de Markov	Probabilités de transition	Poids d'évidence	Oui
	Données externes	Poids d'évidence Algorithme génétique	Algorithme génétique	
LCM (Land Change Modeler)	Chaînes de Markov Données externes	Carte d'aptitude	Régression logistique Perceptron multicouche	Oui
SpaCelle	Données externes	Probabilités de transition	Règles de transition	Non

Source : Mas*et al*., 2011

Dans le cadre de cette recherche, le choix est porté sur le modèle SpaCelle. C'est un logiciel mis à disposition gracieusement par son auteur, Patrice Langlois, de l'Université de Rouen, disponible gratuitement sur internet http://www.spatial-modelling.info/Cellular-Automata-SPACELLE. C'est une version multi-couches qui intègre différentes couches de cellules maillées (carrés ou hexagones) et de couches vectorielles de lignes ou de points.

Les couches peuvent être créées directement dans la plate-forme ou importées depuis des couches de logiciels SIG (format GRID ASCII et format vectoriel « Shape »).

2.4.7.2. Justification du choix du modèle SpaCelle, avantages et limites

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :

- les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles. Donc, le modèle peut donc tourner sans soucis ;

- SpaCelle a été validée sur plusieurs régions dans le monde, et ses résultats sont fiables et similaires aux modèles complexes ;

– le modèle SpaCelle est utilisé au centre du Bénin, ce qui favorise sa validation dans notre bassin ;

– la connaissance préalable du modèle lors d'une initiation à son utilisation.

✓ **Avantage du modèle SpaCelle**

L'utilisation du modèle SpaCelle repose sur des principes discrets qui simplifient beaucoup la réalité. Il permet une modélisation de données qualitatives, fréquentes et évite une mise en équation complexe du problème ; comme la modélisation classique.

✓ **Limites**

Le modèle SpaCelle ne génère pas les objets mobiles, ni l'action à distance. Il faut alors utiliser des systèmes multi-agents, qui sont une généralisation des automates cellulaires.

2.4.7.3. Généralités sur le modèle SpaCelle

La plate-forme de modélisation SpaCelle permet de construire des automates cellulaires en définissant :

- une liste d'états ;
- des couches cellulaires différentes, de type maillé ;
- des couches de réseaux et points vectoriels ;
- des règles de vie et des règles de transition.

Ces quatre types d'éléments à définir conditionnent la précision, la représentativité et la complexité du territoire modélisé et constituent la base de connaissances du système modélisé. La liste d'états correspond à tous les états possibles que peuvent prendre les cellules des couches cellulaires en mode maillé et les états différents présents dans les couches vectorielles (réseaux de lignes). Cette liste doit donc s'accorder à des états existants et des états qui peuvent apparaître dans le futur.

Les différentes couches de type maillé représentent la structure spatiale discrétisée par les différents états à l'instant initial (t=0). Généralement, ce sont certains ou tous les états de ces couches maillées qui sont décrits dans les règles de vie et les règles de transition : les évolutions observables appartiennent à ces couches. Les couches de réseaux et de points

vectoriels présentent des objets linéaires ou ponctuels, dont les valeurs associées à leur position contribuent à la définition de l'état des cellules positionnées au même endroit, ou dans leur voisinage si cela est intégré dans une règle de transition. Ces règles de transition forment avec les règles de vie l'algorithme général du modèle, base des calculs qui permettent d'établir les simulations.

Les différents états sont codés par différentes valeurs numériques et la liste des états fait correspondre ces valeurs numériques aux intitulés et aux abréviations de description. On pourra avoir ainsi :

- Agglomération – Ag
- Champ et jachère – Chj
- Savane arborée et arbustive – Saa
- Etc.

❖ **Comportement cellulaire**

Le comportement de chaque cellule, c'est-à-dire son changement d'état ou non, est basé sur le principe de concurrence entre les règles (Longlois, 2001). Chaque règle prend une forme syntaxique du type : « $Etat_1$> $Etat_2$ = Expression ». Deux types de règles sont distingués, comme signalé plus haut : des règles de vie et des règles de transition. Les états sont ainsi décrits selon leur « force de vie ». Cette force décrit la propension pour un état à durer dans le temps, à partir de sa « naissance » pour une cellule donnée (avec la valeur 1) jusqu'à sa mort « naturelle » ou « intrinsèque » (avec la valeur 0). Il y a plusieurs types de forces de vie (codées par des abréviations, indiquées ici entre parenthèses) :

- durée infinie (DI). A priori, quand l'état apparaît, il ne peut plus disparaître ;
- durée fixée (DF). L'état a une vie, pour la cellule concernée, qui reste jusqu'à un instant qui correspond à cette durée fixée ;
- durée aléatoire (DA) selon une espérance de vie et un écart-type. Dans ce cas, l'état de la cellule a une force de vie dont la durée est établie par tirage au sort

dans une plage de valeurs (qui décrit un écart-type pour une série statistique à tirage aléatoire).

Par exemple, la règle de vie de l'état « agglomération » peut prendre la forme suivante : Ag > Ag = DA(40 ; 20) qui signifie : l'état «agglomération » (Ag) a une force de vie qui devient nulle après une durée de vie aléatoire (DA) caractérisée par une espérance de vie de 40 ans et un écart-type de 20 ans. Si aucune règle de transition ne produit une valeur supérieure à la règle de vie de l'agglomération, état qui est attribué à une cellule, alors cet état perdure entre 20 à 40 ans, selon le tirage aléatoire effectué. Evidemment, à chaque pas de temps, des valeurs issues de règles de transition peuvent faire transiter la cellule vers un autre état si elles sont supérieures à la valeur calculée par la règle de vie.

Les règles de transition indiquent la propension pour une cellule à passer d'un état à un autre selon une force de changement, issue des conditions au voisinage de la cellule concernée. Cette force de changement, d'une valeur entre 0 et 1, est comparée à la force de vie de la cellule (qui est donc d'une valeur entre 1 et 0) à l'instant t. Si cette force a une valeur plus élevée, alors la cellule change d'état, pour prendre celui définit dans la règle de transition (« d'un état vers un autre »). Il se peut que plusieurs règles de transition soient en concurrence parce qu'elles décrivent le changement potentiel d'un état donné vers différents autres états. Dans ce cas, c'est la règle qui produit la valeur la plus élevée qui remporte la procédure. À valeur égale, un tirage au sort est effectué pour retenir la règle de transition qui prend le dessus.

Les règles de transition emploient donc des fonctions de conditions spatiales qui permettent de calculer des valeurs de force de changement, à partir de conditions liées aux types d'états présents dans le voisinage, leur combinaison (co-présence nécessaire – établie par le signe « * » – ou présence d'au moins un état nécessaire, avec le signe « + »), leur position dans le voisinage (position définie par inclusion dans une zone de voisinage ou valeur de pondération selon la distance).

Une règle de transition est écrite par exemple ainsi :

Saa > ChJ =PV (ChJ +Ag;2;0,7;1)*EV (rte;4) et se traduit en langage courant par : « la savane arborée et arbustive devient champ et jachère lorsque le voisinage proche à 200 m (valeur 2, considérant qu'une maille vaut 100 m) est composé à plus de 70 % (0,7) de

champ et jachère (ChJ) ou d'agglomération (Ag), qu'il existe une route principale (rte) dans un rayon de 400 m (valeur 4).

❖ Pas de temps et la résolution spatiale

Dans SpaCelle, les calculs établissent d'éventuels changements d'état à chaque pas de temps. La définition du pas de temps est conditionnée par la base de connaissance retenue : la liste des états et leurs changements potentiels au travers des règles de transition indiquent que ces changements sont connus et peuvent se réaliser selon une vitesse connue. Il s'agit donc, à partir de la liste des états retenus comme importants à figurer dans le modèle, de définir quel est le pas de temps le plus fin nécessaire à la bonne prise en compte des changements pour l'état qui change le plus vite. De manière générale, la connaissance des territoires permet de retenir un pas de temps d'une année. Mais on pourrait, si un phénomène saisonnier semble très important, caler le pas de temps sur la durée des saisons (1 pas de temps équivalent à 3 ou 4 mois par exemple).

Le pas de temps permet d'évaluer les vitesses de propagation, de changement, etc. La portée spatiale d'un phénomène dans un pas de temps peut être alors définie.

L'influence d'agglomération sur la déforestation d'une zone voisine peut être évaluée dans le temps par l'analyse diachronique sur des données existantes. On peut estimer alors quelle surface est consommée en moyenne en combien de temps, selon telle ou telle condition. La surface minimale concernée par un changement possible pour le pas de temps retenu peut ainsi être évaluée. On affecte alors cette valeur de surface à la résolution de la couche cellulaire : une cellule représente une unité de surface minimale pour observer les changements.

Les modèles développés dans différentes plateformes de modélisation par automate cellulaire, concernant des simulations d'évolution territoriales, possèdent des résolutions variant généralement de 500 m² à 1 km² (Lagabrielle, 2003). Ces résolutions dépendent évidemment de la précision des sources cartographiques en rapport aux phénomènes étudiés. Dans le cas de changements d'occupation des terres, la résolution d'un hectare est fréquemment retenue.

Dans cette étude, le modèle est établi pour simuler l'évolution de l'occupation des terres sur une période de 20 ans (de 2010 à 2030).

❖ **Couches cellulaires : définition des états**

Le modèle de simulation appliqué au bassin de l'Ouémé à Bétérou est caractérisé par des choix de représentation des états selon les différentes couches cellulaires.Une résolution de cellule de 100 m de côté, soit1'hectare, est fixée, ce qui permet d'intégrer sans changement les règles devie et de transition définies dans le modèlede base de Oloukoï (2011) au centre du Bénin.

Par ailleurs, la liste des états est elle-même fixée et permet de produire les différentes couches cellulaires nécessaires au modèle :

- une couche cellulaire maillée d'occupation des terres, avec 8 états de surfaces ;
- une couche vectorielle de réseaux routiers, avec 2 états ;

❖ **Couche d'occupation des terres**

Cette couche est essentielle pour la restitution des résultats. Les différents types d'occupation des terres qui peuvent être reconnus sur le territoire de la Martinique sont figurés dans cette liste (fig. 5).

Couleur	Intitulé	Code
	Forêt dense semi-décidue	Fdsd
	Galerie forestière	GF
	Forêt claire et savane boisée	FcSb
	Savane arborée et arbustive	Saa
	Plantation	Plan
	Champ et jachère	ChJ
	Agglomération	Ag
	Plan d'eau	Pe

Figure 5: Liste des états d'occupation des terres sur le territoire de la Martinique

La disponibilité des images satellitaires Landsat pour les années 1990, 2000 et 2010 permet de produire les cartes d'occupation des terres selon ces types. Le modèle propose

des états fixes pour les agglomérations et les plans d'eau. Ces états sont stables dans le temps, les cellules affectées par ces états ne changent pas durant toute la durée simulée.

D'autres types d'occupation des terres sont des types potentiellement croissants. Ce sont les types anthropiques : agglomération, champ et jachère, plantation. Ils gagnent potentiellement de l'espace sur le troisième et dernier groupe de types d'occupation des terres (forêts et plan d'eau)

- **Couche du réseau routier**

LelogicielSpaCellepermetd'intégrer, grâce à son mode multi-couches,des états établis par des objets linéaires. Ainsi, un tronçon routier qui se superpose à des cellules d'un hectare renseigne ces cellules d'un état associé à cette route. Une route importante est considérée comme favorable à l'installation de la population, de champs ou de plantation, en relation à l'accessibilité. Une zone d'habitat (agglomération) est également considérée comme favorisée pour son implantation quand un réseau routier préexistant assure immédiatement sa bonne desserte. Ainsi, l'effet de la présence de la route peut être intégré dans le modèle SpaCelle en introduisant le tracé de celle-ci sous la forme de linéaires.

- **Règles de transition**

Comme signalé dans l'étape d'analyse des changements d'occupation des terres entre 1990 et 2010, les règles de transition sont normalement conçues pour intégrer les « préférences » de changement, observées dans la matrice de transition, considérant que les changements survenus dans une période passée proche, relèvent des mêmes logiques que ceux qui adviennent ensuite, dans le proche futur, toute chose égale par ailleurs, selon les hypothèses fondamentales d'un modèle de simulation.

En annexe1 sont présentées les 8 règles utilisées dans le modèle appliqué sur le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Ces règles sont décrites dans le langage de SpaCelle et traduites dans le langage courant (Crotet, 2007).

Les règles de transition indiquent quels types d'états sont susceptibles de céder la place à d'autres états à chaque pas de temps, selon les conditions qu'elles incluent. Cela définit le « moteur » de l'automate cellulaire : des états sont consommés tandis que d'autres sont

consommateurs. D'autres états enfin restent fixes durant la simulation, et sont ainsi des contraintes pour les deux groupes précédents.

La littérature portant sur la modélisation par automate cellulaire pour les changements d'occupation des terres, distingue trois types d'état (Lajoie *et al.*, 2007). Ces types sont désignés ainsi :

- vacants : les états qui connaissent un changement comme résultat des autres dynamiques d'occupationdes terres ;
- functions : les classes d'occupationdes terres qui sont modélisées comme actives ;
- features : les classes d'occupation des terres qui ne sont pas supposées changer durant la simulation.

La figure suivante (fig. 6) présente les transitions possibles entre les différentes unités d'occupation des terres dans le secteur d'étude. Les relations entre les unités d'occupation des terres sont représentées par des flèches d'épaisseur proportionnelle au nombre de règles de transition associées.

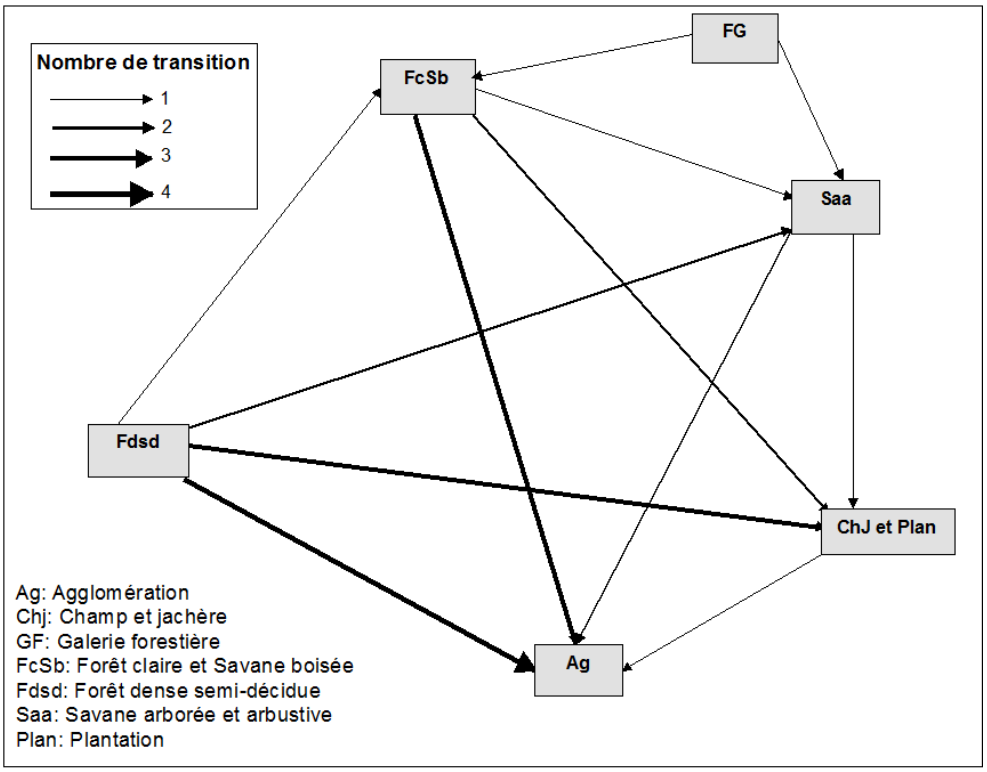


Figure 6: Relation entre états d'occupation des terres définis par les 8 règles de transition sous SpaCelle

La figure 5 indique la distinction entre les états d'espaces consommables (vacants), à savoir les espaces naturels, généralement considérés comme des espaces à exploiter, les états consommateurs d'espace (functions), qui sont les types d'espaces qui traduisent une artificialisation des espaces naturels pour répondre au besoin de la population en termes d'aménagement. La modélisation ne prend pas en compte les états fixes (features). Pour ces derniers états, on peut considérer que les surfaces en eau sont a priori relativement stables.

2.4.7.4. Modèle de base et sa validation

- **Modèle de base**

Les différentes couches d'information géographique traitées pour fournir les couches d'état du modèle dans SpaCelle sont mises en format texte « Ascii ». Les couches de surfaces (occupationdes terres) sont des couches de type raster, et fournissent des fichiers « Ascii » contenant autant de lignes que les couches raster en ont, et autant d'espaces entre les valeurs des états qu'il ya de colonnes dans ces couches raster. Le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou s'étend sur 117,30 km du nord au sud et sur 142,26 km de l'est àl'ouest. Les couches de cellules dans SpaCelle ont une étendue de 1892 lignes et 2339 colonnes pour une maille de 60 mx 60 m. L'automate cellulaire intègre ainsi 2809904 cellules.

Avec les couches d'états (occupation des terres et route) et la base des règles comportant six (06) règles de durées de vie et 8 règles de transition (fig. 7), le modèle peut alors être utilisé pour calculer les changements pour chaque pas de temps et pour la durée de la simulation choisie.

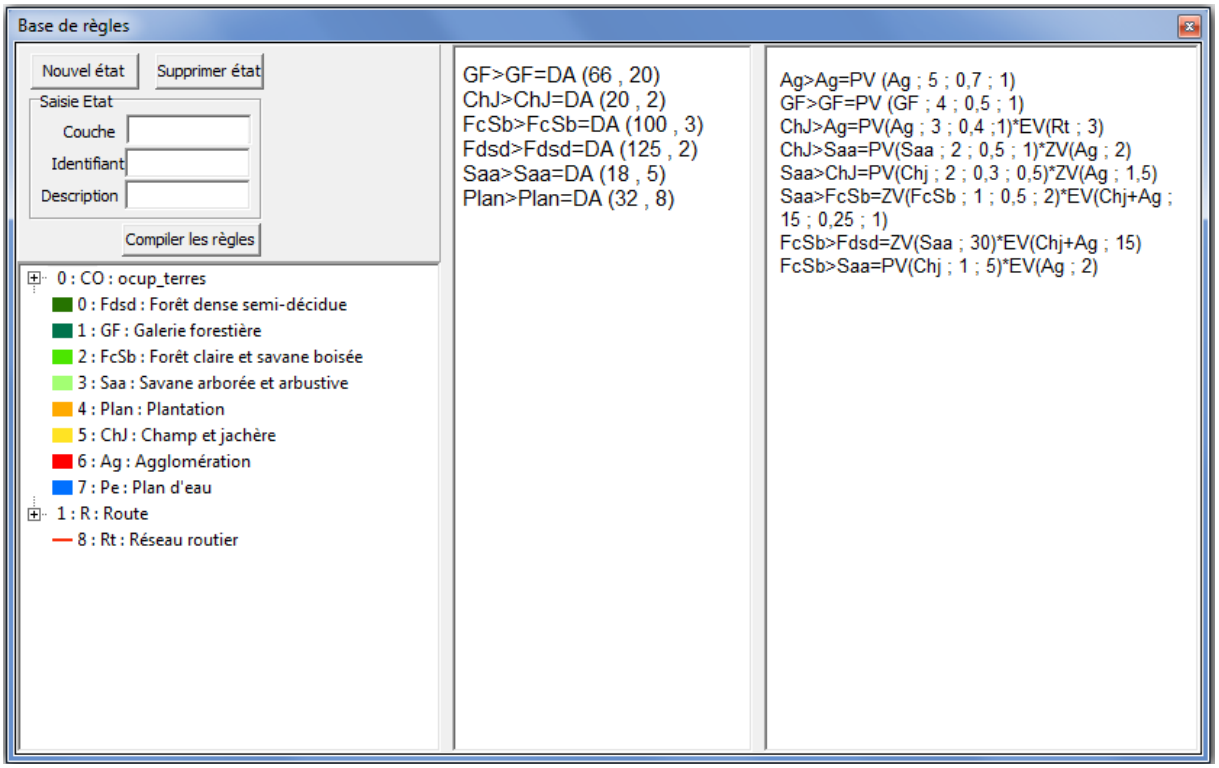


Figure 7: Base de règles de SpaCelle pour le modèle du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

D'un point de vue générique, l'application de ce modèle en 2013 constitue la phase de calibration de ces règles. Il s'agit donc de valider ce modèle pour son application en 2013 dans le bassin, afin de pouvoir ensuite lancer une simulation sur 20 années (périodes 2010-2020 et 2020-2030) et faire des scénarii différenciés d'évolution.

❖ Validation du modèle de base

La méthode la plus répandue pour engager une phase de validation d'un modèle de simulation numérique est de lancer une simulation sur une période dont on possède des données, des mesures pour les états initiaux et terminaux (Roger et Guy, 2000). Ainsi, pour une validation simple, le modèle de base est utilisé avec les données du secteur d'étude pour 2000 à la date initiale et une simulation sur 13 années permet d'obtenir un état pour 2013 à comparer avec la situation connue à cette date (vérité terrain). Les résultats cartographiés permettent de comparer les similitudes ou différences entre le simulé et l'observé et d'évaluer la capacité de reproductiond umodèle.

Pour ce faire, les méthodes conventionnelles d'évaluation de la précision thématique d'une carte sont employées. Il s'agit de la matrice de confusion et de l'indice de Kappa (Pontius et Millones, 2008).

2.4.7.5. Scénarios de la dynamique d'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

Les scénarii développés dans cette étude reposent sur des hypothèses de stabilité environnementale et de tendance vers la catastrophe.

- **Hypothèse du scénario de « stabilité environnementale »**

Les hypothèses de ce scénario ne prennent en compte aucune contrainte de gestion des forêts et des zones humides établies dans les documents d'Etude Prospective du secteur Forestier en Afrique (FOSA-Bénin, 2001). Ce scénario part des hypothèses suivantes :

- l'agriculture est mécanisée et les techniques d'intensification agricole sont adoptées par les producteurs ;
- la situation économique des populations s'est améliorée et le taux de croissance économique au niveau national est de 12,4 % (FOSA-Bénin, 2001) ;
- le taux de disparition de la forêt est réduit de 100 000 ha /an à 50 000 ha/an et aussi le taux de la dynamique de l'occupation des terres est réduit de moitié par rapport au taux obtenu entre 1986 et 2006 ;
- la part du bois dans la satisfaction des besoins en énergie domestique des populations est réduite de 50 % au profit d'autres sources d'énergie telles que le gaz domestique.

- **Hypothèse du scénario « tendance vers la catastrophe »**

Le but du scénario "tendance vers la catastrophe" est de donner un aperçu de l'évolution de l'occupation des terres dans le bassin versant de Bétérou si rien ne change en termes de rythme des activités anthropiques.

Dans ce scénario de "tendance vers la catastrophe", la dynamique prospective de l'occupation des terres est basée sur des considérations socio-économiques, c'est-à-dire la

dynamique de la population et les activités anthropiques. Ce scénario repose sur trois (03) hypothèses de base (Oloukoi, 2011) :

- le caractère extensif de la production agricole fait appel à l'utilisation de méthodes nocives à l'environnement (culture sur brûlis, déboisements incontrôlés, réduction de la durée des jachères, monoculture prédominante sur l'assolement en général, etc.) et dégrade sans cesse les écosystèmes en général et les sols en particulier (MECCAGPDPE-PNUD, 2000) ;
- la population est dépendante des ressources naturelles qui constituent la principale source d'énergie ;
- le taux de la dynamique de l'occupation des terres est demeuré le même que celui de la période allant de 1986 à 2006 (Oloukoi, 2011).

Le scénario de "tendance vers la catastrophe" vise à se faire une meilleure idée de ce que pourrait être la situation future afin que cela suscite une prise de conscience de l'ensemble des acteurs de développement durable.

2.4.8. Méthode de traitement de données NDVI MODIS

Une chaîne (fig. 8) de traitement des images a été mise en place sous le logiciel ArcGIS 10.1 au préalable de l'extraction des données NDVI.

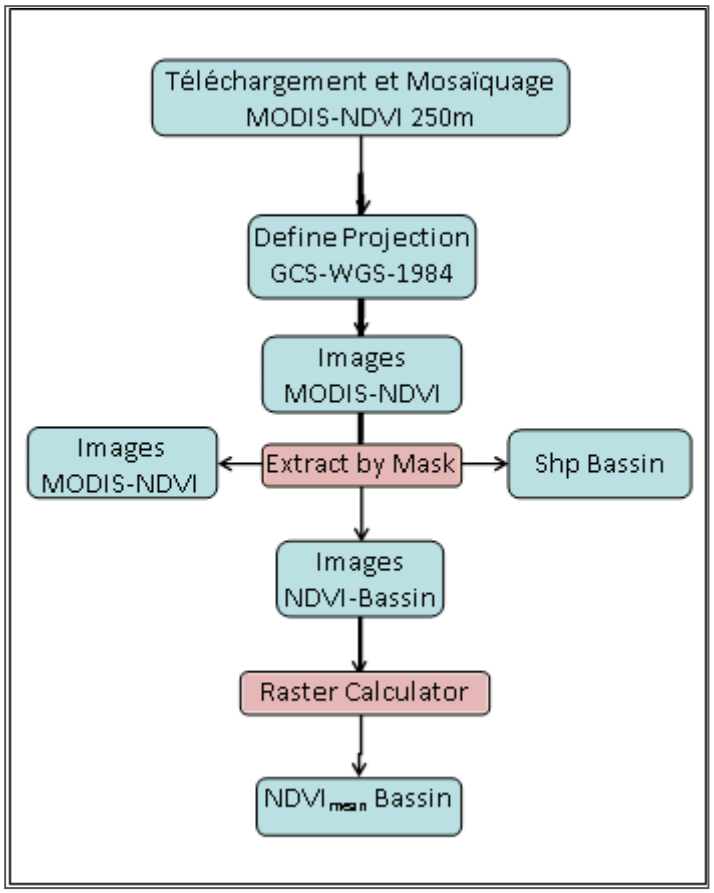


Figure 8: Organigramme méthodologique de calcul du NDVI mensuel

Source : Abdoulaye, 2013

Les principales étapes se présentent comme suit :

- téléchargement des images MODIS-NDVI ;
- changement de projection : transformation de la projection originale sinusoïdale en projection Transverse Mercator WGS_1984_UTM_Zone_31N pour que les images MODIS soient superposables aux autres données cartographiques ;
- découpage (extract by Mask) de l'image initiale sur une zone centrée sur le site d'étude (fig. 9) ;
- calcul de la valeur moyenne mensuelle des pixels au niveau des six images.

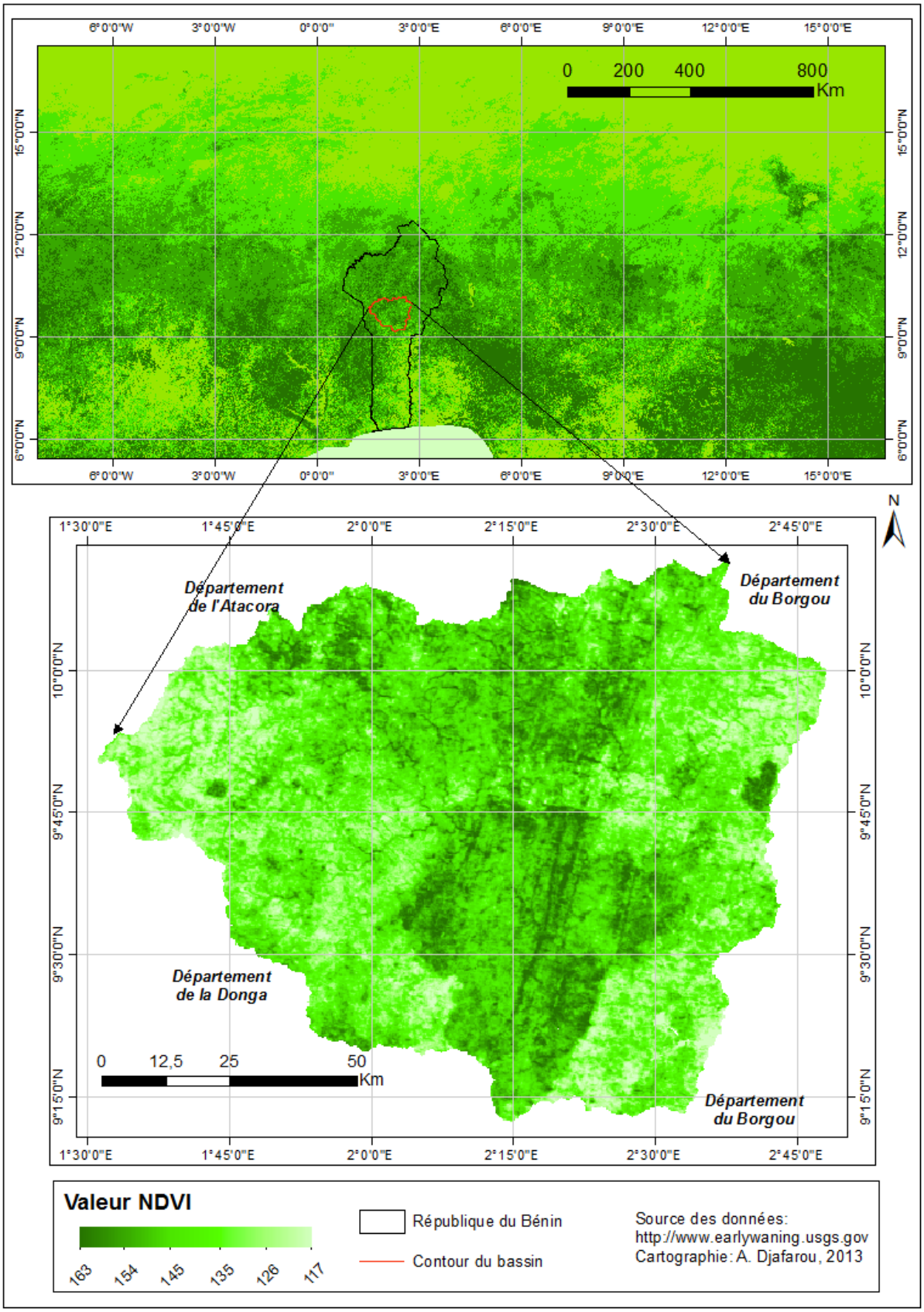


Figure 9: Extraction de NDVI du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

2.4.9. Détermination de l’écoulement des types d’occupation des terres

La détermination de l’écoulement des types d’occupation des terres du bassin de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou, s’est faite par extraction de données de la carte des écoulements. La figure (fig. 10) illustre le processus d’extraction des écoulements mensuels.

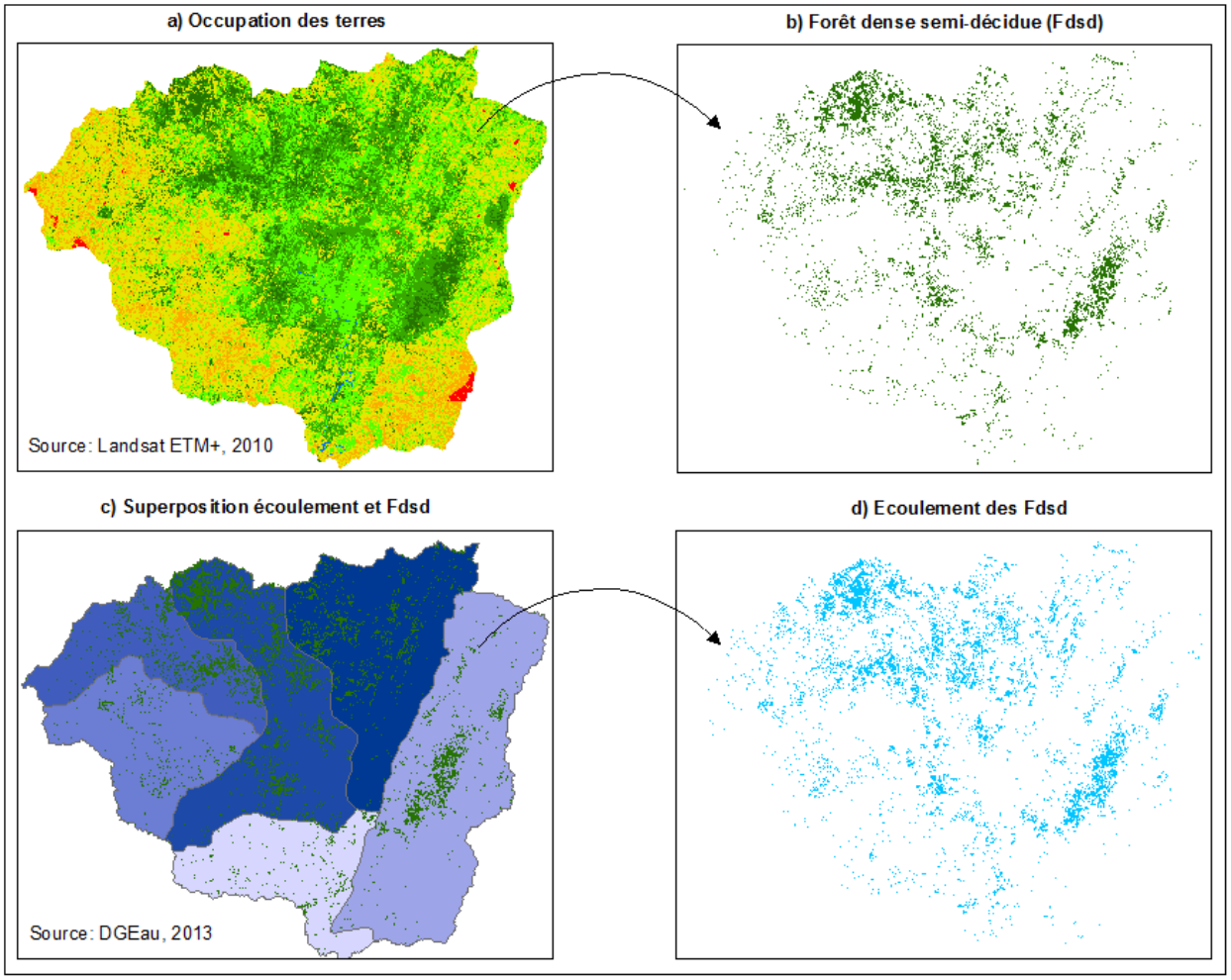


Figure 10: Technique d'extraction de l'écoulement mensuel des types de formations végétales

Les étapes d’extraction de l’écoulement mensuel sont les suivantes :

- extraction ou sélection d’une unité de formation végétale dans la carte de l’occupation des terres;
- superposition de carte des écoulements mensuels et celle de l’occupation des terres;

- extraction des écoulements de chaque unité de formation végétale à l'aide de l'outil « Geoprocessing > intersect » de ArcGis;

- calcul de l'écoulement moyen mensuel de chaque unité des formations végétales.

2.4.10. Traitement des données hydropluviométriques

Les données hydropluviométriques ont été traitées par plusieurs protocoles statistiques.Les tests statistiques sont effectués grâce au logiciel Khronostat 1.01, mis au point par l'UMR Hydrosciences de Montpellier. Ce logiciel regroupe des tests de vérification du caractère aléatoire de l'échantillon (test d'auto corrélation et test de corrélation sur le rang) et de détection de rupture. Ainsi, le test de Buishand et l'ellipse de Bois, la méthode non paramétrique de Pettitt, l'approche bayésienne de Lee et Heghinian et la méthode de Hubert (Lubès *et al*., 1994) sont utilisés pour la détection de ruptures climatique et hydrologique dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou.

❖ **Recherche de ruptures de stationnarité**

Les tests univariés d'homogénéité des séries temporelles ou de détection de rupture en moyenne ont été mis en œuvre dans le programme ICCARE et ont déjà été décrits dans d'autres travaux (Aka *et al*., 1997).

Cette évaluation a pour objectif de mettre en évidence la péjoration hydropluviométrique intervenue dans le bassin au cours des années 1970. Le choix des périodes est issu des résultats de l'application des tests de Pettitt complétés par ceux de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian. Cette évaluation a ici pour objectif de mettre en évidence la péjoration hydropluviométrique intervenue dans le bassin au cours des années 1970. Le choix des périodes sera issu des résultats de l'application des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les différentes séries. La détection de tendances et de ruptures dans les séries pluviométrique et hydrométrique a été appréhendée par plusieurs méthodes.

- **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 ; Aka *et al*., 1996 ; Paturel *et al*., 1997 ; Lubès *et al*., 1994 ; Servat *et al*., 1998 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoin Bardin, 2004) et dans le contexte béninois par Houndénou (1999), Vissin (2007), Yabi (2008), Totin (2010) ; Ardoin-Bardin (2004) et Ogouwalé (2006). L'absence de rupture dans la série (Xi) 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 :

$$x_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \ldots \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_I & \text{avec } i = 1, 2, 3, \ldots N \end{cases}$$

Les εi 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; 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 (Kendall & Stuart, 1943) qui repose sur le concept de contraste (Dagnélie, 1970). 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.
Aussi, appliqués à chaque site de mesure et variable par variable, ces tests donnent des résultats généralement concordants du moins au niveau de la reconnaissance d'une hétérogénéité dans la série, même si les estimations des ruptures en moyenne données par plusieurs tests diffèrent parfois de quelques années.
Dans le cas où le test de Pettitt ne présente pas rigoureusement une année de rupture, celle fixée à la position du point de rupture par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian est retenue. Les années de rupture ont été utilisées pour caractériser la variation hydroclimatique marquée soit par une séquence humide, soit par une séquence sèche.
Les points de rupture ont été utilisés comme année pivot pour calculer les variations moyennes de la pluviométrie ou de l'écoulement grâce à l'indice de déficit hydrique (IdH). Il a servi surtout à caractériser les variations moyennes de part et d'autre de la rupture pour les variables climatiques dont la série présente une rupture (Ouédraogo, 2001 ; Ardoin-Badin, 2004 ; Totin, 2005 ; Vissin, 2007). L'IdH est estimé en pourcentage à partir de la formule :

$$\text{IdH (\%)} = 100.\ \frac{\overline{x_2}}{\overline{x_1}} - 1$$

Avec $\overline{x_2}$ et $\overline{x_1}$ respectivement moyenne des périodes avant et après la rupture. L'indice ainsi calculé montre selon qu'il est négatif ou positif, une séquence hydroclimatique humide ou sèche antérieure au point de rupture et renseigne sur la tendance post-rupture.

- **Anomalies centrées réduites**

A partir de l'écart type, ont été calculées les anomalies centrées réduites pluviométriques et hydrométriques mensuelles et interannuelles, en standardisant les données. L'utilisation de valeurs normalisées permet de cibler les années humides ou excédentaires

et les années sèches ou déficitaires de la série étudiée. Les anomalies sur chaque station et sur les différents bassins se calculent par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Z} = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Où : Z = anomalie centrée réduite pour l'année i

X = la valeur de la variable

μ = la moyenne de la série

σ = l'écart type de la série

Toutefois, les paramètres de dispersion ne suffisent pas à eux seuls à mesurer la variabilité car ils ne décrivent pas l'évolution temporelle des séries pluviométriques et hydrométriques. Il convient donc de les compléter par d'autres tests. La détection des tendances et de rupture de stationnarité dans les séries hydropluviométrique et hydrométrique a été appréhendée par plusieurs méthodes.

- **Coefficient de corrélation linéaire**

Il est utilisé pour mesurer le degré de liaison ou de dépendance linéaire qui existe entre les lames précipitées et les lames écoulées sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Il permet d'obtenir le coefficient de détermination ($R = r^2$).

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

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

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

- **Calcul du Coefficient de Variation**

Exprimé en pourcentage, le coefficient de variation permet d'apprécier le degré de variabilité de la pluviosité et de l'hydrométrie journalière, mensuelle et annuelle. C'est le rapport de l'écart type à la moyenne qui se détermine comme suit (équation 4):

$$cv = \frac{\sigma(x)}{\bar{X}} \times 100 \quad (6)$$

Les tendances pluviométrique ethydrométrique ont été étudiées au moyen de la méthode graphique. Cette méthode consiste en une représentation des valeurs d'indices

pluviométriques en fonction du temps (année sur la série considérée). Elle permet de déceler la tendance considérant la totalité N des observations.

- **Bilan climatique : un indicateur de la disponibilité de l'eau dans le bassin**

Il traduit la succession saisonnière d'excédents et de déficits en eau. Ainsi, le climat devient sec quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle et qu'il n'y a pas de réserve d'eau disponible (Vissin, 2007). Le bilan climatique traduit ainsi, le rythme des excédents ou des déficits en eau. Il exprime la différence entre la somme des abats pluviométriques et celle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et constitue, lorsqu'il est positif, le surplus disponible pour la recharge en eau du sol et pour l'écoulement (Sutcliffe et Piper, 1986 cité par Vissin, 2001). Il a également permis de mettre en évidence l'évolution du climat à travers les apports pluvieux et les pertes par évaporation et s'exprime par la formule suivante :

$$\mathbf{Bc = P - ETP}$$

Avec : Bc : bilan climatique en mm, P : pluie totale annuelle en mm, ETP : évapotranspiration réelle en mm. L'ETP est définie comme la demande climatique en vapeur d'eau.

Si Bc > 0, alors le bilan est excédentaire ; si Bc < 0, alors le bilan est déficitaire ; si Bc = 0, alors le bilan est équilibré.

Le bilan climatique a souvent été utilisé, notamment dans une étude régionale des ressources hydroélectriques en Afrique de l'Ouest (Tomson, 1985 ; Olivry, 1993 ; Le Barbé *et al*., 1993) ou encore dans une étude du bilan hydrologique au Guinée, au Togo-Bénin (Sucliffe et Piper, 1986) et au Bénin (Vissin, 2007). Il a été calculé à partir des valeurs moyennes de P et ETP de l'ensemble du bassin entre 1965 et 2010.

- **Etude du bilan hydrologique**

Cette étude est indispensable pour estimer les ressources en eau du bassin, évaluer l'impact des fluctuations pluviométriques sur les autres termes du bilan et mettre aussi en évidence la relation existant entre la sécheresse pluviométrique observée depuis 1970 et la sécheresse hydrologique de ces trois dernières décennies. L'équation du bilan

hydrologique (Le Barbé *et al.*, 1993) au cours d'une période peut s'écrire de la façon suivante :

$$\mathbf{P = E + L + I + (S1 - S0)}$$

Avec : P = pluie, en mm ; E = évaporation, en mm ; L = écoulement, en mm ; I = recharge (infiltration), en mm ; S1 - S0 = variation du stock d'eau présent dans le bassin, en mm.

Des cinq termes de cette équation, deux (I et S1 - S0) sont difficilement quantifiables par des mesures directes. Pour diminuer le nombre d'inconnues, il a été choisi la période de façon à ce que la variation (S1 - S0) puisse être supposée négligeable.

La méthode d'estimation utilisée représente le solde du bilan hydrologique, mais avec une certaine imprécision des autres termes du bilan et, par conséquent, une imprécision de l'infiltration estimée. Du fait de ces incertitudes, l'infiltration n'est pas assimilée directement à la recharge de la nappe.

Cette dernière est le flux de percolation d'eau qui parvient à la nappe et qui représente ainsi un apport additionnel à sa réserve (Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010). Ainsi, l'analyse du paramètre infiltration peut permettre de suivre l'évolution de la recharge de la nappe dans le bassin-versant du complexe. Elle s'écrit :

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

Avec *I* : infiltration en mm ; *P* : pluie en mm ; *L* : écoulement en mm ; *E* : évaporation en mm.

- **Estimation de l'évaporation réelle (ETR)**

La méthode retenue, qui est essentiellement développée par le Service de la Météorologie Nationale (SMN) du Bénin. L'ETR s'obtient par la formule :

$$\mathbf{ETR = \alpha\ ETP}$$

Le coefficient α qui traduit la disponibilité en eau dans les premiers horizons du sol est toujours inférieur ou égal à 1. Il faut, pour l'exprimer de façon rigoureuse, connaître à la fois le stock d'eau présent dans le sol et les résistances opposées par le système sol/végétation à l'évaporation. Pour sa détermination, il a été adopté la même hypothèse que Sutcliffe et PIPER, (1985), à savoir :

- Si Pi > ETPi, α = 1 où Pi = pluie mensuelle en mm ;

- Si Pi < ETPi, α = Pi/ETPi où ETPi = évapotranspiration potentielle mensuelle en mm.

La méthode utilisée est très approximative lorsqu'elle s'applique à l'échelle mensuelle. Toutefois, à l'échelle annuelle, il y a compensation entre les erreurs de début et de fin de saisons des pluies, qui résultent respectivement d'une surestimation (quand se reconstituent les réserves en eau du sol que la végétation reprend) et d'une sous-estimation (à cause du prélèvement opéré dans les réserves d'eau dans le sol) de l'ETR. L'essentiel des paramètres étant défini, le calcul du bilan hydrologique devient l'étape suivante pour la compréhension du fonctionnement hydropluviométrique du bassin.

- **Estimation de la lame d'eau écoulée**

La lame écoulée annuelle s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{Le} = \frac{V_{ec}}{S}.10^{-3}$$

Avec Vec = Q.t, est déterminée, avec Q : débit du bassin (m3/s), S : superficie du bassin ; t : le temps (s).

- **Coefficient d'écoulement**

Le coefficient d'écoulement traduit la capacité de ruissellement du bassin. Il correspond au rapport entre la lame ruisselée (Q) et la lame précipitée (P) et permet aussi de mettre en évidence le fonctionnement hydrologique du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Il est étroitement lié à des variations climatiques et traduit la relation entre les pluies et les écoulements (Mahé et Olivry, 1995). Il permet aussi d'analyser le rôle joué par le substratum géologique du bassin considéré. Le coefficient d'écoulement (C) a été calculé grâce à la formule :

$$\mathbf{C} = \frac{Q}{P}*100$$

Avec Q l'écoulement et P la pluie. Le coefficient d'écoulement évolue suivant les variations climatiques et souligne les différences de comportement entre les pluies et les écoulements.

- **Etude du tarissement par la Loi de Maillet**

L'observation de l'évolution d'une décrue à partir d'un certain stade de l'hydrogramme annuel, montre la décroissance régulière des débits naturels (ou phase de tarissement). C'est la période pendant laquelle la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau d'un bassin. Cette vidange est décrite par la loi de Maillet :

$$Q_i = Q_o e^{-\alpha(t_i - t_o)}$$

Avec Q_i et Q_0 débits aux instants t_i et t_0 exprimés en jours, et a coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère, dont la valeur est l'inverse du temps :

$$\alpha = \frac{1}{T}$$

Dans le cas le plus complexe, celui où il y a recharge des nappes, on n'observe pas une courbe continue de tarissement, même virtuelle, mais des tronçons assez courts. La détermination de *Qo,* consiste à repérer une phase du débit que nous appellerons *charnière* qui puisse servir de départ au tarissement. Ce point se trouve sur la courbe de récession et il ne doit pas être éloigné de la période des hautes eaux de façon que l'on puisse, par corrélation serrée, confronter le débit aux pluies de la période correspondante.
Cette méthode, déjà utilisée par plusieurs auteurs dont Le Barbé *et al.* (1993) et El-Ouafi (1993)a permis de déterminer sur le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou l'évolution temporelle des coefficients de tarissement et d'apprécier le mode d'écoulement et la durée de tarissement des cours d'eau. En effet, le coefficient de tarissement est spécifique à chaque cours d'eau, dépendant étroitement des caractéristiques de la matrice poreuse (granulométrie), de la présence de failles ou de macropores, de la morphologie des versants, de l'épaisseur des profils abritant les aquifères.
Roche (1963 et Castany (1998) introduisent un troisième type d'écoulement, appelé écoulement hypodermique, qui correspond à un écoulement de sub-surface légèrement différé par rapport au ruissellement superficiel.

- **Identification de la variabilité spatio-temporelle**

L'Analyse en Composante Principale (ACP) fait partie des analyses descriptives multivariées. Le but de cette analyse est de résumer le maximum d'informations possibles en perdant le moins possible pour :

- faciliter l'interprétation d'un grand nombre de données initiales ;
- donner plus de sens aux données réduites.

L'ACP permet donc de réduire des tableaux de grandes tailles en un petit nombre de variables (2 ou 3 généralement) tout en conservant un maximum d'informations (Lefebvre, 1983 ; Houndénou, 1999). Les variables de départ sont dites « métriques ». L'idée de l'ACP est de déterminer un nouveau repère associé de manière naturelle à la structure du nuage considéré, de façon à pouvoir l'y examiner plus commodément.

Pour s'affranchir des effets d'échelle dus à l'hétérogénéité éventuelle des variables, ces dernières sont en général normalisées, c'est à dire que chaque colonne est divisée par son écart-type; toutes sont dès lors exprimées dans la même échelle standard.

L'ACP est utilisé dans ce travail pouridentifier les modes de variabilité spatio-temporelle. La première composante (premier axe factoriel) est celle qui permet de voir au mieux des individus-caractères (années-stations) sur le plan de projection où une proportion importante de la variance totale est expliquée. Cette première combinaison linéaire exprime plus de variance que la seconde, elle-même plus que la troisième. Il s'agit de repérer les principaux modes de variabilité pluviométrique dans leur configuration spatio-temporelle. Cette ACP a été utilisée à l’aide du logiciel XL-STAT.

Toutes ces techniques statistiques retenues ont permis d'étudier la variabilité spatio-temporelle des pluies sur le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou, tel qu'elle est présentée dans la partie résultats et analyses.

2.4.11. Traitement des données socio-économiques

2.4.11.1. Taux de réponse par cause de dégradation du couvert végétal

Le taux de réponse par type d'utilisation est exprimé par : $F = 100\frac{S}{N}$avec F : taux de réponse donnée pour le type d'utilisation ; S : nombre de personnes ayant une même réponse pour l'utilisation concernée ; N : nombre total de personnes interviewées.

2.4.11.2. Relation entre les causes de dégradation et les différents groupes socioprofessionnels

Afin d'étudier les relations qui existent entre les causes de dégradation du couvert végétal (Agriculture, Carbonisation, croissance démographique, élevage et exploitation forestier) et les groupes socioculturels, une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) a été réalisée. Pour ce faire, les sujets enquêtés ont été regroupés suivant les principaux groupes socioculturels et selon les activités socioprofessionnelles. Ainsi, au total, trois (03) modalités prenant en compte la combinaison entre le groupe socioculturel et la principale activité, ont été considérées. Pour faciliter l'analyse, les noms des diverses variables ont été codés comme l'indique le tableau IX. L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) a été réalisée à l'aide du logiciel R sous le package Facto Miner.

Tableau IX: Code des groupes socioculturel utilisés pour l'AFC

Code utilisé pour AFC	Principaux groupes socioculturels
BarAgr	Bariba agriculteurs
PeuEle	Peulh éleveurs
YooAgr	YoomAgriculteurs

Source : traitement de données, 2013

2.4.12. Description de SWAT et justification de son choix

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ou outil d'évaluation des terres et des eaux (Arnold *et al.*, 1999) est un modèle hydrologique physique, semi-distribué à interface SIG (Arc View et Arc GIS) qui dérive les sous-bassins et le réseau de drainage d'un bassin versant à partir des Modèles Numériques de Terrain (MNT).Il calcule les bilans hydriques journaliers à partir des données météorologiques, pédologiques et

d’occupation des terres. Ce modèle a été développé par le Service de Recherches Agricoles du Département de l’Agriculture des Etats-Unis (Arnold *et al*., 1999) et déjà testé en Afrique tropicale et particulièrement au Bénin par Sintondji (2005) ; Ahouansou(2008); Kounou(2009) ; Dossou-yovo (2011).

Ce modèle a été développé pour prévoir l’impact des pratiques de gestion des terres sur l’eau, les sédiments et les transports chimiques agricoles dans de grands bassins versants complexes présentant différents types de sols et différentes occupations des terres, et ce sur de longues périodes. De ce fait, le modèle est à base physique. Aussi, est-il continu dans le temps et capable de simuler les effets des changements d’utilisation des terres sur de longues périodes (Sintondji, 2005).

Contrairement aux modèles conceptuels globaux, SWAT est un modèle hydrologique distribué et peut permettre d’évaluer les effets combinés des fluctuations climatiques, de la succession des types de végétation et des modifications des pratiques agricoles sur les ressources en eau (Abbott et Refsgaard, 1996). Au regard de ces différentes potentialités dont dispose ce modèle, il a été utilisé dans le cadre de cette thèse pour évaluer les impacts futurs des variabilités climatiques et de la dynamique du couvert végétal de par les modifications des pratiques agricoles sur les ressources en eau du bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou. Cet aspect seul a été pris en compte ici, étant donné que l’étude de la dynamique qualitative des eaux superficielles comme souterraines dans le bassina été effectuée sur site et aux laboratoires.

2.4.12.1. Principes

- **Hydrologie**

Comme tout modèle hydrologique, SWAT reproduit le cycle de l’eau sur le bassin versant de manière simplifiée. On peut schématiser le fonctionnement du modèle par quatre principaux modules qui communiquent entre eux par la circulation d’eau (fig. 11).

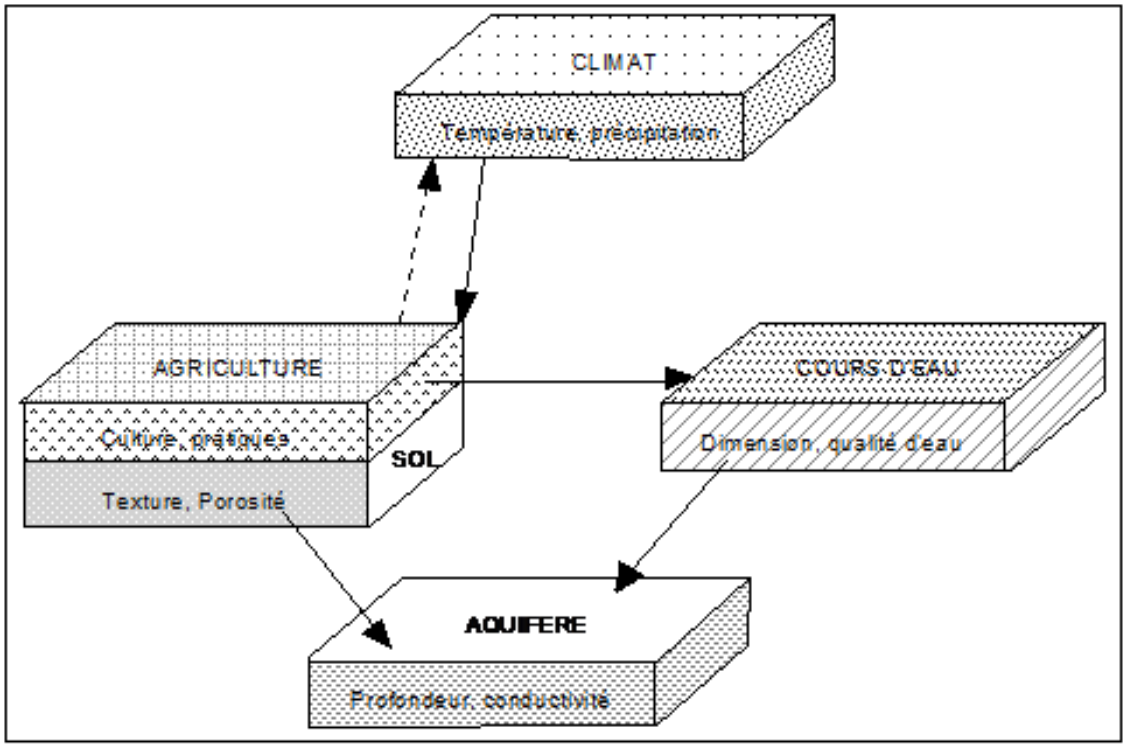


Figure 11: Fonctionnement schématique de SWAT

***Source** : Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT* (Renaud, 2004)

L'évaluation de la disponibilité actuelle en eau est faite à travers l'estimation des composantes du cycle hydrologique à l'échelle du bassin versant à savoir : les précipitations et l'interception, le ruissellement de surface, l'infiltration de l'eau dans le sol et dans la zone racinaire, l'évapotranspiration et l'écoulement souterrain et la recharge des nappes.

L'équation du bilan (équation 5), pour un intervalle de temps, s'écrit comme suit :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^{t}(R_i - Q_i - ET_i - P_i - Q_{ri}) \quad \textbf{(8)}$$

Où : SW_t : contenu final en eau du sol (mm)

SW_0 : contenu initial en eau du sol au jour i (mm)

t : temps (jours)

Ri : précipitation au jour i (mm)

Qi : ruissellement de surface au jour i (mm)

Et_i : évapotranspiration réelle au jour i (mm)

Pi : percolation au jour i (mm)

Q_{ri} : contribution de l'aquifère libre à l'écoulement à l'exutoire au jour i (mm).

❖ Paramétrage des données et mise en application de SWAT

Le paramétrage de SWAT se compose des données de topographie, de pédologie, d'occupation du sol, de distribution des HRUs (Unités de Réponse Hydrologique), d'intégration des données climatiques et pratiques culturales, de simulation et de calibration du modèle.

❖ Topographie

Les données topographiques du milieu d'étude ont été introduites dans le modèle SWAT à partir des Modèles Numériques de Terrain (MNT), outils de base du processus de modélisation par SWAT. Les MNT d'une résolution de 30 m ont été élaborés par le SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA. Ceci implique donc que chaque maille de 30 mètres de côté est caractérisée par une altitude moyenne. Son système de projection géographique est l'UTM (Universal Transverse Mercator).Cet outil a abouti sur l'extraction du réseau hydrographique tout en procédant d'abord à l'évaluation des pentes, à la détermination des directions d'écoulement et au calcul des surfaces drainées. La dérivation des exutoires potentiels et donc des sous-bassinsversants est sujette au choix du seuil de drainage dont dépend également la taille desdits sous-bassinsversants.

❖ Occupation des terres

L'occupation du sol, un paramètre clé intervenant dans le cycle hydrologique, nécessite d'être évaluée avec précision. Pour atteindre les objectifs de la modélisation, des cartes d'occupation et d'utilisation du sol sont nécessaires.

La carte de l'occupation des terres a été extraite d'images satellites LANDSAT TM+ de 2003. Des corrections ont été faites grâce aux points de calage des cartes topographiques au 1/200000 scannées et géoréférencées. Le système de projection utilisé est l'UTM. Le logicielARCGIS 10.1 version 3.3 a été utilisé pour la cartographie.

Des données sur les paramètres physiques de la composition floristique et des principales cultures de la zone d'étude telles que le LAI (indice de surface foliaire),la biomasse,le potentiel d'unité de chaleur des plantes (PHU), etc., ont été obtenues auprès du Laboratoire d'Hydraulique et de la Maîtrise de l'Eau de la FSA (LHME/FSA), de la banque de données de la FAO et complétées par la base de données du modèle.

- **Distribution des HRU (Unités de Réponse Hydrologique)**

Une fois que les couches de sol et d'occupation des terresont été importées, la distribution des HRU sur le bassinversant doit être déterminée. La commande de distribution des HRU de SWAT permet à l'utilisateur de spécifier certains critères pour la distribution. Une ou plusieurs combinaisons sol/culture peuvent être créées sur le bassinversant. L'utilisateur peut assigner une seule HRU à chaque sous bassin versant selon la classe de sol et de culture dominante ou assigner plusieurs HRU. C'est cette dernière méthode qui a été choisie.

- **Intégration des données climatiques**

Les données climatiques utilisées pour la simulation sur le bassin versant ont été importées après la distribution des HRUs. Une fenêtre spéciale permet l'intégration de l'ensemble des données climatiques. Cette interface a permis de charger la localisation des stations météorologiques les plus proches et les plus significatives pour l'étude du bassinversant. Dans un second temps, les données journalières des différents paramètres climatiques ont été indiquées. Dans le cas où certaines valeurs des paramètres ont fait défaut, SWAT effectue une simulation de celles-ci à partir desdonnées mensuelles de référence de la station grâce à son générateur de climat.

Au total, douze (12) stations de mesure sont concernées, dont onze (11) stations de mesure pluviométrique (Bembèrèkè, Bassila, Birni, Bétérou, Djougou, Ina, Kouandé,Okpara, Partago, Tchaourou et Pénéssoulou) et une (01) station synoptique, en l'occurrence celle de Parakou (X).

Les débits du fleuve Ouémé à Bétérou (l'exutoire) ont été obtenus auprès du service d'hydrologie de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) du Ministère des Mines de

l'Energie et de l'Eau (MMEE).En dehors des données de précipitation, de vitesse du vent, d'humidité relative et d'éclairement solaire qui ont été introduites dans le modèle sur la base de moyennes journalière et mensuelle, celles de la température ont été intégrées sous forme de maximale et minimale journalières et mensuelles. La période calendaire de ces diverses données est présentée dans le tableau X.

Tableau X : Stations climatiques utilisées

Station	Longitude (°décimal)	Latitude (°décimal)
Bassila	1.667	9.017
Bembèrèkè	2.662	10.223
Bétérou	2.267	9.190
Birni	1.517	9.983
Djougou	1.662	9.692
Ina	2.727	9.969
Kouandé	1.683	10.333
Okpara	2.733	9.467
Parakou	2.612	9.357
Partago	1.900	9.533
Pénéssoulou	1.550	9.233
Tchaourou	2.600	8.867

***Source** : DMN, DG-Eau, LHME, 2006*

- **Intégration des pratiques agricoles**

Une fois les données climatiques introduites, le modèle a procédé à la construction des différentes tables contenant les informations nécessaires à la création des données d'entrée par défaut utilisées par SWAT (dont celle des pratiques agricoles).

En cas de modification de la distribution des HRU, la commande d'élaboration des tables doit à nouveau être lancée. Parmi les tables créées lors de cette opération, la table « mgt » (management) concernant les pratiques agricoles a pu être modifiée et les informations obtenues par entretiens et observations ont pu être intégrées.

2.4.12.2. Simulation et calibration du modèle

- **Simulation**

Une fois les données intégrées, le modèle est prêt pour la simulation. Plusieurs options s'offrent alors à l'utilisateur. Le choix concernant ces options se fait par le biais d'une boîte de dialogue.

La première opération à définir est la période pendant laquelle la simulation sera effectuée. Le dernier choix important laissé à l'utilisateur est le pas de temps de sortie. Les simulations au pas de temps journalier ont été sorties afin de pouvoir comparer de manière correcte, simulations et observations.

❖ Calage du modèle

Pour permettre une meilleure concordance entre les variables simulées et observées, il est nécessaire d'adapter certains paramètres du modèle. Cette phase s'appelle le calage. Elle consiste, dans un premier temps à ajuster le bilan hydrique qui contrôle l'ensemble des processus hydrologiques sur le bassinversant. Signalons que la période de calage utilisée dans le cas de cette étude estde 1999 à 2004 et celle devalidation est de 2005 à 2007.

Trois indices permettent d'apprécier la corrélation entre les valeurs de débit simulées et celles observées. Il s'agit du coefficient de détermination ($\boldsymbol{R^2}$), l'efficience du modèle (***ME***) de Nash et Sutcliffe (1970) et l'indice d'accord (***IA***) de Willmott (1981).

La valeur de R^2 (équation 6) représente le carré du coefficient de corrélation de Pearson et décrit la proportion de la variance totale observée qui peut être expliquée par le modèle. Elle est comprise entre 0 et 1 avec des valeurs élevées indiquant un ajustement ou une acceptation meilleure.

$$\boldsymbol{R^2} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \bar{O}\right)\left(P_i - \bar{P}\right)}{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \bar{O}\right)^2\right]^{0.5}\left[\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \bar{P}\right)^2\right]^{0.5}} \right\}^2 \quad \textbf{(9)}$$

où : Oi représente les valeurs observées, Pi les valeurs simulées, $\bar{O}$les valeurs moyennes observées,$\bar{P}$les valeurs moyennes simulées, et Nle nombre de valeurs comparées.

L'efficience du modèle ME, selon Nash et Sutcliffe, indique comment le tracé des valeurs observées versus valeurs simulées s'ajuste bien à la droite. Cet indice offre une évaluation plus précise de l'efficacité quant au respect des volumes écoulés et des écarts absolus. L'estimation de l'efficience est communément utilisée dans l'évaluation des modèles hydrologiques et est calculée de la manière suivante (équation 71):

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \bar{O}\right)^2} \qquad (\mathbf{10})$$

Si la variable mesurée est simulée par le modèle avec la meilleure précision, alors ***ME*** = 1 ; si le coefficient est négatif, la qualité des résultats du modèle est plus faible que la valeur moyenne des variables mesurées. ***ME*** est donc comprise entre∞ et 1.

Pour l'évaluation de la performance du modèle du point de vue de la reproduction temporelle des débits (concordance des débits dans le temps), l'indice d'Agrément est utilisé. L'Indice d'Agrément, (*IA*) selon Willmott (1981), est calculé de la manière suivante (équation 8):

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\left|P_i - \bar{O}\right| + \left|O_i - \bar{O}\right|\right)^2} \qquad (11)$$

IA varie de 0 à 1 avec des valeurs élevées indiquant un meilleur ajustement des valeurs observées et simulées. Il représente une amélioration nette sur le coefficient de détermination, mais il est aussi sensible aux valeurs extrêmes (Legateset Mc Cabe, 1999).

- **Ajustement du bilan hydrologique**

Deux critères sont pris en compte pour calibrer les flux d'eau : le niveau de corrélation entre les débits mesurés et les débits observés à l'exutoire puis la concordance concernant la répartition des volumes d'eau écoulés entre écoulement de surface et écoulement

souterrain. Pour estimer ces contributions respectives sur le bassinversant, le programme de séparation de l'écoulement total en ruissellement et écoulement souterrain appelé « *Baseflow* »mis au point par Arnold et *al*. (1999) a été utilisé. Une fois les contributions respectives estimées, le calage se déroule en deux étapes. La première étape consiste à ajuster le ruissellement de surface jusqu'à ce qu'il soit en adéquation avec la valeur estimée par le programme *Base flow*. Cet ajustement se joue au niveau de plusieurs paramètres. Le premier et le plus important est le "curvenumber" (méthode des courbes de ruissellement).Il est également possible de jouer sur les valeurs de la capacité de rétention en eau des sols. La diminution de ce paramètre entraîne logiquement une augmentation du ruissellement de surface. Un autre facteur qui peut également être modifié, est le coefficient de compensation de l'évaporation (ESCO). Ce facteur modifie la quantité d'eau qui peut être évapotranspirée.

Lorsque le ruissellement est acceptable, la contribution de l'écoulement souterrain doit alors être ajustée. La table «gw» (ground water) contient tous les paramètres concernant la circulation de l'eau dans l'aquifère. Afin d'obtenir une bonne corrélation entre les débits, la plupart des paramètres doivent être légèrement retouchés.

Le paramètre GWQMN (seuil de profondeur d'eau requis pour recharger la nappe) déclenche la recharge effective de la nappe lorsque ce seuil d'eau est accumulé dans l'aquifère. Le coefficient de transfert de l'eau de l'aquifère vers les horizons sus-jacents (GW_revap) joue également un rôle important. Il détermine la quantité d'eau pouvant migrer de l'aquifère vers la zone racinaire et être disponible pour la plante. Ainsi plus le coefficient sera fort, plus l'eau pourra se déplacer de l'aquifère peu profond vers une zone plus superficielle où elle sera utilisable par la plante. Ces volumes ne se retrouveront donc pas à l'exutoire.

Un autre paramètre de grande importance est le *Baseflow alpha factor*. Cet indice correspond à un facteur de rapidité de recharge du cours d'eau par l'aquifère profond. Il permet d'ajuster les temps de réponse du bassinversant, de limiter les décalages temporels et de contrôler les récessions pendant les décrues.

Une fois le processus hydrologique calé, lesprévisions des pertes de terre ont une grande sensibilité vis-à-vis des paramètres de l'équation universelle modifiée des pertes de sol (MUSLE), notamment les caractéristiques texturales et le facteur d'érodibilité du sol. Les données mesurées de pertes en terre n'étant pas disponibles sur une période de temps minimale (au moins quelques années), elles n'ont pas été calées.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des données collectées et les méthodes d'analyses statistiques utilisées pour cette recherche.

La caractérisation des dynamiques de l'occupation des terres par télédétection avec des images à moyenne résolution spatiale est rendue difficile sur le bassin versant de Bétérou par en raison de : la forte hétérogénéité de structure et de fonctionnement de la végétation à l'échelle du site d'étude ; les différents pas de temps auxquels peuvent s'observer les changements sur la dynamique des formations végétales.

Les séries temporelles NDVI-MODIS présentent un certain nombre de caractéristiques qui laissent penser qu'elles présentent un bon potentiel pour répondre aux objectifs fixés : une base de données de MODIS-NDVIa été constituée et renseignée sur la période 1982-2010 pour l'étude de l'impact de la dynamique des terres sur l'écoulement. Une autre base de données météorologique et hydrométrique à différentes échelles sur la période 1965-2010 permettant de caractériser le bassinversant et d'étudier l'effet de la végétation sur le maintien des ressources en eau dans le bassinversant.

Le modèle SpaCelle est utilisé pour simuler la dynamique prospective de l'occupation des terres dans le bassin. Quant au modèle SWAT,il a été utilisé dans le cadre de cette recherche pour évaluer les impacts futurs des variabilités climatiques et de la dynamique de l'occupation des terrespar les modifications des pratiques agricoles sur les ressources en eau du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

CHAPITRE III : FONDEMENTS BIOPHYSIQUES DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES

Le présent chapitre expose de manière synthétique le contexte biophysique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Après une description des aspects physiques, une attention particulière est consacrée aux caractéristiques socio-économiques du bassin versant.

3.1. Caractéristiques biogéographiques

3.1.1. Caractéristiquesgéographiques

Le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, espace de cette étude, est situé au nord du Benin. Ce bassin versant couvre une superficie de 100 76 Km^2, un périmètre de 528 m et un coefficient de Gravelius de 1,5 ; ce qui permet de dire que le bassin est de forme allongée. Il est situé entre 9° 10' et 10° 00' de latitude nord et 1° 30' et 2° 48' de longitude est. Le régime du fleuve Ouémé et des rivières qui l'alimentent, varient en fonction de la répartition spatio-temporelle des précipitations (fig. 12).

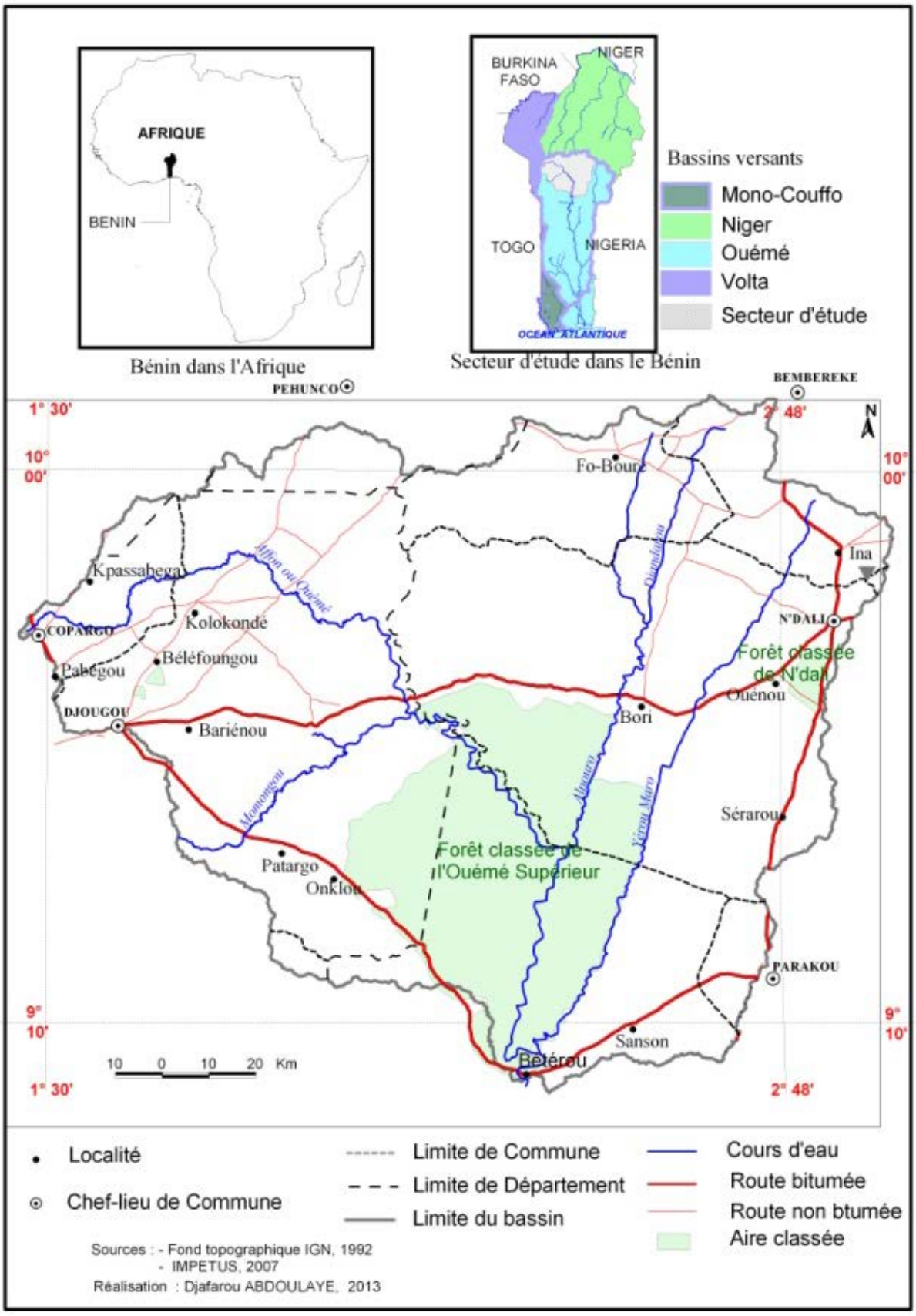


Figure 12: Situation du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

3.1.2. Aspects hydrogéologiques du bassinversant

Le bassin versant de l'Ouémé supérieur à l'exutoire de Bétérou s'étend sur une dizaine de formations géologiques dont les plus importantes sont : la série de gneiss de Djougou, le complexe de migmatite de Kandi, le faciès de Wèwè, les formations associées au gneiss, les migmatites granitoïdes issus du Dahoméyen et les granites syntectoniques calco-alcalins (fig. 13).

Cet ensemble géologique est altéré par les facteurs climatiques notamment l'eau et la température. Ainsi, la circulation de l'eau dans les fractures du sous bassement diffuse le processus d'altération plus en profondeur vers le cœur de la roche saine, en isolant les galets dans une matrice de régolite (DH, 1985). Aussi, l'accumulation de ces eaux enrichit les aquifères du bassin versant. Ces aquifères, notamment du Dahoméyen, sont réparties dans les fractures des roches. Les forages atteignent des profondeurs de 50 à 75 m et sont placés dans les fractures. Les débits varient entre 0 et 25 m^3/h (DH, 1985). Cet aquifère participe à l'écoulement du fleuve. Leur recharge est assurée à 340 mm dans le secteur de Djougou et entre 260 et 325 mm dans les autres secteurs du bassin versant.
Le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou est couvert à plus de 90 % de sa superficie de zones favorables en matière de potentialité de développement à partir des eaux souterraines, comparativement aux zones faibles. La zone à potentialité modeste est à très faible proportion dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Compte tenu de la forte proportion de zones favorables en termes de potentialité de développement des eaux souterraines, on pourrait dire que le problème d'alimentation en eau ne se pose pas dans ce bassin.

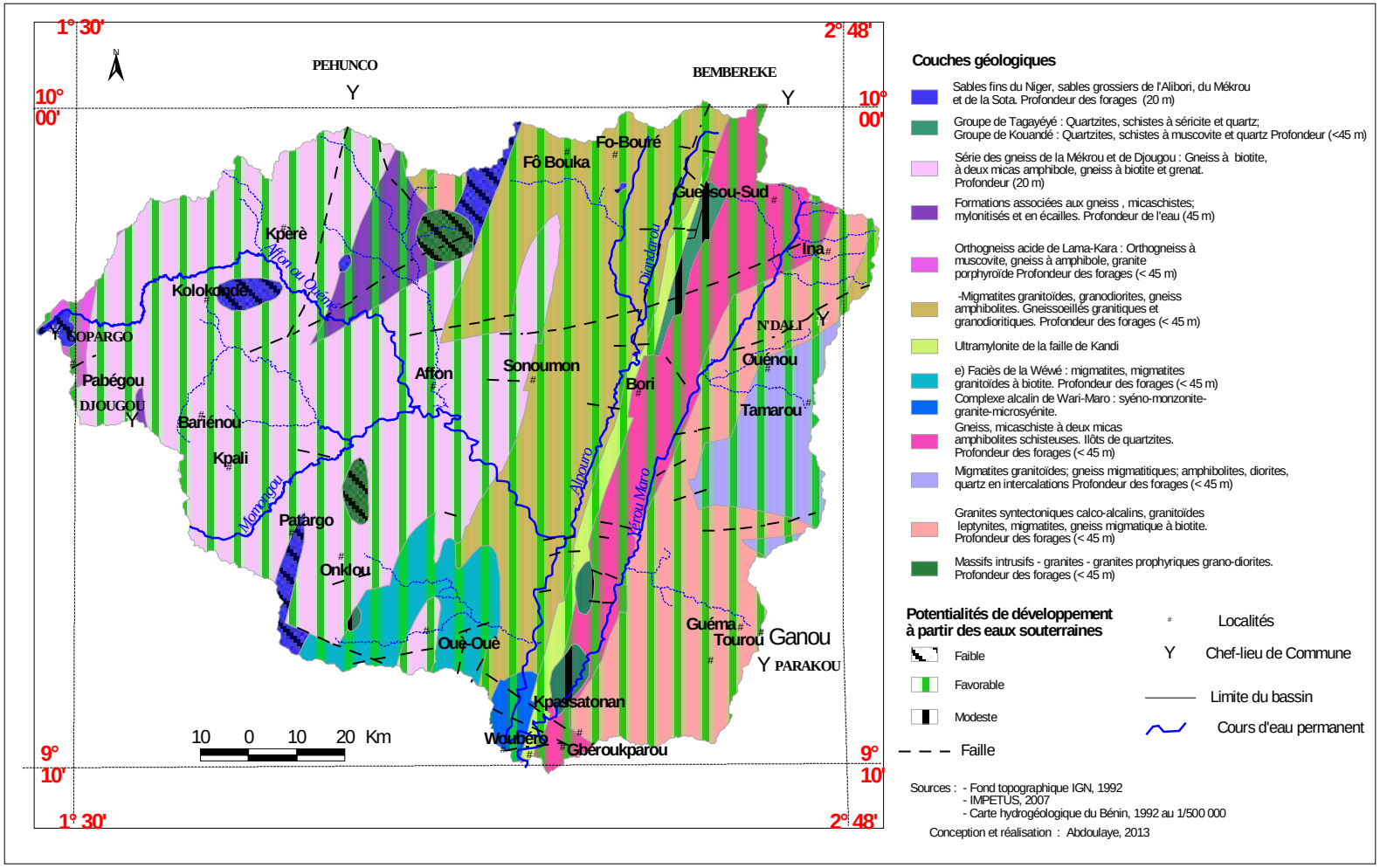


Figure 13: Hydrogéologies du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

3.1.3. Aspects topographiques du bassinversant

Le modelé correspond à une pénéplaine. Cette pénéplaine est faite d'une succession de croupes surbaissées polyconvexes, constituées de roches cristallines en majorité métamorphiques (Abdoulaye, 2010). La topographie vallonnée et pratiquement monotone s'élève progressivement de 300 à 400 m d'altitude (fig. 14). Constitué de chaînons faiblement allongés à l'orientation nord-sud, il s'élève dans les régions de Tchaourou, où il atteint son point culminant à Wari-Maro (Mont Soubakpérou, 620 m). Les études faites par Igué (1991) ont prouvé que l'altitude moyenne des sommets du massif du bassin versant est voisine de 350 à 400 m et des collines de 500 m d'altitude environ se retrouvent dans les localités d'Agbassa et de Kpessou.

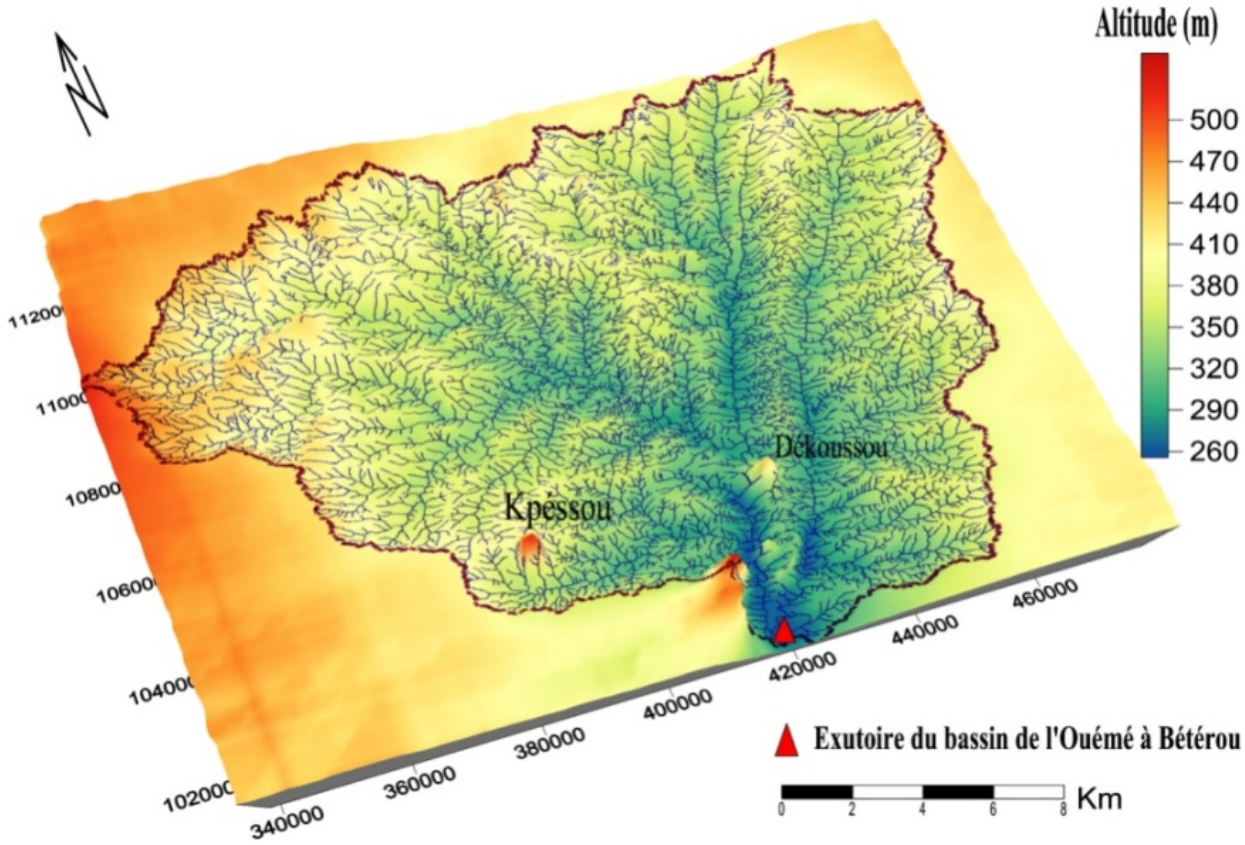


Figure 14: Vue en 3D du Modèle Numérique de Terrain du bassin versant

3.1.4. Composantes pédologiques du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire deBétérou

Les formations pédologiques résultent de l'action combinée de plusieurs facteurs tels que le climat, les formations végétales, la roche mère, le type d'altération, l'histoire géomorphologiqueet les actions anthropiques (Kamagaté, 2006).

Le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou présente une variété de sols regroupant trois grands types :

- les sols minéraux bruts et peu évolués représentés par des cuirasses éparpillées dans le secteur,
- les sols sur quartzite du socle situé le long des collines et ;
- les sols à sesquioxyde de fer et de manganèse, sous-classe des sols ferrugineux tropicaux.

Les sols sont en majorité du sol ferrugineux tropicaux et accessoirement du sol ferralitiques (fig. 15).

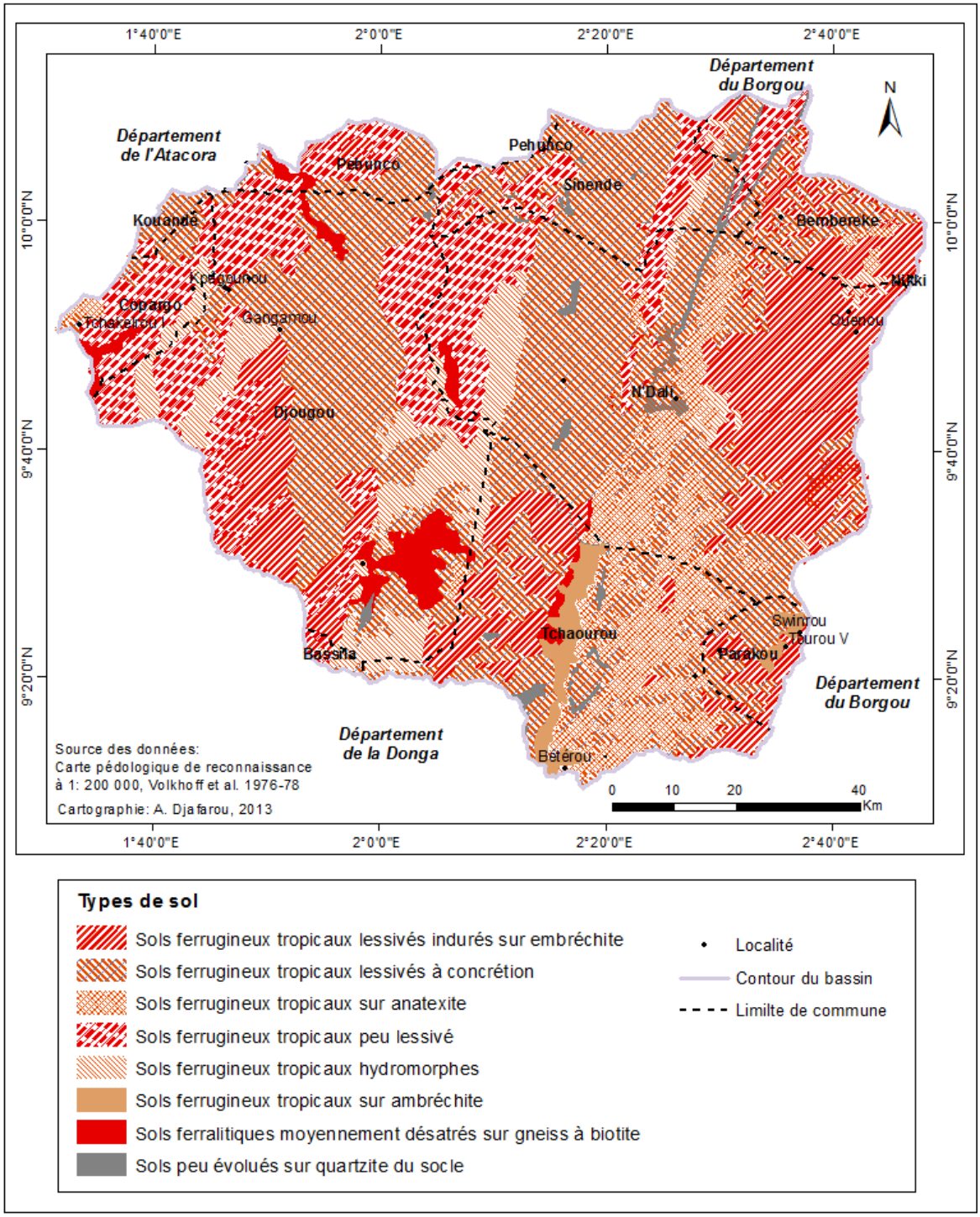


Figure 15: Grandes unités pédologiques du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

Au sein de cet ensemble de sols ferrugineux, caractéristiques des régions tropicales, existent plusieurs variantes qui s'expliquent par la nature de la roche mère en place. On note par exemple les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions, formés sur

embréchiste, et les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions, formés sur du granito-gnessique.

Quant aux sols ferralitiques, ils sont des sols profonds, caractérisés par une altération complète des minéraux primaires de la roche et une élimination importante des bases, aboutissant à la formation de minéraux kaolinitiques et des oxydes métalliques.

Les formations pédologiques du bassinversant de l'Ouémé à Bétérou se résument essentiellement aux sols ferrugineux tropicaux lessivés, aux sols ferrugineux tropicaux appauvris et aux sols hydromorphes. Les sols hydromorphes se retrouvent dans les vallées le long des cours d'eau. Cette catégorie de sol a des propriétés physiques et hydrauliques moyennes et la réserve en eau est acceptable du point de vue agronomique (Houndénou, 1999). Les sols ferrugineux tropicaux sont caractérisés par un lessivage intense et une forte altération. Leurs propriétés hydrodynamiques sont moins bonnes. Ils sont peu profonds, souvent concrétionnés, avec des horizons bien différenciés et une couche humifère peu épaisse. La faible épaisseur sur un substratum magmatique et cristallophyllien, induit l'absence d'une nappe phréatique. Mais, des poches d'eau exploitables se situent sur les zones de broyage le long des fissures et des fractures de la roche-mère. Ils présentent une perméabilité moyenne, une faible profondeur, une résistance moyenne à l'érosion, un indice d'instabilité structurale moyen et une faible capacité de rétention en eau, ce qui constitue une importante contrainte agricole.Ces sols sont de texture argilo sableuse. Leur profil comporte un ensemble d'horizons sableux et sablo-limoneux de 30 à 70 cm d'épaisseur (Boko, 2000).

Tous ces sols ont besoin d'apports en matière organique pour la reconstruction de la couche humifère sur les parcelles mises en culture.

3.1.5. Aspects hydrographiques du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire deBétérou

Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouémé Supérieur peut être scindé en deux entités (Zannou, 2006**)** : le réseau de la rive gauche et le réseau nord-ouest (fig. 16).

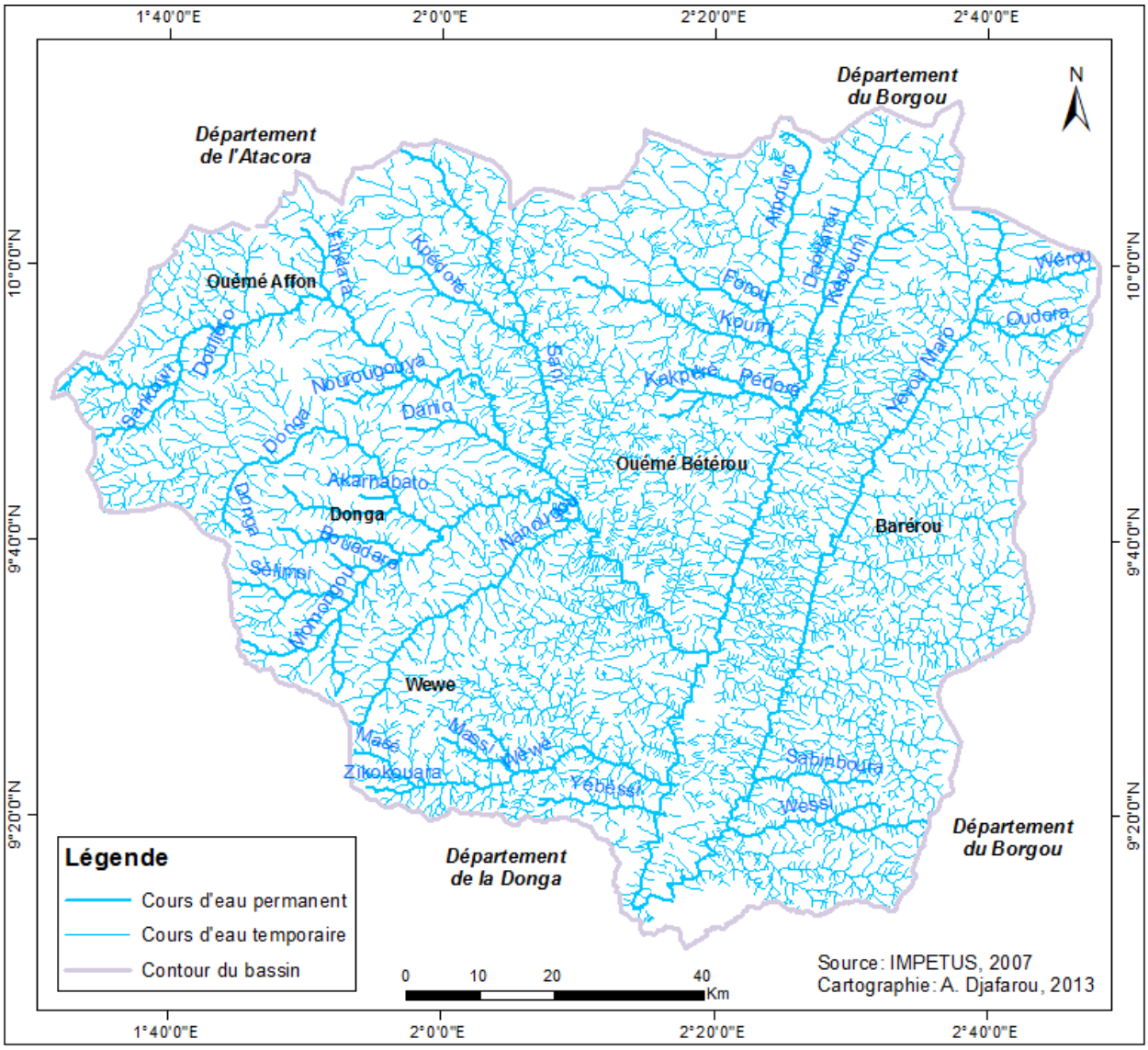


Figure 16: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

Sur le réseau de la rive gauche, les rivières suivent ici la direction nord-sud imposée par les formations du socle. Les pentes sont relativement importantes (1 à 2m / km) et peuvent s'accentuer au passage d'accidents géologiques. Selon Le Barbé *et al* (1993), les affluents les plus importants, on peut citer l'Alpouro (2010 km² pour une longueur de 86 km) et le Yérou-Maro (2590 km² pour une longueur de 120 km).

Le réseau nord-ouest : il est très dense sur les flancs des Massifs de l'Atacora au Nord et d'Aledjo à l'Ouest. Les rivières suivent les directions imposées par les reliefs (W-E et NW-SE) avant de rejoindre l'Ouémé. En amont du bassinversant, les pentes peuvent être très élevées et restent ensuite relativement fortes (1 à 2m/km). Parmi les rivières les plus importantes, on peut citerAffon Ouémé (jusqu'à sa confluence avec l'Alpouro, 4320 km²

pour une longueur de 152 km), la Donga (1285 km² pour une longueur de 74 km), la Wèwè (617 km² pour une longueur de 49 km) et la Térou (3320 km² pour une longueur de 139 km).

La montée des eaux du fleuve commence en juillet et atteint les hauteurs extrêmes en septembre voire octobre. Les années 1985, 2005, 2007 et 2010 sont retenues comme des années d'inondation exceptionnelles où il y a eu d'énormes pertes de cultures et des destructions des habitations. Des sécheresses prononcées ont été enregistrées en 2004 et 2006.

3.1.6. Types de végétationet structure morphologiquedans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

3.1.6.1. Types de végétation

Les formations végétales naturelles du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou sont composées de forêts denses sèches, de galeries forestières, de forêts claires, de savanes boisées, de savanes arborées et arbustives, de savanes herbeuses et de forêts denses sèches sous forme de lambeaux. Les galeries forestières sont composées des espèces comme*Khaya grandifolia (C. DC), Khaya senegalensis (Derr. A. Juss), Pterocarpus santalinoïdes (L'Hér. Ex DC.), Syzygium guineense (SW.), Berlinia grandiflora (Vahl Hutch. et Dalziel*). Les forêts denses sèches comportent les espèces telles que*Isoberlinia doka (Craib et Stapf),Ceiba pentandra (L.) Gatern, Holoptelea grandis (Hutch.) (Abdoulaye, 2010).* Les forêts claires et les savanes boisées sont constituées par des espèces telles que : *Isoberlinia tomentosa (Harms Craib et Stapf., Monotes kerstingii (Gilg.), Pericopis laxiflora (Beuth.), Daniellia oliveri (Rolfe Hutch et Dalziel).*, *Vitellaria paradoxa (C. F. Gaertn. ssp.).* Quant à la savane arbustive, elle s'est développée partout où la végétation naturelle a été touchée par l'activité humaine. Les espèces qui y figurent sont entre autres *Isoberlinia doka (Craib et Stapf), Pterocarpus erinaceus (Poir),Burkea africana (Hook), Anogeissus leiocarpa (DC.) Guill. et Perr., Hyparrheniainvolucrata (Stapf var.), Chromolaena odorata (L.) R. M. King, Imperata cylindrica (L.) P. Beauv., Vitellaria paradoxa (C. F. Gaertn. ssp.), Parkia biglobosa (Jacq.) R. Br.* Sur les sommets et les versants à sols ferrugineux lessivés s'observe une savane arborée assez dense avec

Khaya senegalensis et Ceiba pentandra comme espèces caractéristiques. La strate herbacée est dominée par *Siphonochilus aethiopicus (B. L. Burtt.),* et *Imperata cylindrica* (PAMF, 2002).

3.1.6.2. Structure morphologique dans le bassinversant

La structure morphologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou comprend le sommet, le versant, le bas de versant et la dépression. Sur les versants on rencontre des affleurements rocheux comme les blocs de cuirasse et de granite (photo 3 et photo 4)



Photo 3: Bloc de cuirasses à Wèwè
Prise de vue, Agbataou, avril 2012



Photo 4:*Bombax costatum* sur roche affleurante (granite)
Prise de vue, Agbataou, avril 2012

La photo 3 montre des images de cuirasses à Wèwè. En avant plan se trouvent des graminées en germinationet en arrière-plan des blocs de roches affleurantes (cuirasses).Sur la photo 4, on observe au premier plan unpied de *Bombax costatum* sur roche affleurante (granite) enraciné dans les fissures rocheuses et en arrière-plan, des herbes sèches étalées.Ces affleurements rocheux, forment souvent des sommets et des versants sur lesquelles se développentdes formations saxicoles. Le relief est donc une entité qui permet de définir le type de formations végétales caractéristiques d'une facette topographique donnée (fig. 17).

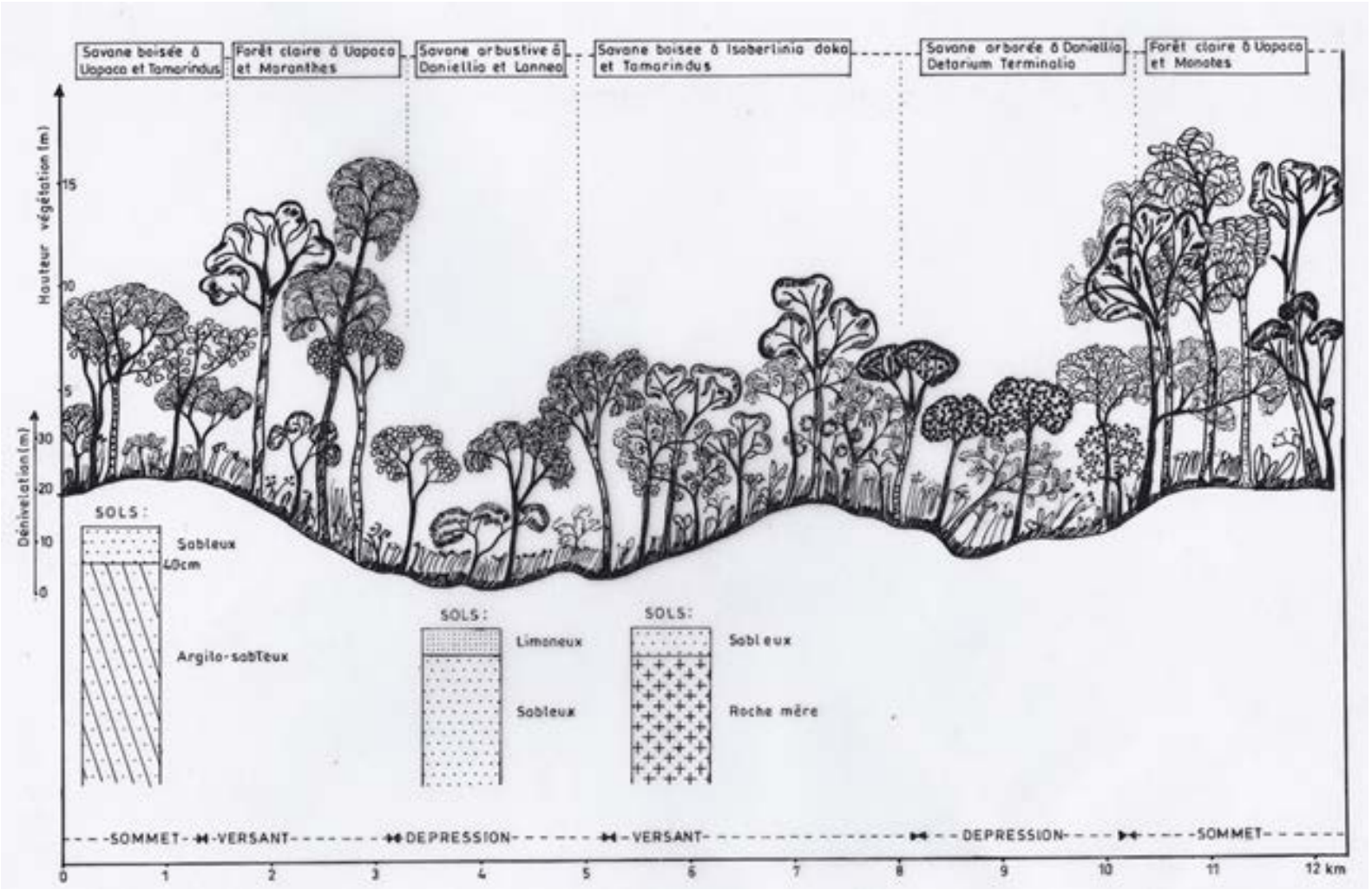


Figure 17: Profil structural de la végétation dans le secteur de Wèwè-Ouémé

Source : travaux de terrain, 2012

Dessinateur : Guillaume MOTCHO

L’analyse de ce profil révèle que les espèces floristiques de la végétation varient en fonction des conditions morpho-pédologiques. Ainsi, on a :

- la savane boisée à *Uapaca*togoensis et *Tamarindus*indica située sur le sommet d’un sol sableux et argilo sableux;
- la forêt claire à *Uapaca*togoensis et *Monotes kerstingii*située sur le sommet à l’Est du profil;
- les savanes arborée et arbustive à *Daniellia oliveri, Detarium microcarpum et*située dans une dépression avec un sol à texture limono-sableuse;
- la savane boisée à *Isoberlinia doka et Tamarindu*indica qu’on rencontre sur un versant au sol sableux.

L’examen du profil structural de la végétation du secteur de Bori-Alpouro est illustré comme indiqué à la (fig. 18) permet de constater qu’il y a une variété d’unités végétales en fonction des conditions morpho-pédologiques. Ainsi, on peut identifier :

- la forêt galerie à *Syzygium guineensis et Manilkora multinervis* sur les berges d’un cours d’eau sur sol sablo-argileux;
- la forêt dense sèche à *Anogeissus leiocarpa et Pterocarpus erinaceus* observée au bas de versant sur sol limono-sableux;
- la forêt claire et savane boisée à *Isoberlinia doka* située également en bas de versant sur sol sablo-limoneux;
- la savane boisée à *Burkea africana* rencontrée sur un sommet au sol sablo-argileux;
- la savane arborée *Pericopsis laxiflora* et *Daniella oliveri* identifiée sur un sommet au sol sablo-gravelleux.

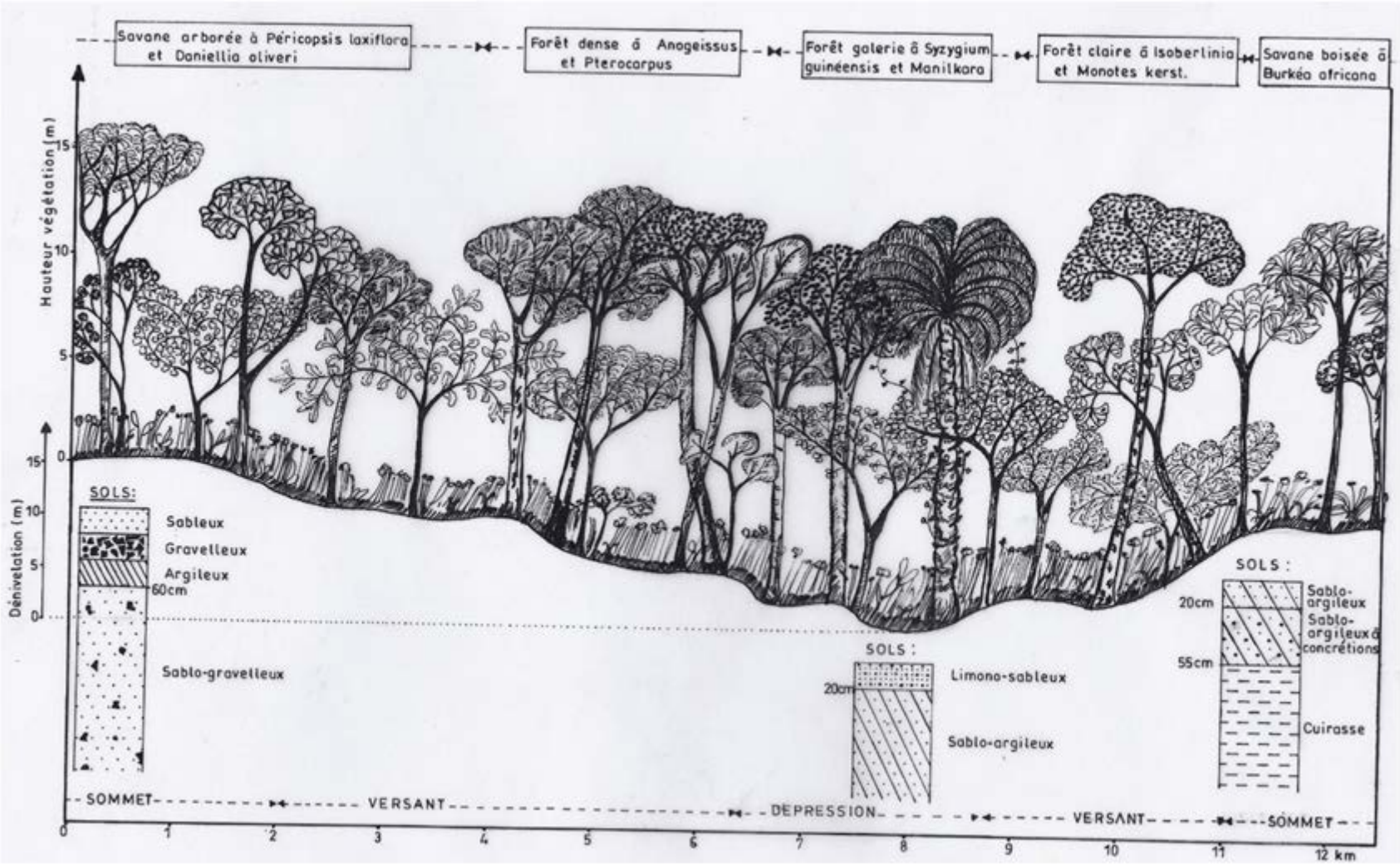


Figure 18: Profil structural de la végétation du secteur de Bori-Alpouro

Source : travaux de terrain, 2012
Dessinateur : Guillaume MOTCHO

3.1.7. Traits climatiquesdu bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire deBétérou

Le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou est sous l´influence du climat tropical de type soudanien caractérisé par deux saisons : une saison sèche (novembre à mars) et une saison pluvieuse (avril à octobre). La pluviosité moyenne annuelle est de 1150 mm et ETP moyenne annuelle oscille autour de 1500 mm (Toko, 2008).

3.1.7.1. Bilan climatique

Le bilan climatique défini à partir des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle permet de diviser l'année en des périodes d'événements bioclimatiques successives (fig. 19).

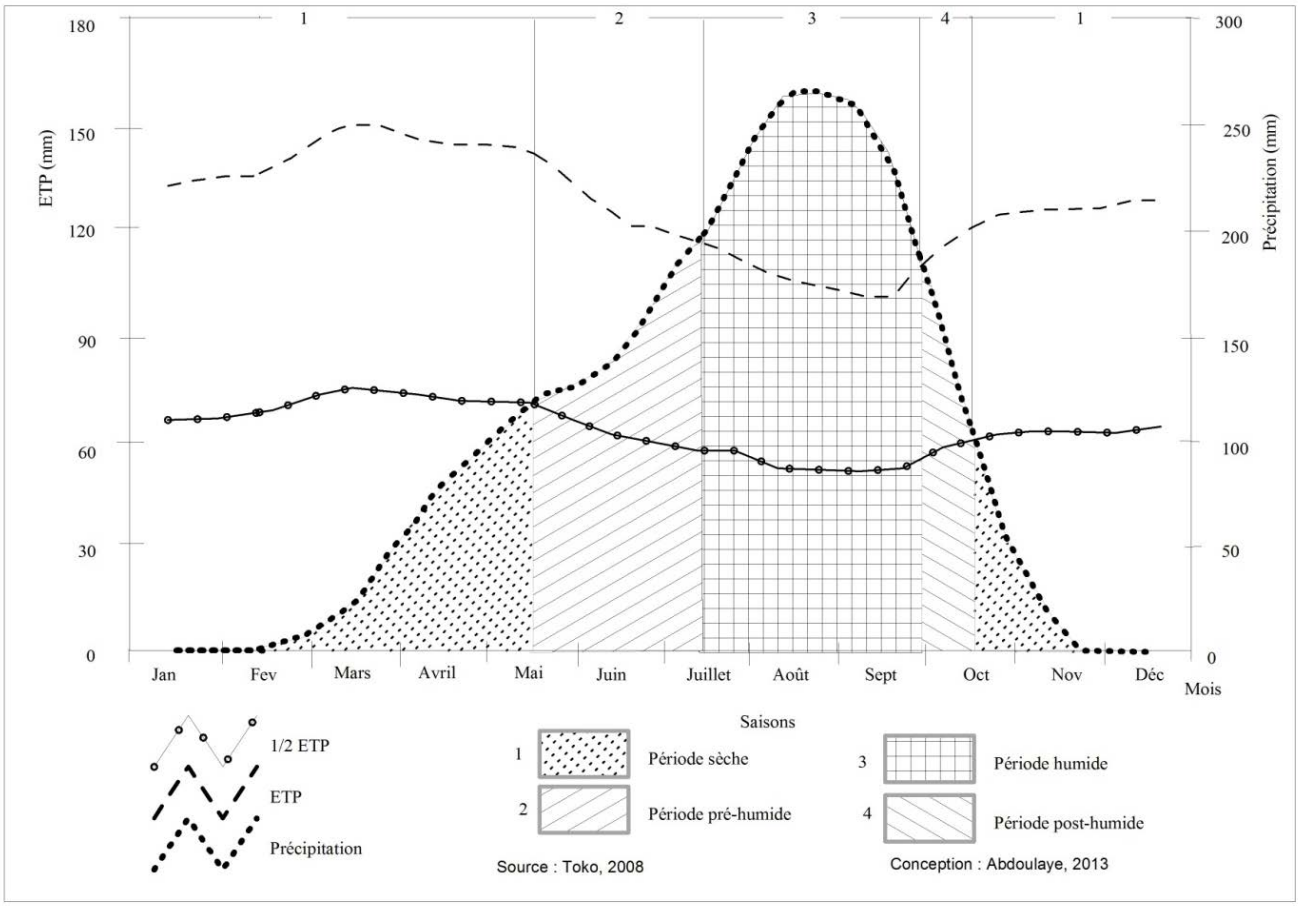


Figure 19: Diagramme climatique de Franquin à la station de Parakou (1965-2010)

Les hypothèses de base définies par Franquin (1969) sont représentées dans la figure 19.

La période sèche est la période au cours de laquelle la courbe des précipitations est en dessous de la moitié de l´ETP. Elle s'étend de mi-octobre à mi-avril. Au cours de cette période, les points d'eau tarissent mais les principaux cours d'eau comme Ouémé conservent de l'eau dans leur lit mineur. Quant aux herbacées, elles existent sous forme de pailles si elles ne sont pas consumées par les feux de végétation. Les premières pluies commencent vers la fin de cette période (mi-avril) et s'étalent sur environ un mois (mi-avril à mi-mai). Durant cette période, les pluies sont peu abondantes, les eaux vite évaporées et les réserves hydriques du sol demeurent faibles.

La saison humide se décompose en trois périodes (Petit, 1990 ; Memento de l'Agronome, 1980) :

- la période pré-humide où P inférieure à ETP, c'est une période de réhumectation du sol accompagnée d'une reprise de la végétation; le déficit hydrique du sol commence à diminuer, les pluies antérieures ayant servi à reconstituer le stock d'eau de la tranche superficielle asséchée au-delà du point de flétrissement ou ayant été évaporées ;

- la période humide où P supérieure à ETP, c'est une période de saturation en eau du sol caractérisée par le plein épanouissement du couvert végétal ;

- la période post-humide où P inférieure à ETP, c'est une période d'assèchement du sol caractérisée par le flétrissement du feuillage de la plupart des espèces ligneuses et un dessèchement des herbacées.

La période franchement humide s´étend de mi-juillet à mi-septembre. Elle correspond à la période active de végétation durant laquelle la réserve en eau du sol est supérieure aux besoins des plantes. Elle est la plus pluvieuse et le pic des précipitations est atteint au mois d'août. La pluviosité au cours de ce mois dépasse généralement 175 mm (Toko, 2008). A la fin de cette période (mi-septembre à mi-octobre), le point de

flétrissement est atteint suite à l'épuisement de la réserve hydrique du sol. La période post-humide apparaît assez courte comparée à la période pré-humide.

3.1.7.2. Bilan hydrique

Le bilan hydrique simplifié d'une surface couverte s'exprime par la formule suivante (équation 9) :

$$P = ETR + RU \qquad (12)$$

où P est la Précipitations en mm, ETR l'Evapotranspiration réelle en mm et RU la Réserve utile en mm.

Pour le calcul de l'ETR, il est impératif de connaître la RU, l'ETP et les précipitations. On utilise la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite :

Si P + RU > ETP, alors ETR = ETP

Si P + RU < ETP, alors ETR = P + RU

La RU est déterminé par deux seuils d'humidité :

- la capacité au champ lorsque le sol a emmagasiné la quantité maximale d'eau qu'il peut contenir ;
- le point de flétrissement permanent, qui est la limite inférieure de l'humidité du sol en dessous de laquelle la vie des végétaux devient impossible.

La valeur de RU dépend de la granulométrie, de la profondeur et la teneur en matières organiques des sols. Plus un sol est profond, plus la valeur de la RU est grande et vice-versa.

Dans cette étude, on retient avec Afouda (1990), 80 mm comme la valeur maximale de la RU en raison de la dominance du sol ferrugineux de profondeur moyenne (environ 3 m) avec la présence de sols peu évolués de faible profondeur. Les variations saisonnières de la RU se calquent sur celles des précipitations mais avec un mois de retard (renvoyer dans la méthodologie).

Le bilan hydrique simplifié du milieu d'étude se caractérise par une durée de RU de quatre mois qui s'étend d'août à novembre. La RU est saturée durant trois mois et s'épuise saisonnièrement pendant huit mois, de décembre à juillet.

3.1.7.3. Températures, insolation et vent

En milieu tropical, la température est importante pour les écoulements des bassins versants (Ozenda, 1982). La température moyenne annuelle enregistrée à la station de Parakou au cours de la période (1965à 2010) oscille autour de 27° C (fig. 20)

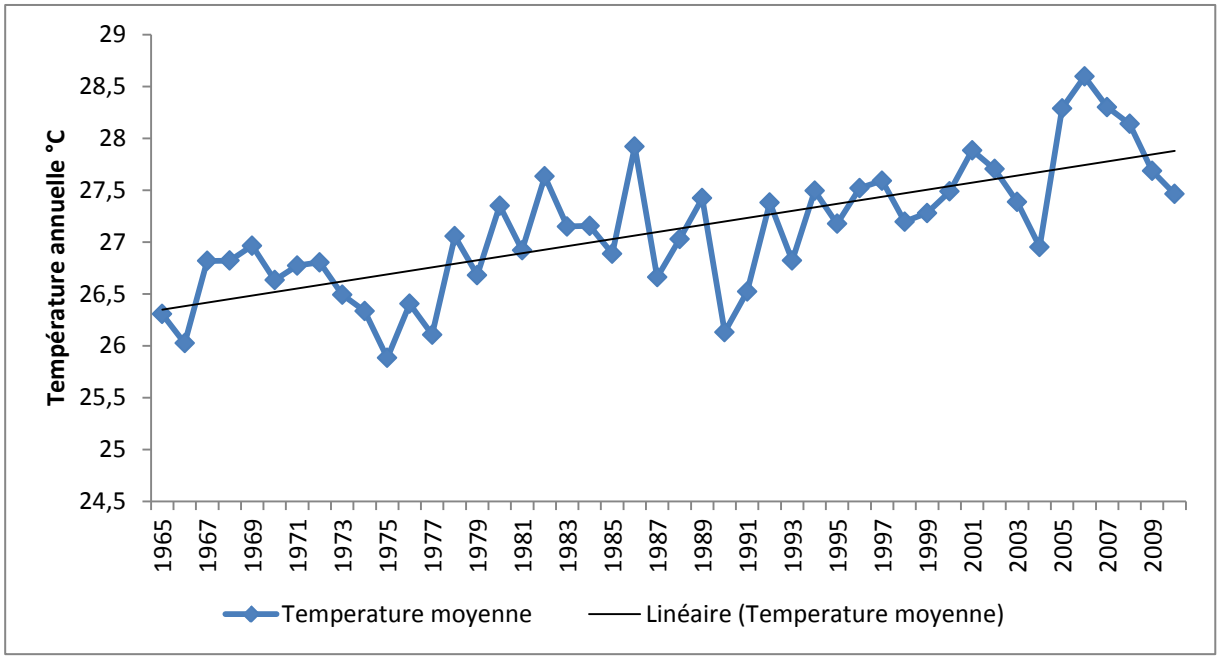


Figure 20 : Variation interannuelle des températures à Parakou (période de 1965 à 2010)
Source : *ASECNA (2010)*

A travers la figure 20, on note que les températures les plus élevées sont enregistrées en 2006 (28,7º C) et avril (28ºC) et les plus basses en 1976 (25,7ºC) et en 1990 (26,1ºC).

3.1.7.4. Insolation

La durée annuelle de l'insolation est en moyenne de 3000 heures. Elle est maximale en novembre (286 h) et minimale en août (184 h). Elle représente le paramètre essentiel du rayonnement global et joue à ce titre un rôle important à la fin de l'hivernage en

intensifiant le pouvoir évaporant de l'air (Sinsin, 1993). La lumière est le facteur principal de la photosynthèse et donc favorise la production de biomasse. Par contre, la forte insolation provoque l'assèchement des mares et cours d'eau et entraîne des modifications pédologiques telles que les pertes d'éléments carbonés et la solubilisation des éléments minéraux. Elle contribue à la dégradation des formations végétales.

3.1.7.5. Vent

Le vent joue un rôle déterminant dans la dynamique des formations végétales. Il est un agent de dissémination des diaspores de certaines espèces et accentue les chablis et la propagation des feux de végétation. L'alizé maritime (mousson) et l'alizé continental (harmattan) sont les deux types de vents dominants du milieu d'étude. Le harmattan est un vent sec qui souffle de novembre à mars suivant une direction nord-est. Sa vitesse moyenne est de 2 m/s. Sa vitesse maximale atteint 14 m/s.

3.2. Caractéristiques socioéconomiques

3.2.1. Traits humains et économiques

Les populations du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou tirent un grand profit des ressources naturelles de leur milieu (Schreckenberg, 2000, in Orthmann, 2005). Les principales activités sont l'agriculture, l'élevage, l'exploitation forestière, la récolte des plantes médicinales, la chasse et la pêche. L'agro-foresterie à base *d'Anacardium occidentale*, introduite dans les principes culturaux des populations de la région, constitue un atout pour la conservation des ressources naturelles.

Des facteurs physiques comme le climat favorable et la disponibilité des terresont fait de l'agriculture le poumon de l'économie du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Mais on note aussi une forte croissance de l'élevage qui tend à devenir un deuxième moteur de développement économique du bassinversant après l'agriculture.

Avec l'avènement de la décentralisation, le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou s'étend sur sept communes : Copargo, Bembèrèkè, Djougou, Bassila, Tchaourou, N'dali et Sinendé.Différents groupes socioculturels habitent ces communes et y

pratiquent des activités très diverses.

3.2.1.1Caractéristiques sociolinguistiques des populations

Dans le bassin versant de l'Ouémé, les investigations en milieu réel ont permis de se rendre compte des différents groupes sociolinguistiques des populations. En effet, les populations de ce bassin versant sont constituées en majorité de Bariba autochtones puis de, Yom venus de Djougou et ses environs, de Lokpa venus de Ouaké et environs, de Berba venus des régions de Tanguiéta et environs, enfin les Ditamari venus des régions de Natitingou et environs. La figure suivante (fig. 21) renseigne sur les différents groupes sociolinguistiques des migrants ruraux du secteur d'étude.

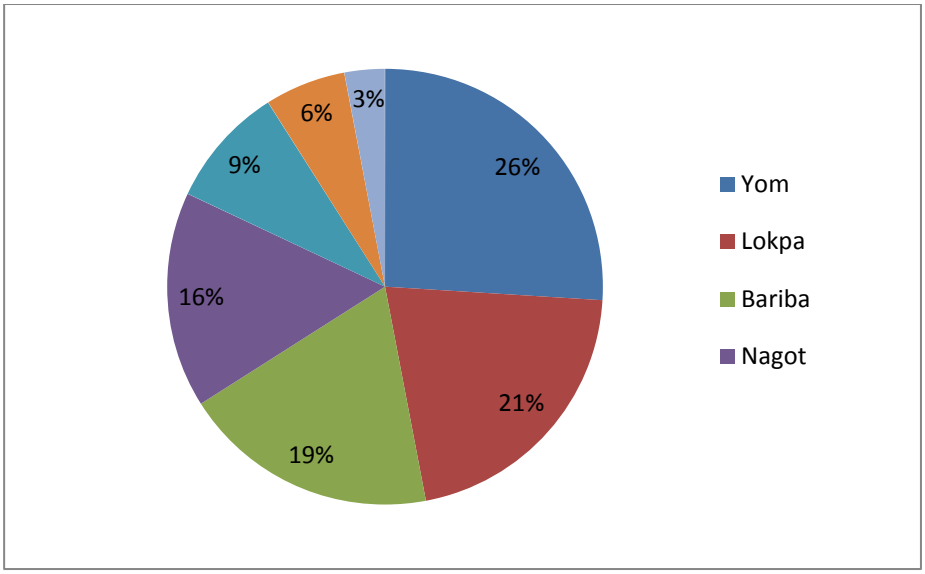


Figure 21: Groupes sociolinguistiques des populations à la recherche des terres

Source *:* Enquêtes de terrain, novembre 2012

De l'analyse de cette figure, il ressort que le groupe socioculturel Yom occupe la première placeavec 39 %, suivi du groupe Lokpa (33 %). Ces deux groupes socioculturels sont respectivement les plus importants de la population à la recherche des terres cultivables dans le bassin versant. Ces groupes font partie des véritables agriculteurs et exploitants forestiers dans le bassin versant. Ainsi, ils participent non seulement à la mise en valeur des ressources du bassin versant mais aussi à la

dégradation de son environnement. Tous ces groupes sociolinguistiques ont été différemment attirés dans le milieu.

3.2.1.2. Dynamique démographique

En incluant l'ensemble des sept communes faisant partie du bassinversant de l'Ouémé à Bétérou, la population agricole est de 964512 habitants (INSAE, 2013) sur 9983884 habitants pour le Bénin soit 9,40 % de l'ensemble. Cette population est essentiellement rurale. La figure (fig. 22) présente la dynamique de la population agricole du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou de 1992 à 2012

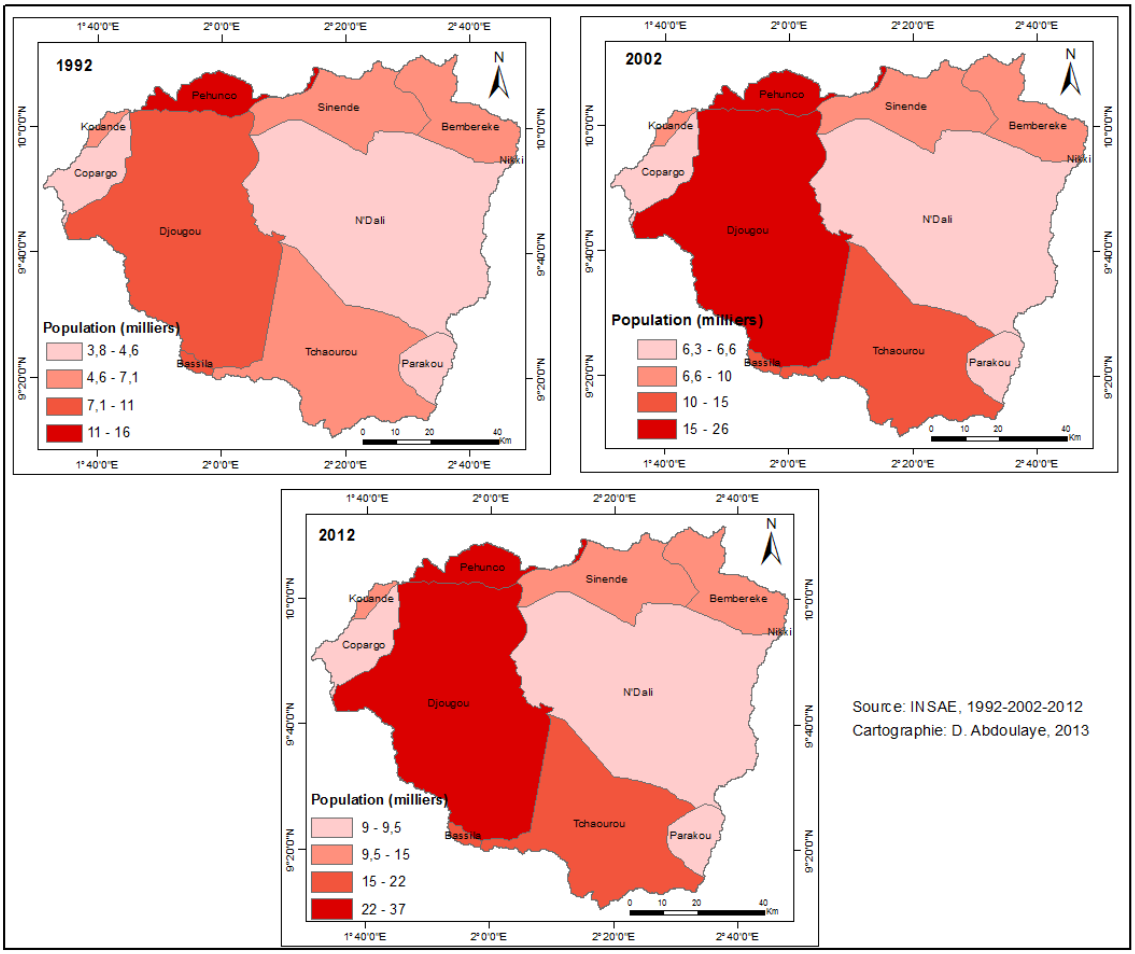


Figure 22: Dynamique démographique agricole dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

L'analyse minutieuse de ces figures permet de dire que la zone d'étude a, dans son ensemble, une densité moyenne sur la période de 1992 à 2012 (37 habts/km²). Ainsi, il ressort que la commune de Djougou est la plus habitée du bassin versant de l'Ouémé

avec une densité comprise entre 8 et 11 hbts/km²; 11 à 16 hbts/km² et 22 à 37 hbts/km² respectivement en 1992, 2002 et 2012. Cette forte densité s'explique par les mouvements migratoires de la part des communes environnantes et aussi de la forêt classée de l'Ouémé Supérieur, qui bénéficie d'une protection exigeant sa non praticabilité à des fins agricoles. Les Communes de N'dali, Parakou, Tchaourou, Bembèrèkè, Sinendé et Copargodisposent encoredes réserves de terres agricoles plus importantes que les Communes de Djougou et Pehunco permettant ainsi aux agriculteurs d'exploiter extensivement des terres suivant lesystème de l'agriculture itinérante sur brûlis.

3.2.2. Caractéristiques économiques

De nombreuses enquêtes réalisées sur le plan national et/ou international limitent leurs recherches au niveau des chefs de ménage (qui sont surtout masculins), en supposant qu'ils sont bien informés sur les activités économiques des autres membres du ménage (IFPRI, 2002; MAEP, 2001; INSAE, 2004).

3.2.2.1. Agriculture

L'agriculture demeure la principale activité dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Elle occupe plus de 80 % de la population active. L'agriculture pratiquée dans ce bassin versant est de type traditionnel. Les techniques de production utilisées sont rudimentaires. La pression humaine sur les terres du fait de la croissance démographique entraîne une forte dégradation du milieu naturel et une perturbation des équilibres environnementaux (Sounon *et al.*, 2007). Les principales cultures sont : le maïs (*Zea mays*), l'igname (*Dioscorea sp.*), le manioc (*Manihot exculenta*), le sorgho (*Sorghum bicolor*), l'arachide (*Arachis hypogea*), le niébé (*Vigna unguiculata*) et le riz (*Oriza sactiva*.) et le coton (G*ossypium* sp). Les photos 5 et 6 montrent un champ d'igname et de coton dans le secteur d'étude.



Photo 5: Champ d'igname à Patargo (Commune de Djougou)
Prise de vue, Abdoulaye, juin 2012



Photo 6: Champ de coton à Bori (Commune de N'Dali)
Prise de vue, Abdoulaye, juin 2012

L'augmentation des superficies emblavées suite à l'afflux des migrants du sud, du nord du Bénin et ceux du Togo, entraîne l'augmentation de la pression exercée sur les aires protégées de la région. Cette situation est favorisée par l'accès facile à la terre d'anciens ouvriers, devenus agriculteurs aujourd'hui. Depuis quelques années, les jachères sont transformées en plantations d'anacardiers (Houinato, 2001 ; Mulindabigwi et Janssens, 2002 et 2003 ; Sinsin *et Toko,* 2007).

Un début de modernisation a été favorisé par la politique de promotion des cultures de rente, par l'encadrement du monde rural, par le développement du mouvement coopératif, par la mise à la disposition des producteurs de semences par les CARDERet par la récente politique de mécanisation du secteur agricole.

Les techniques culturalesrestent essentiellement traditionnelles et les augmentations de production d'une année à une autre sont en réalité beaucoup plus imputables à l'accroissement des superficies cultivées qu'à celui de la productivité. Comme preuve, la pression humaine sur les formations végétales, marquée par l'exploitation frauduleuse du bois-d'œuvre, le braconnage, la culture sur brûlis et les méfaits de la transhumance, se sont accrus. L'espace rural du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou est essentiellement dominé par les paysages agraires bariba et dendi. Les autres groupes socioculturels n'ont pas un mode d'organisation spécifique du terroir. En effet, plusieurs auteurs comme Pelissier (1963), Dissou (1983) et Boko (1988) ont décritsuccessivement les paysages agraires du Nord-Bénin.Ainsi, selon Boko (1988),

le domaine d'influence du paysage agraire Bariba s'étend de 9° à 11°15' de latitude nord. Dans cette aire, le brûlis constitue la phase préparatoire au billonnage et au buttage(Photo 7 et photo 8). Les buttes de tailles impressionnantes sur du sol de type ferrugineux tropical portent l'igname. Les champs, de grandes tailles, presque géométriques, sont dispersées et éloignés des habitations groupées.



Photo 7 : Terrain défriché en prélude à la culture d'igname à Ina (Commune de Bembèrèkè)

Prise de vue, Abdoulaye, Septembre 2013



Photo 8 : Buttes géantes destinées à la cultures d'igname à Bakou (Commune de Djougou

Prise de vue, Abdoulaye, Septembre 2013

Actuellement ce qui caractérise ce paysage est la culture du coton qui connaît un essor prodigieux grâce à la culture attelée et celle de l'igname que portent les buttes dans les terres plus riches et plus humides que sont les bas-fonds (Agli, 1995). En pays Bariba, la culture attelée est maintenant généralisée, stimulée par le développement de la culture cotonnière et celui de l'élevage bovin.

L'association des cultures (sorgho et igname, sorgho et manioc, maïs et arachide) y est très poussée. Deux cultures de rente sont aussi présentes : l'arachide et le coton. Les cultures vivrières sont essentiellement le mil, le sorgho et le niébé, cultivées sur billon (photo 9 et 10)



Photo 9: Champ de coton à Bétérou (Commune de Tchaourou)
Prise de vue, Abdoulaye, juin 2012



Photo 10: Champ de Sorgho en épiaison dans un campement peulh à Bétérou (Commune de Tchaourou)
Prise de vue, Abdoulaye, juin 2012

On note aussi la présence dans tout le bassin versantd'autres cultures comme le Fonio, le petit mil et diverses légumineuses. Le développement de la culture attelée associé au besoin sans cesse croissant des populations en protéines animales favorise la production animale (lapin, caprins, ovins, volailles) dans le bassinversant.

3.2.2.3. Elevage bovin

L'élevage est, après l'agriculture, l'activité secondaire des populations du bassinversant l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Cet élevage est de type extensif et concerne surtout les bovins, les caprins, les ovins et les volailles. En effet, dans chaque ménage, les animaux domestiques tels que les volailles et les petits ruminants sont élevés. L'élevage des bovins est réservé aux Peulh. La race bovine élevée est constituée essentiellement de taurins et de quelques zébus. Les espèces Somba et Borgou sont les plus élevées par les agro-éleveurs et les transhumants nationaux (Houinato, 2001 ; Mulindabigwi et Janssens, 2003). La forte présence du bétail dans cette région est due à la proximité des aires protégées qui regorgent d'importantes ressources pastorales (photo 11).



Photo 11: Troupeau de bœufs en pâturage à Wari-Maro (Commune de Tchaourou)
Prise de vue, Abdoulaye, juin 2011

La photo 11 montre un troupeau de bétail à la lisière de la forêt classée de Wari-Maro ; précisément à Sinaou dans l'arrondissement de Bétérou (Commune de Tchaourou).

La richesse de ces réserves en fourrage et en points d'eau en période difficile constitue un atout pour les éleveurs riverains et les transhumants transfrontaliers.

Du point de vue écologique, cet élevage a un impact facilement appréciable sur le couvert végétal, notamment sur les arbres fourragers de saison sèche que sont *Afzelia africana, Khaya senegalensis et Pterocarpus erinaceus* souvent élaguéssans discernement.

Pendant la saison sèche, de nombreux problèmes liés à l'eau, aux pâturages et à la transhumance inter-Etat se posent. En effet, le déficit fourrager est régulier, car les feux courantséliminent toute la paille de graminées et la plupart des cours d'eau sont à secs (Vissin 2007). Letaux de charge en bêtes dépasse réellement la capacité de charge saisonnière des zones soudaniennes (Adjinacou et Onibon, 2004). À ce titre, la transhumance est uneréaction nécessaire pour faire survivre les troupeaux, mais aussi une technique efficace d'exploitation des ressources naturelles dans ce système. Cependant, la transhumance exerce une pression de plus en plus forte sur les pâturages naturels. Pendant la saison sèche, ce système induit des feux de végétation, l'élagage et l'étêtage des arbres pour permettre aux troupeaux de brouter les rejets (Pofagi et

Tonouewa, 2001 ; Adjinacou et Onibon, 2004).Ainsi, la transhumance est perçue comme un système de production dégradantl'environnement, du fait qu'elle occasionne des déplacements massifs de cheptel à la recherche de pâturages et de points d'eau. La pression animale avec la transhumance des bêtes (source de conflits entre éleveurs et cultivateurs) participe également à la destruction du couvert végétal, exposant les sols aux effets de l'érosion suite aux forts ruissellements.

3.2.2.4. Pêche

La pêche est peu développée par les populations et elle est considérée comme une activité tertiaire. Quelques pêcheurs actifs utilisent des pesticides chimiques et biologiques qui polluent les cours d'eau. Dans la Commune de Copargo des expériences de pisciculture sont en cours notamment à Singré, un des arrondissements de la Commune de Copargo (photo 12).



Photo 12: Etang piscicole comme moyen utilisé pour pêcher dans Kharoun à Commune de Copargo

Prise de vue, Abdoulaye, juin 2011

En avant plan, on observe un plan d'eau dans lequel sont élevés les poissons et en arrière-plan une zone marécageuse avec quelques pieds de Eleais guinéensis

Conclusion

Ce chapitre a apporté des connaissances utiles sur le contexte physique, économique et humain du secteur d'étude. Les investigations menées ont permis de diagnostiquer les problèmes d'utilisation des terres liés aux actions anthropiques. Plusieurs facteurs interviennent dans la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Il s'agit des facteurs géographiques (le relief, la variabilité climatique) et les facteurs socio-économiques (migration des colons agricoles vers le bassin, production des cultures vivrières et de rentes, usage des outils rudimentaires et modernes). Tous ces facteurs accroissent la pression sur les espaces agricoles dans le bassin.

La première hypothèse qui est d'identifier les causes géographique et anthropique de la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou est donc vérifiée. Pour cette raison, il est alors nécessaire de diagnostiquer la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant à l'exutoire de Bétérou.

CHAPITRE IV : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU

L'objectif de ce chapitre est de faire l'état des lieux de l'occupation des terres en 1990, 2000 et 2010 et d'établir une cartographie prospective de l'occupation des terres du secteur d'étude à l'horizon 2020 et 2030. A cet effet, le modèle SpaCelle a été appliqué aux images satellitaires existantes. L'information produite est mise en relation avec l'indicateur de la disponibilité des ressources en eau pour étudier la relation « occupation des terres-écoulement ».

4.1. Analyse de la dynamique de l'occupation des terres en 1990, 2000 et 2010

L'analyse de la dynamique de l'occupation des terres passe par la présentation de la carte de 1990, de 2000 et de celle de 2010, ainsi que de leurs statistiques respectives. Un croisement deux à deux des cartes d'occupation des terres du Bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, donne trois cartes des changements et trois matrices qui traduisent l'évolution des différentes classes entre ces trois dates.

4.1.1. Etat de l'occupation des terres en 1990

À la date de 1990, l'occupation des terres est dominée par les zones de champ et jachère et la savane arborée et arbustive (fig. 23 et fig. 24).

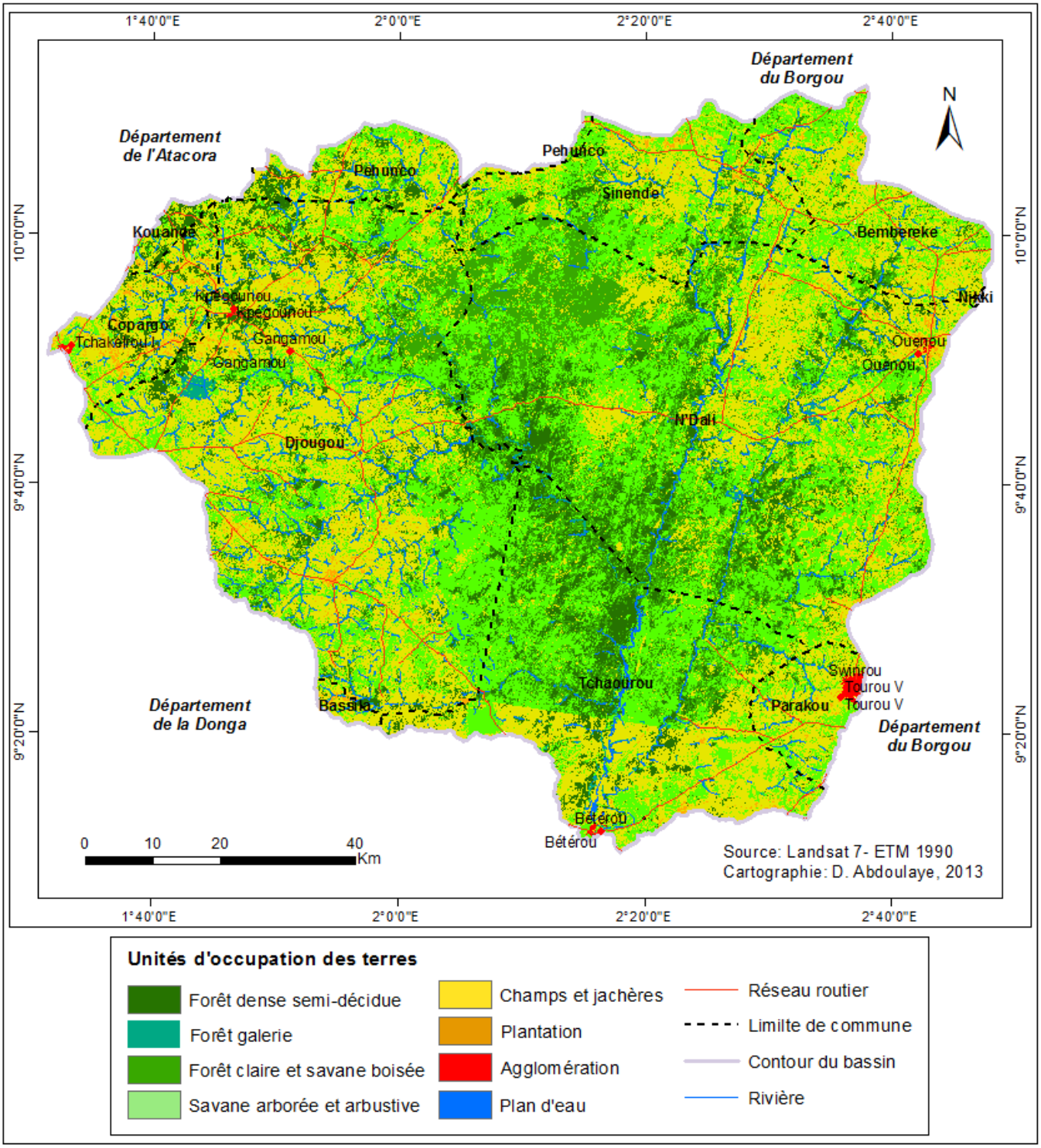


Figure 23: Occupation des terres en 1990

L'examen de la figure 23 montre que les formations naturelles se rencontrent globalement au milieu du secteur d'étude. Il s'agit des forêts denses sèches, des forêts galeries, des forêts claires et savanes boisées et des savanes arborées et arbustives.

Dans les périphéries du bassin, il y a une dominance des mosaïques de champs et de jachères. Enfin, on observe quelques agglomérations dans le bassin versant.

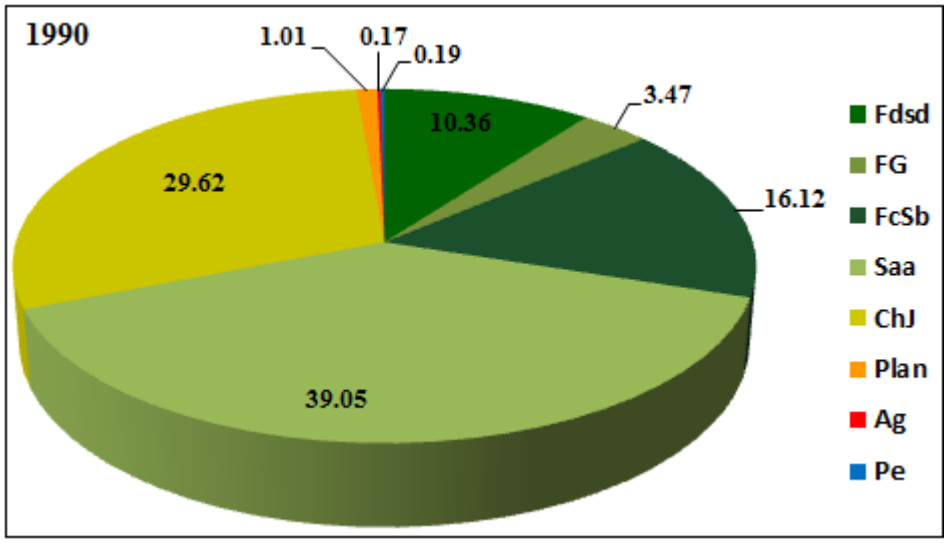


Figure 24: Distribution des différentes unités d'occupation des terres en 1990 (en pourcentage de la surface totale)

Légende

Fdsd : Forêt dense Semi-décidue; FG : Forêt galerie ; Fcsb : Forêt claire et savane boisée ; Saa : Savane arborée et Savane arbustive ; Plan : Plantation ; chJ : champs et jachères ; Ag : Agglomération ; Pe : Plan d'eau

De l'analyse de la figure 24 il ressort que :

- les zones de forêt dense semi-décidue couvrent une superficie de 104418,90 hectares, soit 10,36 % de la région du Bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou ;
- la forêt claire et savane boisée occupe près de 162417,48 hectares de terrain soit 16,12 % de la région d'étude ;
- la forêt galerie couvre une superficie de 34978 hectares, soit 3,47 % du bassin ;
- la savane arborée et arbustive s'étend sur une superficie de 293539,22 hectares soit 39,05 % de la superficie totale ;
- les surfaces cultivées (champ et jachère) s'étalent sur la plus grande partie soit 398516,45 hectares (29,62 %) de la région d'étude ;

- les plantations couvrent une portion de 1,01 % de la région ;
- les agglomérations couvrent en 1990 la plus petite superficie de 1665,90 hectares soit environ 0,17 % de la surface totale ;
- les plans d'eau s'étendent sur 1918,29 hectares.

4.1.2. Etat de l'occupation des terres en 2000

En ce qui concerne l'état de l'occupation des terres en 2000, les fig. 25 et 26 montrent relativement la même distribution que celle de 1990, c'est-à-dire une prédominance de la savane arborée et arbustive, de champs et de jachères.

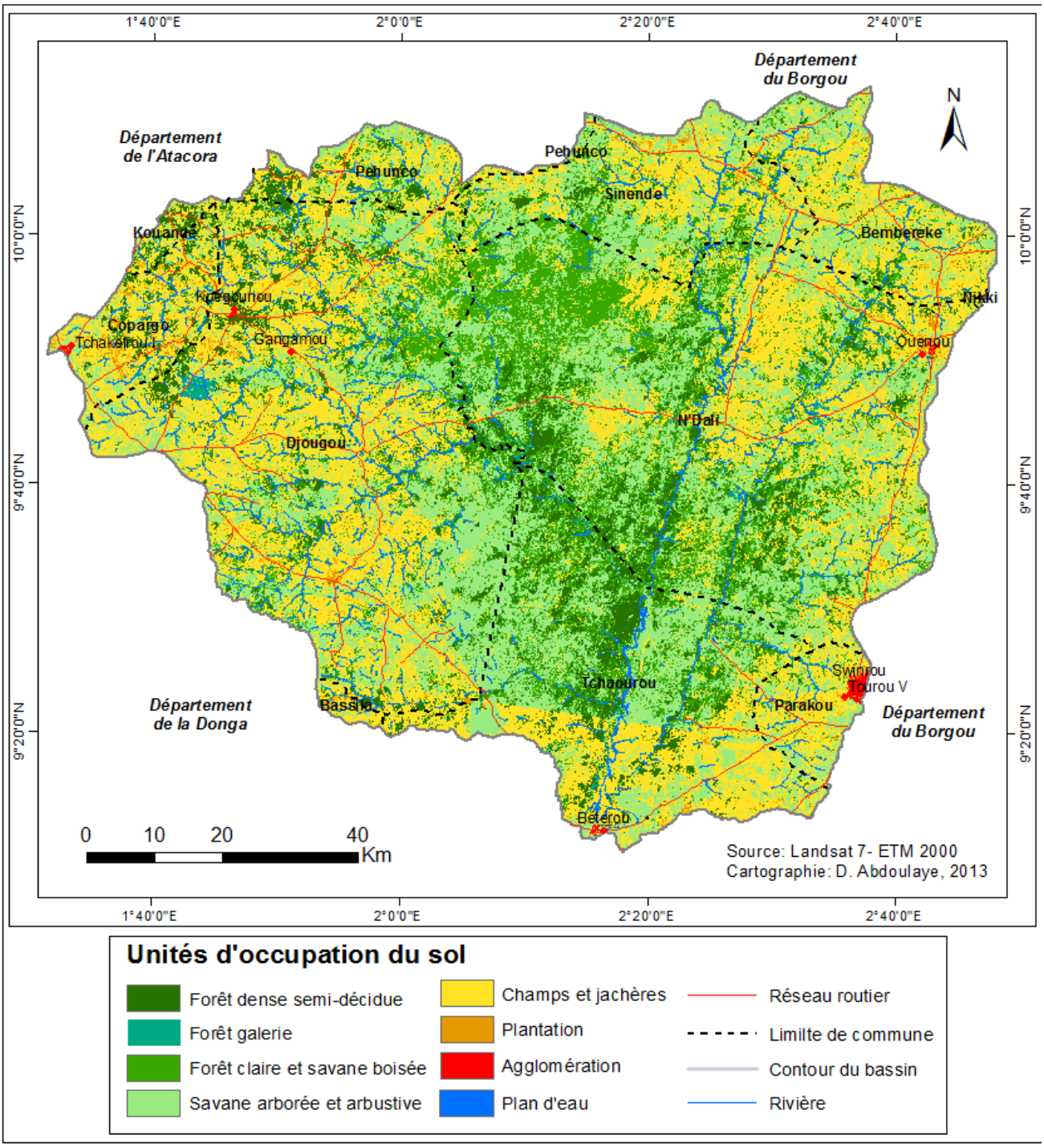


Figure 25: Occupation des terres en 2000

L'observation de la figure 25 montre que les formations naturelles se retrouvent presque au même endroit en 2000 qu'en 1990 dans le bassin versant. Ces formations naturelles sont constituées des unités à savoir des forêts denses sèches, des forêts galeries, des forêts claires et savanes boisées et des savanes arborées et arbustives. Des

mosaïques de champs et de jachères et des agglomérations ont été également identifiés dans les périphéries du bassin versant.

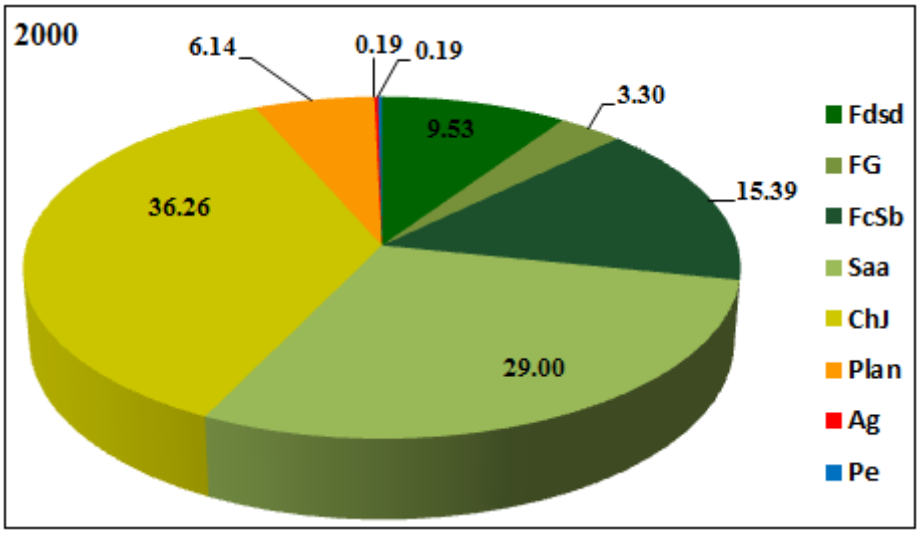


Figure 26: Distribution des différentes unités d'occupation des terres en 2000 (en pourcentage de la surface totale)

Légende

Fdsd : Forêt dense Semi-décidue; FG : Forêt galerie ; Fcsb : Forêt claire et savane boisée ; Saa : Savane arborée et Savane arbustive ; Plan : Plantation ; chJ : champs et de jachères ; Ag : Agglomération ; Pe : Plan d'eau

L'analyse de la distribution des unités d'occupation des terres montre que :

- les secteurs de forêt dense semi-décidue couvrent une superficie de 96024,33 % hectares soit environ 9,74 % de la superficie totale,
- la forêt claire et la savane boisée s'étendent sur 155087,86 hectares de superficie estimée à 15,39 % du bassin versant,
- la forêt galerie s'étale sur une superficie de 33247 hectares représentant 3,30 % du bassin versant,
- la savane arborée et arbustive domine la répartition avec 337300,54 hectares soit 29 % de la totalité,
- les champs et jachère couvrent une superficie de 320353,19 hectares soit environ 36,26 % de la superficie totale,

- les zones de plantation couvrent une superficie égale à 61851,40 hectares soit un pourcentage de 6,14 % par rapport à la superficie totale,

- les zones d'agglomération et les surfaces d'eau représentent la plus petite portion, soit respectivement 0,19 % et 0,19 % de la surface totale du bassin versant.

4.1.3. Etat de l'occupation des terres en 2010

La distribution des unités d'occupation des terres en 2010 montre relativement la même distribution qu'en 2000. Les unités les plus répandues sont les champs et jachère et la forêt claire et savane boisée (fig. 27 et fig. 28).

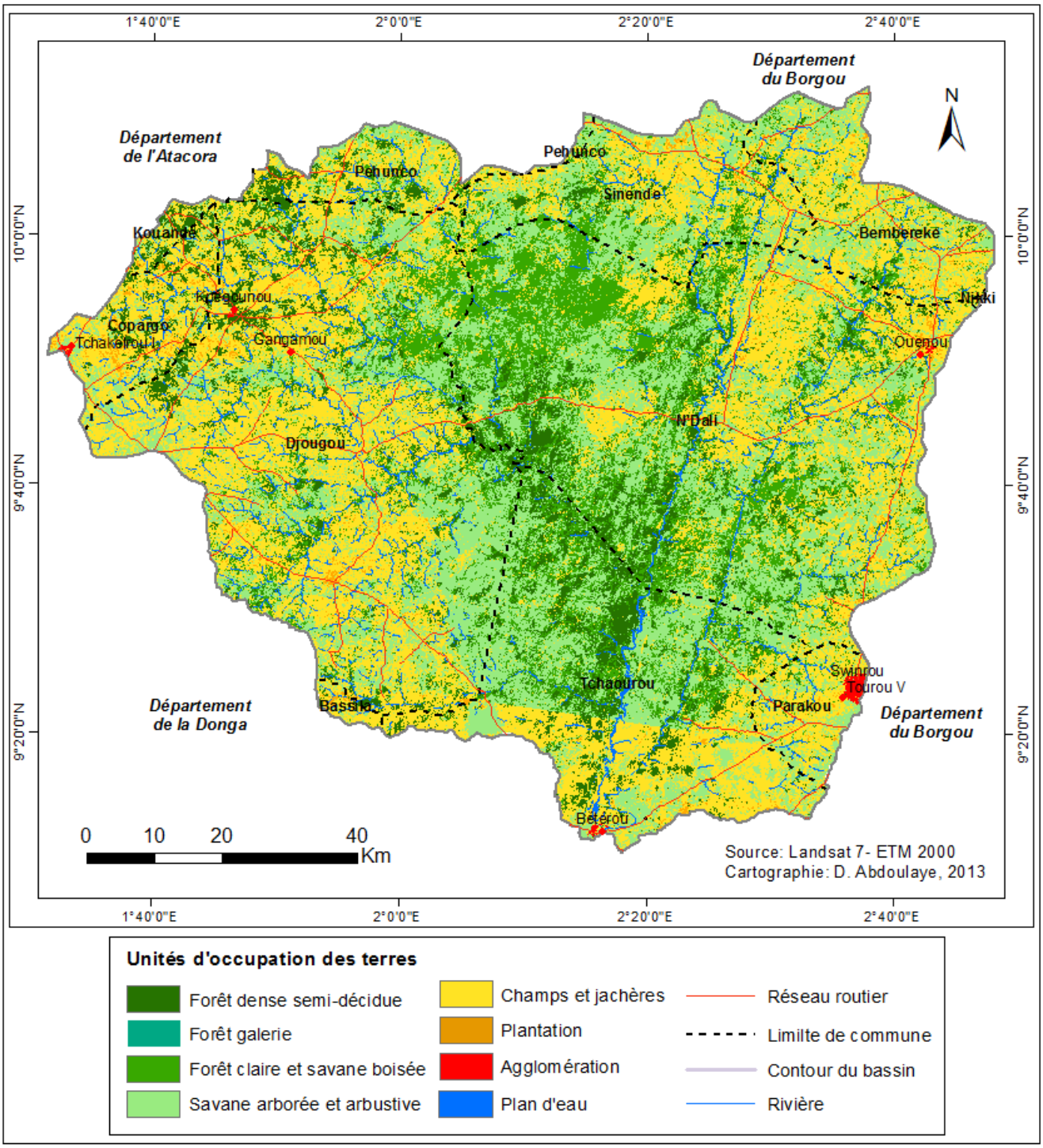


Figure 27: Occupation des terres en 2010

L'observation de la figure 27 d'occupation des terres en 2010 montre que le bassin versant de l'Ouémé est dominé par les mosaïques de champs et de jachères qui sont répartis un peu partout dans le bassin versant. Les formations du couvert végétal naturel sont constituées de minces forêts galeries, des forêts claires et de savanes boisées, des poches de forêt dense semi-décidue et de savanes arborées et arbustives.

Sur l'ensemble de la période d'analyse, de 1990 à 2010, l'analyse globale des unités montre que la répartition des principales classes d'occupation des terres a connu une évolution. Les principales zones de végétation naturelle restent concentrées sur l'axe Nord-Sud. Les surfaces agricoles sont dominantes au Nord-Ouest et au Nord-Est. Si l'on considère l'ensemble de la forêt galerie et de plan d'eau, aucun changement majeur ne s'est produit sur les 20 ans. Une analyse plus fine a permis cependant de mettre en évidence les changements survenus dans la dynamique de l'occupation des terres du bassin versant.

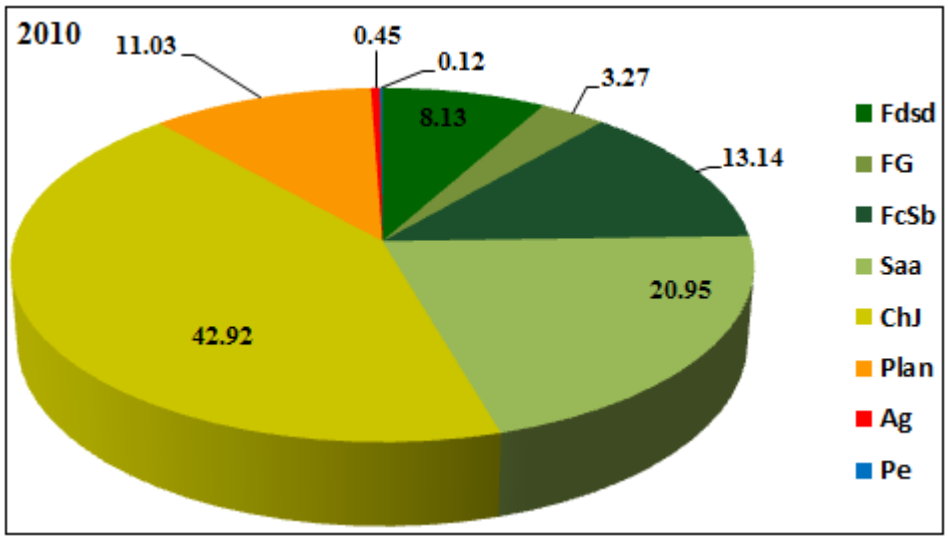


Figure 28: Distribution des différentes unités d'occupation des terres en 2010 (en pourcentage de la surface totale)

Légende

Fdsd : Forêt dense Semi-décidue; FG : Forêt galerie ; Fcsb : Forêt claire et savane boisée ; Saa : Savane arborée et Savane arbustive ; Plan : Plantation ; chJ : champs et de jachères ; Ag : Agglomération ; Pe : Plan d'eau

L'analyse de la figure 28 montre qu'en 2010 :

- les zones de forêt occupent 24,54 % du bassin versant, avec essentiellement 3,27 % de forêt galerie, la forêt dense semi décidue couvre 8,12 % et 13,07 % constituée de forêt claire et savane boisée ;

- les zones de savane arborée et arbustive représentent 20,95 % de la superficie totale du bassin versant ;

- les zones artificialisées (plantation, champ et jachère) qui témoignent de la forte anthropisation du milieu représentent à peu près 42,92 % de la zone d'étude ;

- les zones en eau représentent 0,12 % du bassin versant ;

- les agglomérations occupent 0,45 % de la surface totale soit environs 4521,04 hectares.

4.1.3. Dynamique de l'occupation des terres entre 1990 et 2000

La matrice de transition (tableau XI) générée par le croisement des cartes d'occupation des terres de 1990 et 2000 du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou montre une évolution au niveau des différentes unités d'occupation du sol.

Tableau XI: Matrice de transition des unités de l'occupation des terres de 1990 à 2000

NOM	FG	Fdsd	FcSb	Saa	Plan	chJ	Pe	Ag	Sup_90
FG	33247	**334**	**0**	**210**	143	**1020**	**24**	**0**	34978
Fdsd	0	89801	2814	1054	3762	6988	0	0	104419
FcSb	0	2043	108168	10981	15710	25893	0	25	162820
Saa	0	3846	24993	248164	5758	10718	0	49	398516
Plan	0	0	0	0	6351	3814	0	51	10216
chJ	0	0	19113	78000	30127	271577	0	47	293529
Pe	0	0	0	0	0	343	1575	0	1919
Ag	0	0	0	0	0	0	0	1273	1273
Sup_2000	33247	96024	155088	338410	61851	320353	1599	1098	1007671

Légende

Fdsd : Forêt dense Semi-décidue; FG : Forêt galerie ; Fcsb : Forêt claire et savane boisée ; Saa : Savane arborée et Savane arbustive ; Plan : Plantation ; chJ : champs et de jachères ; Ag : Agglomération ; Pe : Plan d'eau
90526 : Superficie en ha
Superficie demeurée stable entre 1990 et 2000
Sup_ 1990 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'l'occupation des terres en 1990
Sup_ 2000 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'l'occupation des terres en 2000

De la lecture du tableau XI, des transferts de l'occupation des terres à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé Supérieur à l'exutoire de Bétérou montre que de 104419 ha de Forêt dense Semi-décidue en 1990, 89801 ha sont demeurés stables. Le reste a été transformé en mosaïques de champs et de jachères (6988 ha), en plantation (3762 ha) et en savanes arborées et arbustives (1054 ha) en 2000. En ce qui concerne les forêts galeries, de 34978 ha en 1990, elles se sont converties en plantation (143 ha) puis en

mosaïques de champs et de jachères (1020 ha).Sur 162820 ha de forêts claires et savanes boisées en 1990, environ 108168 ha sont restées inchangées en 2000. Par ailleurs, 25893 ha et 15710 ha ont été respectivement transformés en mosaïques de champs et de jachères et en plantation. En effet, de 1990 à 2000,248164 ha de savanes arborées et arbustives sont demeurées intactes alors que 5758 ha ont été transformées en plantations et 10718 ha en mosaïques de champs et de jachères. Quant aux plantations qui occupaient une superficie de 10216ha en 1990, 6351 ha sont demeurés inchangées. Le reste a été transformé en mosaïques de champs et jachères (3814 ha) en 2000.

Il ressort qu'entre 1990 et 2000, que la zone d'étude reste peu stable (fig. 29). Les changements majeurs intervenus au cours de la période 1990-2000 concernent pour la plupart les zones de végétation naturelle, plus précisément les savanes arborées et arbustives dont une bonne partie des superficies ont été colonisées par les champs et jachères.

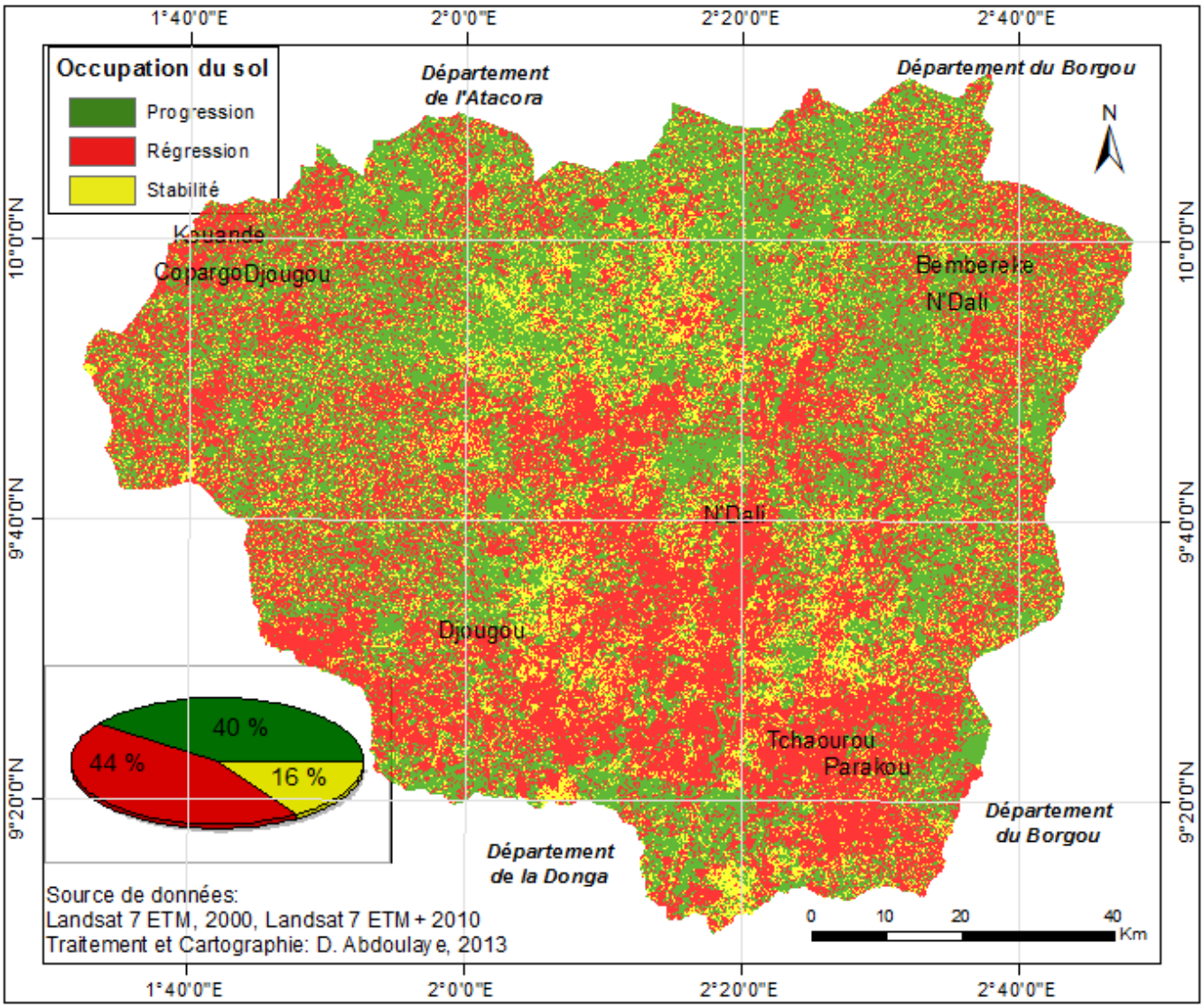


Figure 29: Etat de changement de l'occupation des terres entre 1990 et 2000

Globalement 15,53 % de la région n'ont pas subi de changements, ce qui correspond à une superficie de 156482,23 ha sur une surface totale de 1007671 hectares. À cela, s'ajoutent une superficie de 405091,75 ha soit environ 40,20 % de progression mais également 446097,02 ha soit 44,27 % régression.

4.1.4. Dynamique de l'occupation des terres entre 2000 et 2010

La matrice de transition des états d'occupation des terres révèle dans le bassin versant, des cas de progression et de régression (Tableau XII), des unités du couvert végétal et autres unités d'occupation des terres pendant la période de dix ans (2000 à 2010). Les unités d'occupation des terres qui ont connu une progression sont les formations anthropiques (mosaïques de champs et jachères, plantations et agglomérations).

Tableau XII: Matrice de transition des unités d'occupation des terres de 2000 à 2010

NOM	FG	Fdsd	FcSb	Saa	Plan	chJ	Pe	Ag	Sup_2000
FG	32906	**134**	**0**	**0**	73	**111**	**23**	**0**	33247
Fdsd	0	78767	3814	1154	2302	9987	0	0	96024
FcSb	0	2989	129611	2981	10710	15830	0	25	155088
Saa	0		88993	204003	22558	52841	0	69	338410
Plan	0	0	0	0	12351	49019	0	481	61851
chJ	0	0	0	3000	23108	254285	0	2847	320353
Pe	0	0	0	0	0	400	1199	0	1599
Ag	0	0	0	0	0	0	0	1098	1098
SUP_2010	32906	81889	222418	211138	71103	382473	1221	4520	1007671

Légende

Fdsd : Forêt dense Semi-décidue; FG : Forêt galerie ; Fcsb : Forêt claire et savane boisée ; Saa : Savane arborée et Savane arbustive ; Plan : Plantation ; chJ : champs et de jachères ; Ag : Agglomération ; Pe : Plan d'eau

74824 : Superficie en ha

Superficie demeurée stable entre 2000 et 2010

Sup_ 2000 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation des terres en 2000

Sup_ 2010 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation des terres en 2010

L'examen du tableau XIII montre que 338410 ha des savanes arborée et arbustive ont été convertis en plantations (22558 ha) et en mosaïques de champs et de jachères (52841 ha) entre 2000 et 2010. Pendant cette période, 204003 ha de savanes arborées et arbustives sont demeurées intactes. Par contre, 1946 ha de superficies ont été transformés en forêt dense semi-décidue. Par ailleurs, sur 96024 ha de superficie de forêt dense semi-décidue en 2000, 78767 ha sont demeurées stables. La conversion des autres superficies s'est faite en des forêts claires et savane boisée (3814 ha) et des mosaïques de champs et de jachères (9987 ha) en 2010. En effet, sur 155088 ha de forêts claires et savanes boisées en 2000, environ 124498 hasont restées inchangées en 2010 et plus de 15830 ha se sont transformées en mosaïques de champs et jachères. Les plantations qui avaient une superficie de 61851 ha en 2000, ont été réduites à 12351 ha du fait de l'évolution des mosaïques de champs et de jachères (49019 ha) en 2010.

Entre 2000 et 2010, la tendance générale montre une accélération des changements dans l'occupation des terres surtout dans les zones agricoles et les zones de végétation

naturelle (fig. 30).

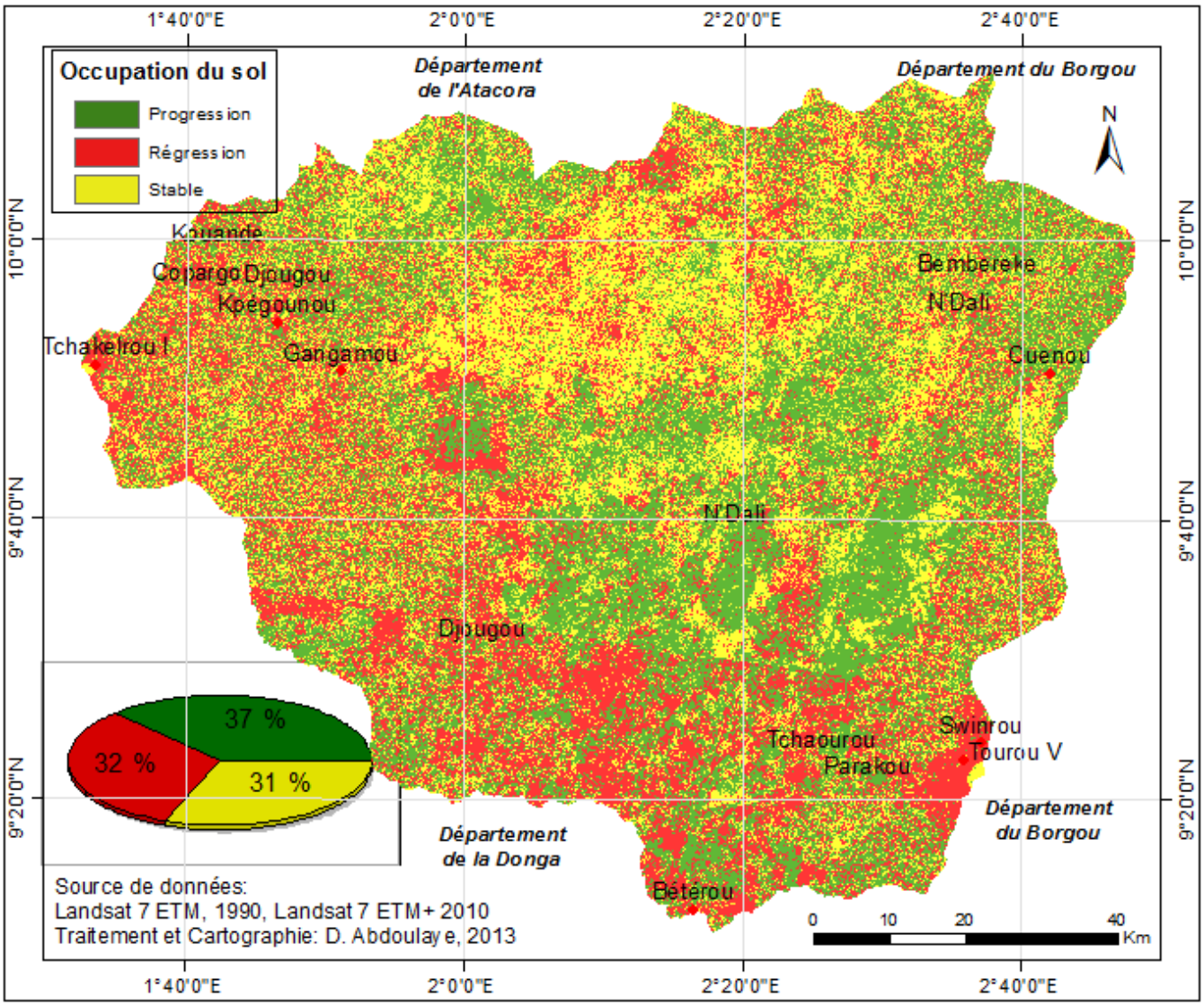


Figure 30: Etat de changement de l'occupation des terres entre 2000 et 2010

Pendant cette période, les changements obtenus ne sont pas aussi importants que durant la période précédente (1990-2000). Cependant, il faut noter que les progressions observées représentent 37,05 % de la surface d'étude et les surfaces en régressions occupent 31,71 %. L'occupation des terres pendant la période compris entre 2000 et 2010 montre une stabilité globale, 31,23 % soit environ 156482,23 hectares.

4.1.5. Dynamique des unités de l'occupation des terres entre 1990 et 2010

La conversion des formations végétales et autres unités d'occupation des terres de 1990 à 2010 a été synthétisée par la matrice de transition (Tableau XIII).

Tableau XIII: Matrice de transition des unités d'occupation des terres de 1990 à 2010

NOM	FG	Fdsd	FcSb	Saa	Plan	chJ	Pe	Ag	Sup_90
FG	32906	484	0	0	1273	231	84	0	34978
Fdsd	0	78867	9814	2154	3302	10282	0	0	104419
FcSb	0	1043	147498	2981	12710	17563	0	25	162820
Saa	0	1496	65105	198003	12358	36546	0	69	398516
Plan	0	0	0	0	8351	1559	0	306	10216
chJ	0	0	0	8000	33108	315513	0	2847	293529
Pe	0	0	0	0	0	780	1138	0	1918
Ag	0	0	0	0	0	0	0	1273	1273
SUP_2010	32906	81890	222418	211138	71103	382473	1222	4521	1007671

Légende

Fdsd : Forêt dense Semi-décidue; FG : Forêt galerie ; Fcsb : Forêt claire et savane boisée ; Saa : Savane arborée et Savane arbustive ; Plan : Plantation ; chJ : champs et de jachères ; Ag : Agglomération ; Pe : Plan d'eau

90526 : Superficie en ha

Superficie demeurée stable entre 1990 et 2010

Sup_ 1990 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'l'occupation des terres en 1990

Sup_ 2010 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'l'occupation des terres en 2010

L'analyse des transferts de l'occupation des terres à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé Supérieur à l'exutoire de Bétérou montre que de 104419 ha de Forêt dense Semi-décidue en 1990, 78867 ha sont demeurés stables. Les restes ont été transformés en mosaïques de champs et de jachères (10282 ha), en plantation (3302 ha) et en savanes arborées et arbustives (2154 ha) en 2010. En ce qui concerne les forêts galeries, de 34977,88 ha en 1990, elles se sont converties en plantation (1273 ha) puis en mosaïques de champs et de jachères (231 ha).Sur 162025 ha de forêts claires et savanes boisées en 1990, environ 128498 hasont restées inchangées en 2010. Par ailleurs, 17563 ha et 12710 ha ont été respectivement transformés en mosaïques de champs et de jachères et en plantation. En effet, de 1990 à 2010,198003 ha de savanes arborées et arbustives sont demeurées intactes alors que 12358 ha ont été transformées en plantations et 36546 ha en mosaïques de champs et de jachères. Quant aux plantations qui occupaient une superficie de 10216ha en 1990, 8351 ha sont demeurés

inchangées. Le reste a été transformé en mosaïques de champs et jachères (1559 ha) en 2010.

Les végétations naturelles et les zones agricoles restent toujours les zones où les changements sont plus significatifs au cours de cette période (fig. 31).

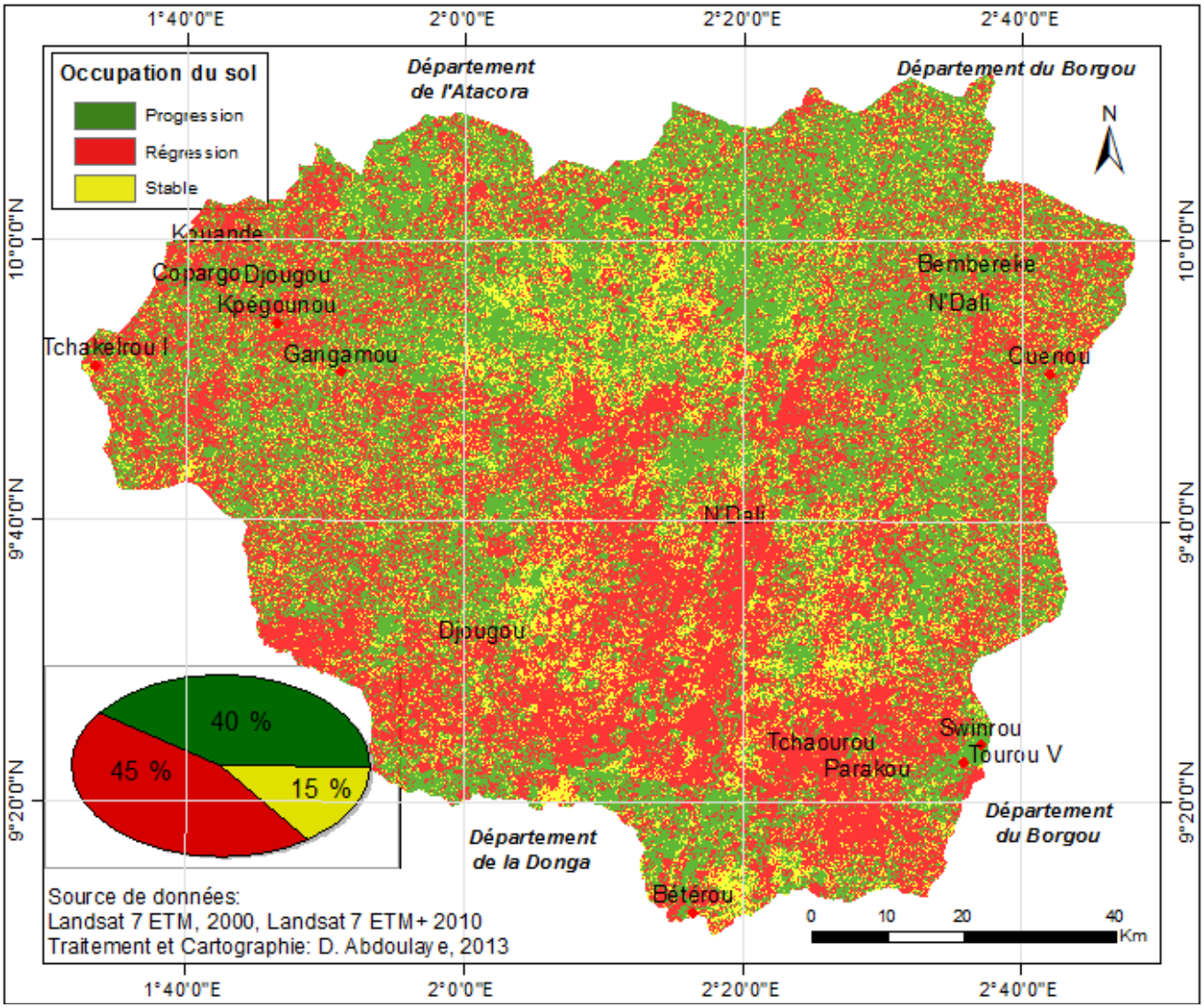


Figure 31: Etat de changement de l'occupation des terres entre 1990 et 2010

Les surfaces régressées couvrent 44,12 % soit environ 444601,15 ha du bassin. Cette régression des espaces est due à l'augmentation des zones d'habitat. En fait la plupart des espaces de végétation naturelle ont été remplacés par des exploitations agricoles ou aménagés pour accueillir de futurs logements. La zone d'étude enregistre une progression de 40,39 %. L'occupation des terres pendant la période compris entre 1990 et 2010 montre une stabilité globale de 15,49 %.

En résumé les dynamiques significatives observées dans l'occupation des terres du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou entre les périodes 1990-2000, 2000-2010 et 1990-2010, portent essentiellement sur les zones agricoles, les zones de végétation naturelle et les agglomérations. Pour les deux premières catégories la tendance est négative puisqu'on assiste à une artificialisation progressive de ces milieux du fait des actions anthropiques qu'exerce la population sur le milieu. Cela s'est traduit par une augmentation rapide et considérable des zones artificialisées constituées pour l'essentiel d'agglomérations.

Cette tendance à l'artificialisation de cette zone induit directement une augmentation de la densité de population dont la conséquence directe est la pression exercée sur les ressources forestières.

4.2. Projections de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

4.2.1. Comparaison des dynamiques réelle et simulée de l'occupation des terres entre 2000 et 2013

À l'échelle de la zone test (fig. 32), la comparaison entre l'occupation des terres dérivées du modèle SpaCelle et de la réalité, montre que la simulation effectuée à partir de la situation réelle de 2000, a bien rendu compte de la création d'agglomération, qui était bien prévisible le long de la route. La simulation a également bien localisé l'apparition de nouvelle zone de savane arborée et arbustive. Enfin, le développement de l'agglomération à proximité des routes et de la savane a été davantage noté dans la situation réellement observée.

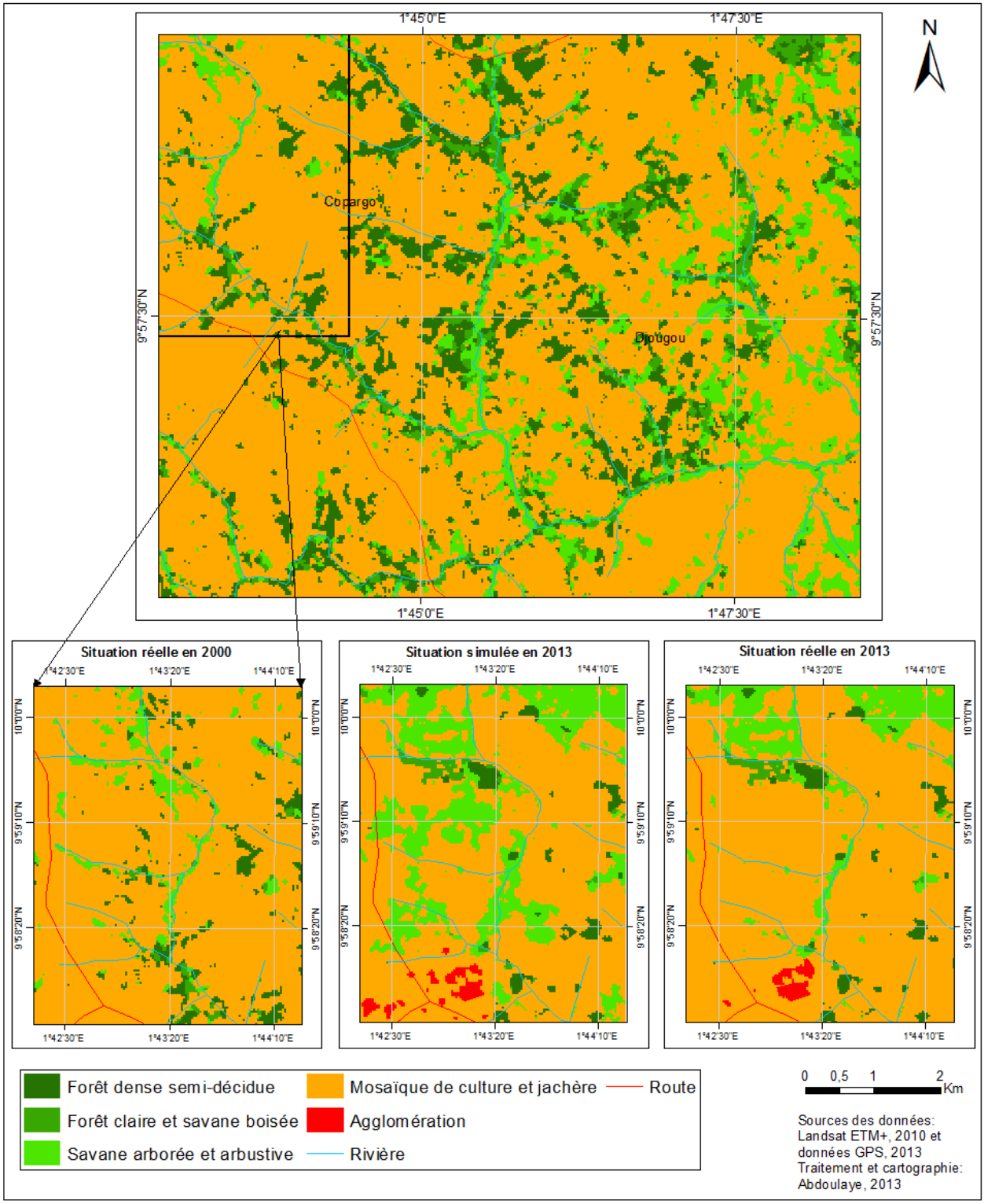


Figure 32: Exemple détaillé de la situation simulée avec la situation réelle en 2013

Plus précisément, la confrontation entre l'occupation des terres pour 2013 issue de la simulation et de la réalité, montre un indice de kappa fort (0,76). Lorsque la comparaison est effectuée pour chaque unité d'occupation, le niveau de précision varie entre 40 % et 79 % (tableau XIV). Les principales confusions concernent les

plantations et la savane arborée et arbustive qui intègrent par erreur 33,41 % de savane arborée et arbustive.

Tableau XIV: Matrice de confusion (en pourcentage) entre l'occupation des terres issue de la simulation et la situation réelle pour 2013

Situation simulée \ Situation réelle	FG	Fdsd	FcSb	Saa	Plan	ChJ	Ag
FG	**60.22**	9.64	0.03	0.18	0.11	4.54	0
Fdsd	27.91	**52.67**	2.06	2.31	1.26	6.12	4.44
FcSb	0.18	16.17	**40.65**	17.03	10.83	4.28	0.14
Saa	5.91	4.45	21.43	**58.98**	33.41	8.65	0.59
Plan	3.95	6.73	2.25	5.07	**51.57**	4.63	1.48
ChJ	0.86	3.25	29.45	14.25	1.28	**62.89**	13.5
Ag	0.9	7.12	4.17	2.18	1.58	8.97	**79.85**
Total	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Source : *Abdoulaye, 2013*

L'évaluation de la simulation à l'échelle locale montre que les grands types d'occupation des terres, en particuliers les champs et jachères et les agglomérations sont identifiés et ce, malgré une minimisation des zones de végétation naturelle et des surfaces de plantation qui sont très majoritaires dans le secteur d'étude.

La simulation effectuée à l'aide du modèle SpaCelle à l'échelle locale met en évidence que les règles de transition élaborées permettent de conserver la distribution spatiale des différentes unités d'occupation des terres d'une manière cohérente, en identifiant 86 % des pixels dont plus de 75 % sont bien classés.

4.2.2. Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "stabilité environnementale"

Les hypothèses en rapport au scénario de "stabilité environnementale" priorisent la préservation et une gestion contrôlée des ressources environnementales, il est supposable que certaines unités de l'occupation des terres pourraient voir leur durée de vie doubler ou tripler.

Les résultats cartographiques du scénario ont permis d'obtenir les figures suivantes (fig. 33 et fig. 34).

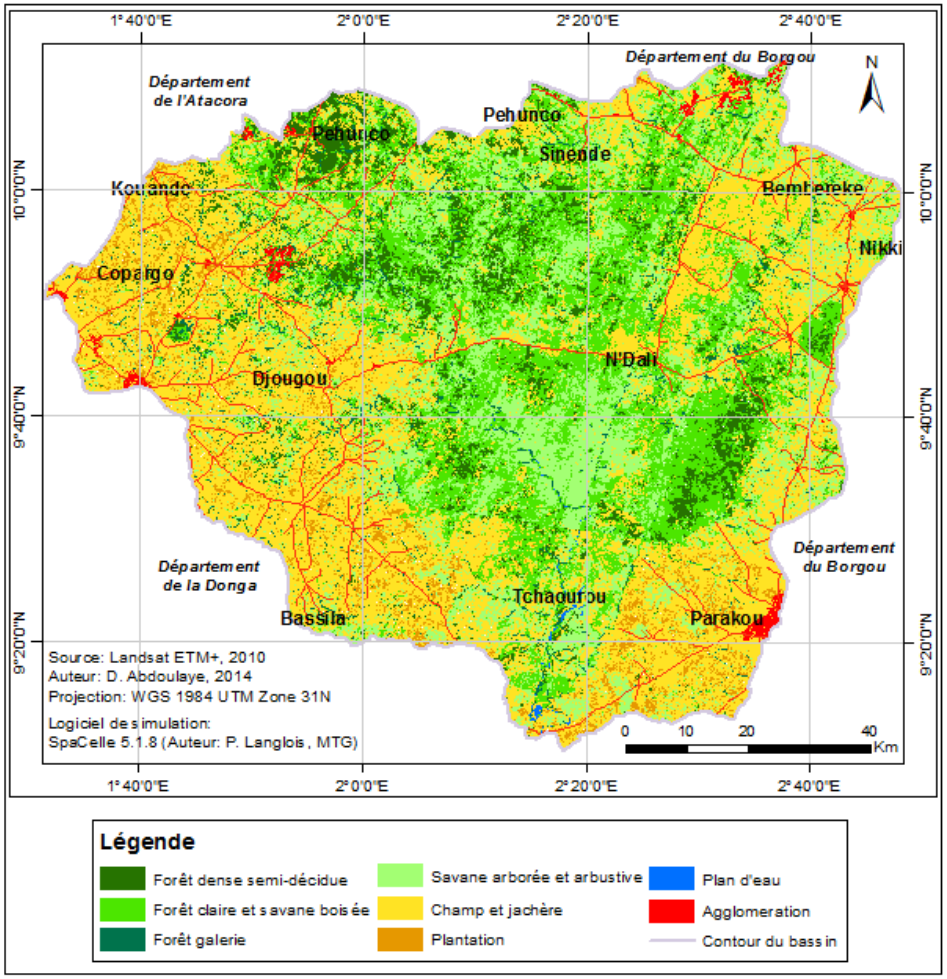


Figure 33: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "stabilité environnementale" à l'horizon 2020

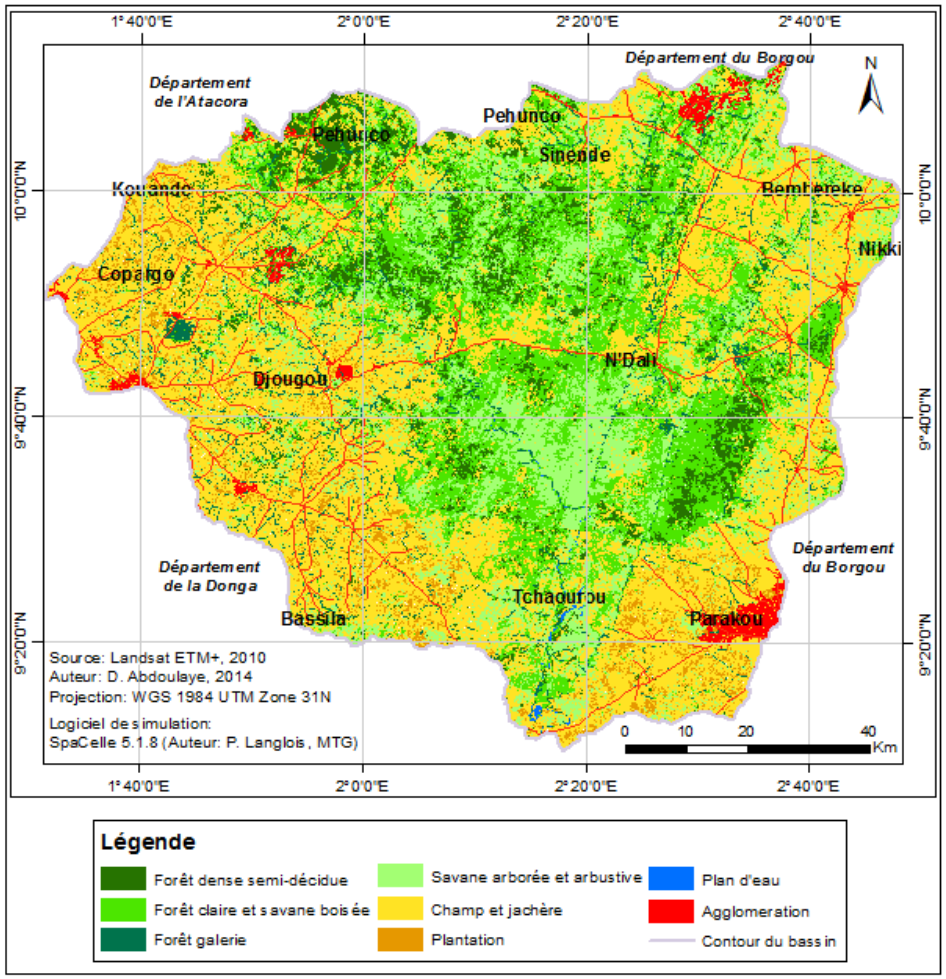


Figure 34: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "stabilité environnementale" à l'horizon 2030

Le scénario de « stabilité environnementale » vise une réduction des pressions sur les ressources végétales. Avec ce scénario la plupart des unités d'occupation des terres, notamment les formations naturelles et les formations anthropiques, ont présenté un état de régression ou de progression très peu sensible comme le montre le tableau XV.

Tableau XV: Projection de la superficie (en ha et en %) des unités de l'occupation des terres aux horizons 2020 et 2030 selon le scénario "stabilité environnementale"

Unités d'occupation des terres	2010		2020		2030	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Agglomération	4521.047	0.45	8676.51	0.86	15881.19	1.58
Champ et jachère	382473	40.96	424009.53	47.08	458026.89	50.45
Forêt claire et savane boisée	81889.69	8.13	78452.54	7.79	74754.35	7.42
Forêt dense semi-décidue	222418.2	7.07	220450.28	6.88	216785.79	6.51
Forêt galerie	32906	5.27	32481.00	3.22	32322.00	3.21
Plan d'eau	1221.938	0.12	1216.18	0.12	1211.18	0.12
Plantation	71103.01	7.06	95705.30	9.50	98971.87	9.82
Savane arborée et arbustive	211138.1	30.95	146679.98	24.56	109718.04	20.89
Total	**1007671**	**100**	**1007671**	**100**	**1007671**	**100**

Source : *Résultat du modèle Spacelle, 2013*

Il est observé que la forêt dense semi-décidue, bien qu'en légère régression, de 22,07 % en 2010 à 21,88 % en 2020, pourrait être conservée jusqu'en 2030 (21,51 %). La même observation est faite pour la forêt claire et savane boisée (passant de 8,13 % en 2010 à 7,79 % en 2020 et à 7, 42 % en 2030) et la savane arborée et arbustive. Par contre, les champs et jachères connaîtront une progression entre 2010 et 2030.

4.2.2. Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario « tendance vers la catastrophe »

Sur la base des hypothèses émises par rapport au scénario « tendance vers la catastrophe », et considérant aussi les durées de vie des unités de l'occupation des terres, l'analyse de ce scénario permet de faire les constatations au niveau des unités d'occupation des terres.

La projection sur la base de ce scénario révèle que les formations végétales vont pratiquement disparaître au profit des champs et jachères et des agglomérations (fig. 35 et fig. 36).

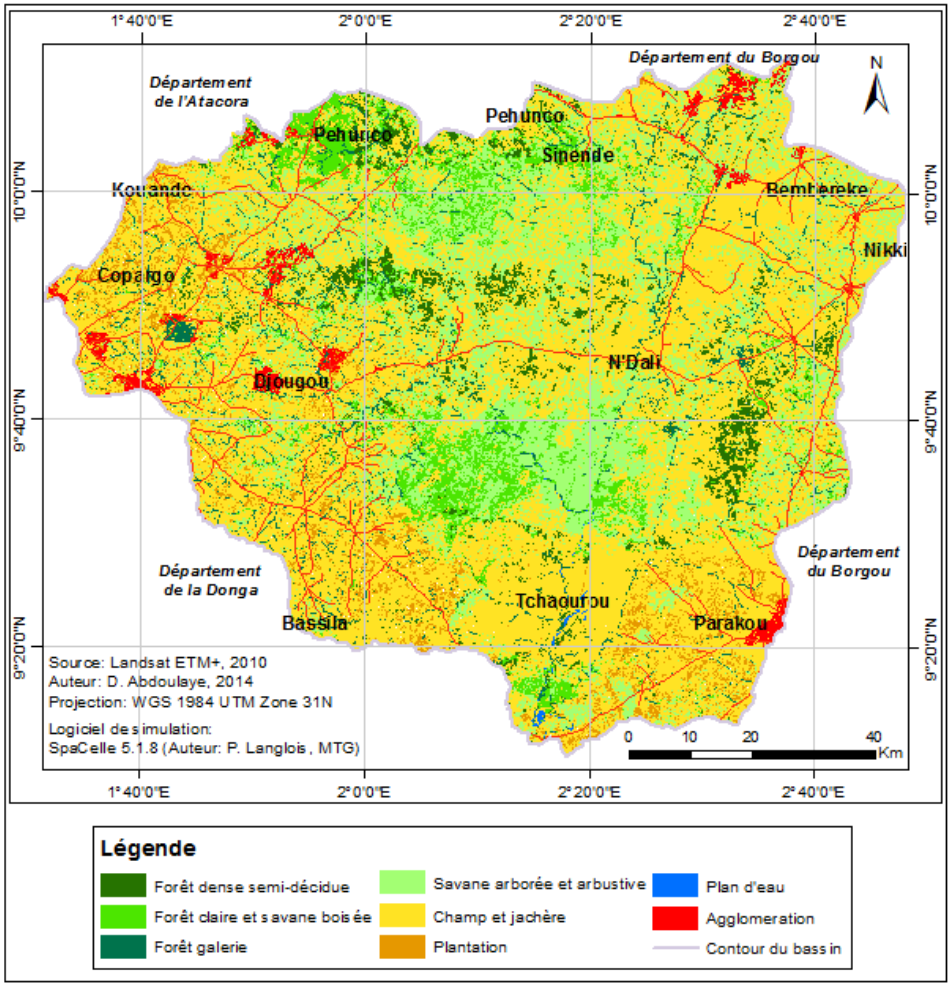


Figure 35: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "tendance vers la catastrophe" à l'horizon 2020

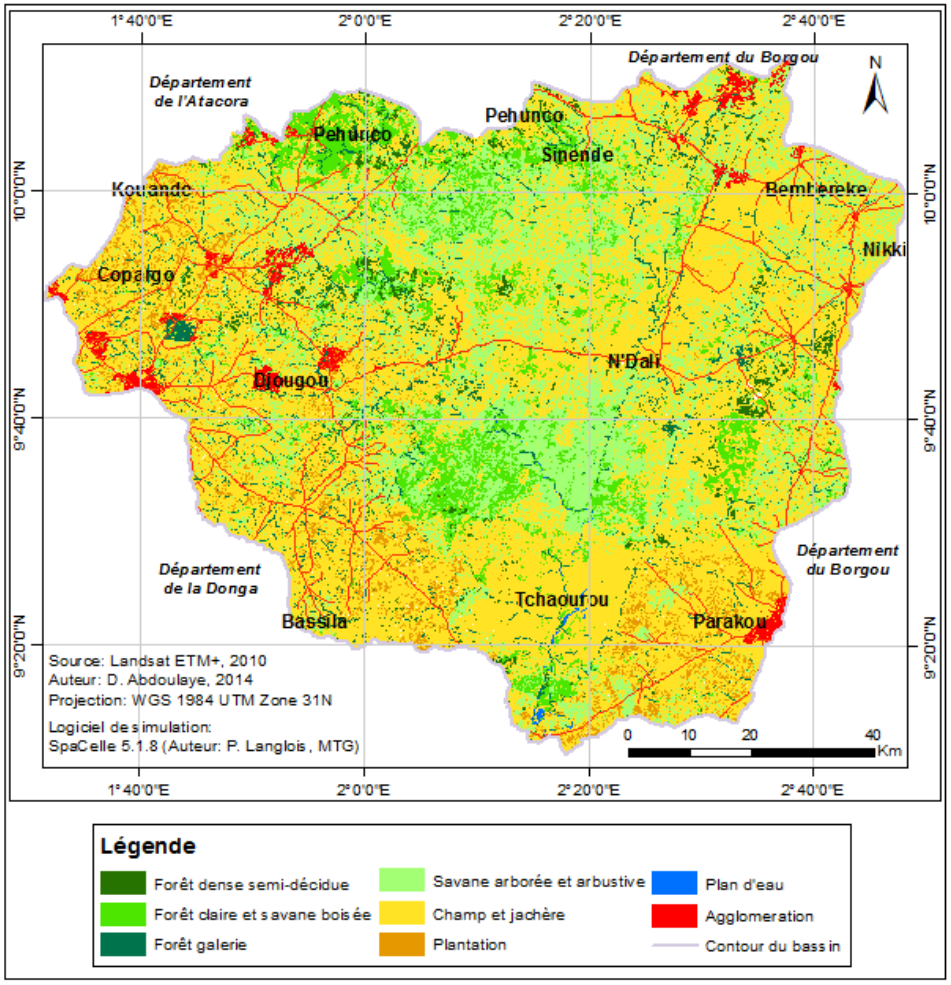


Figure 36: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "tendance vers la catastrophe" à l'horizon 2030

L’analyse de ces figures montre qu’en 2020, les champs et jachères vont s’étendre. En 2030, cette tendance va se consolider davantage, mais suivie d’une forte extension des plantations. Pendant cette même année, la régression des formations naturelles continuera progressivement au fur et à mesure que l’on évolue du Nord vers le Sud. En 2030, le phénomène d’anthropisation du milieu va davantage s’accentuer aux dépens des formations végétales naturelles. L’état d’évolution des unités d’occupation des terres pour le scénario "tendance vers la catastrophe" est présenté dans le tableau XVI.

Le tableau XVI présente en superficies (ha) et en proportion (%) les résultats de projection des unités d’occupation des terres dans le bassin versant.

Tableau XVI: Projection de la superficie (en ha et en %) des unités de l’occupation des terres aux horizons 2020 et 2030 selon le scénario " tendance vers la catastrophe "

Unités d'occupation des terres	2010		2020		2030	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Agglomération	4521.05	0.45	14872.92	1.48	29245.85	2.90
Champ et jachère	382473.03	40.96	565290.13	59.10	644000.88	63.91
Forêt claire et savane boisée	81889.69	8.13	68929.06	6.84	53447.94	5.30
Forêt dense semi-décidue	222418.17	7.07	76034.48	4.55	23569.61	2.34
Forêt galerie	32906.00	5.27	28385.00	2.82	26655.00	2.65
Plan d'eau	1221.94	0.12	1194.18	0.12	1159.18	0.12
Plantation	71103.01	7.06	87835.42	8.72	106751.91	10.59
Savane arborée et arbustive	211138.11	30.95	165129.80	16.39	122840.63	12.19
Total	**1007671**	**100**	**1007671**	**100**	**1007671**	**100**

Source : *Résultat du modèle Spacelle, 2013*

Dans le bassin versant (tableau XVI), la forêt dense semi-décidue qui occupait une proportion de 7,07 % en 2010 sera réduite à 4,55 % en 2020 et occupera 2,34 % en 2030. Les forêts claires et savanes boisées vont passer de 8,13 % en 2010 à 6,84 % en 2020 et à 5,30 % en 2030. Les savanes arborées et arbustives seront réduites de 30,95 % à environ 16,39 % en 2020 puis à 12,19 % en 2030. Simultanément les agglomérations vont s’étendre de 0,45 % en 2010 à 1,48 % en 2020 puis à 2,90 % en 2030. De même les champs et jachères pourraient s’étendre de 37,96 % à 56,10 % en 2020 et puis à 63,91 % en 2030.

L’incidence des résultats de ce scénario développé est que dès à présent, il faudrait mettre en place une politique dynamique et volontaire de la gestion rationnelle du territoire. Les décideurs et les élus locaux doivent s’engager dans une vaste campagne de reboisement ou de reforestation qui ne se limitera pas seulement aux forêts classées, mais s’étendra aussi dans les domaines ouverts et naturels.

4.3. Discussion

4.3.1. Fonctionnement du modèle

L’étude prospective de la dynamique de l’occupation des terres dans le bassin versant de l’Ouémé s’est faite dans cinq unités paysagères. Le comportement des cellules de différentes unités de l’occupation des terres a été prédit dans les cinq unités paysagères. Le but est de diminuer la quantité de données à traiter par le modèle des automates cellulaires SpaCelle, afin d’obtenir des résultats fiables. La même méthode a été utilisée par Oloukoi (2013) dans quatre unités paysagères pour prédire dans un avenir moyen et lointain la dynamique de l’occupation des terres au centre du Bénin. L’utilisation du modèle permet de créer un système dynamique agissant sur des cellules (pixels) de forme régulières (carrées ou hexagonales). Ainsi, le fonctionnement du modèle dépend des jeux de vie des cellules et des relations de voisinage entre les cellules de base (conditions environnementales) qui agissent sur chaque cellule et peuvent prolonger ou abréger sa vie. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue l’action des facteurs anthropiques et économiques qui induit un impact sur les changements d’occupation et d’utilisation du sol (Mama et Oloukoi, 2010).

4.3.2. Production des cartes prédictives

Lors de la réalisation des cartes prospectives, un problème lié au fonctionnement du modèle a été mis en évidence. En effet, les changements vers les savanes arborées et arbustives sont largement sous-estimés dans les cartes présentées à la figure 6. Cela provient d’une limite du modèle à simuler les processus de changement d’un type d’unité d’occupation vers une autre, présentant des états intermédiaires, alors que c’est l’approche qui avait été adoptée d’un point de vue conceptuel (Langlois, 2001 ; Torrens et O'Sullivan, 2001 et Oloukoi, 2013). Le modèle SpaCelle estime, à partir des couches

d’occupation des terres, les règles de vie, les règles de transition et les quantités de changements futurs à partir d’une méthode probabiliste (aléatoire). Ainsi, entre 2010 et 2020, le modèle a constaté une régression (-0,07) des forêts denses ce qui d’un point de vue environnemental est possible au Bénin. Ceci pourrait s’expliquer par le fait que ces territoires sont des aires classées qui protègent non seulement les animaux mais aussi l’environnement tel que prévu dans les études de prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA-Bénin, 2001). Mais, ce recul des formations forestières denses pourrait être attribué aux feux de végétation récurrents. On peut donc déduire que les forêts denses dans le bassin versant ne bénéficient pas d’une bonne conservation.

N’ayant pas tenu compte de la transition des forêts de 2010 à 2030, la simulation des changements d’unité estimés par le modèle, n’est pas suffisante pour simuler la transition des forêts denses. Par ailleurs, des modifications importantes sont intervenues au niveau des agglomérations et des savanes arborées et arbustives. Une faible augmentation d’environ 0,44 % a été constatée au niveau des champs et jachères. Le scénario socio-économique développé par Oloukoi (2013), a abouti à des résultats similaires. Les formations végétales vont régresser au profit des agglomérations dans le centre du Bénin à l’horizon 2036. Les résultats confirment en partie les résultats du scénario *« environmental damaged »* développé par Orekan (2007) au sud du bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou. En effet, ce scénario prévoit uniquement une extension des espaces agricoles en 2025 sans faire cas des agglomérations. Ainsi, les résultats de la présente thèse complètent ceux existants sur le devenir des formations végétales, mais révèlent, qu’à côté des champs et jachères qui vont s’étendre, les agglomérations vont aussi contribuer intensément à la régression du couvert végétal. Dans une étude sur la dynamique d’occupation des terres, Mama (2002) a également prévu qu’à l’horizon 2025, les formations végétales au centre du Bénin passeront de 76 % en 1986 à 7 %. À l’inverse, les zones de cultures vont s’accroître de 24 % à 87 % pendant la même période de simulation.

Il y a abandon des aires forestières vers d’autres lieux de cultures tels que les savanes entre temps abandonnées pour une mise en jachère. Cette mise en jachère des terres cultivables, qu’elles soient modérées ou importantes montrent très bien une pratique de

l’utilisation du sol au Bénin puisqu’elle est observable pratiquement sur l’ensemble des unités paysagères entre 2010 et 2030.

L’abandon des aires forestières peut aussi s’expliquer par une migration des populations rurales vers d’autres régions. Cet abandon des aires forestières a donc maintenu les forêts denses sèches et les forêts claires.

D’un point de vue technique, le modèle prédit l’état des cellules à simuler pour une période future en se basant sur l’état initial et la force des cellules environnantes. S’il était en mesure de faire évoluer au cours de la simulation ces cellules en fonction des facteurs anthropiques et économiques, alors il serait adapté pour simuler les processus de changements d’état des cellules. En d’autres termes, ce modèle permet de simuler le « pattern paysager », et non les processus qui les produisent.

Conclusion

La dynamique de l’occupation des terres qui a fait l’objet de ce chapitre à révélé que de 1990 à 2010, les formations naturelles ont enregistré une régression générale de 2,25 %. A ce rythme, il va de soit qu’à l’horizon 2030, elles connaîtront davantage une régression des superficies. Ce qui veut dire qu’il n’aura pas de nouvelles terres à déchiffrer sinon les plus marginales à l’agriculture (Houndagba, 2015 ; Orékan, 2007). En considérant ces résultats, on peut déduire que la seconde hypothèse qui dit que les principales unités naturelles du couvert végétal connaissent une évolution régressive sous l’effet des activités anthropiques dans le bassin versant de l’Ouémé à Bétérou est vérifiée. Les deux méthodes utilisées dans ce chapitre, en exploitant la dimension temporelle des séries LANDSAT ETM, permettent de caractériser des classes de changement auxquels sont associées des dynamiques de végétation.

Ces résultats viennent enrichir ceux d’autres études (Oloukoi, 2013 et Dubos-Paillard, Guermond et Langlois, 2009 ; Mama, 2002) attestant de l’intérêt de ce type d’approche de détection des changements pour mettre en évidence des tendances sur l’évolution de l’occupation du sol. Pour la même échelle d’analyse, les méthodes basées sur le modèle des automates cellulaires "SpaCelle" sont peu différentes de la vérité terrain. Elles

présentent un potentiel pour détecter les changements à long terme se traduisant par les modifications plus subtils du couvert végétal.

Cependant, les méthodes utilisées ne peuvent supplantées l'approche de vérité terrain. Elles présentent un certain nombre de limites qu'il convient de présenter afin de mieux prédire les changements dans l'occupation des terres.

Le modèle des automates cellulaires, SpaCelle, fonctionne avec des règles de transition spatiales fixes. Par conséquent, l'espace arrivera à saturation avec le temps et donc ne permettra plus d'évolution. La principale limite du modèle est due au fait que la couche forêt dense sèche reste constante entre deux périodes. Ces limites permettent une analyse particulièrement fine des changements.

CHAPITRE V : VARIABILITE PLUVIOMETRIQUEET HYDROLOGIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des séries chronologiques de variables pluviométriques, hydrologiques au niveau du bassin versant. Il présente l'évolution des régimes pluviométriques moyens mensuels et annuels dans le bassin versant. Il aborde ensuite l'évolution dûà l'écoulement dans le bassin versant et enfin il analyse le bilan hydrologique de l'ensemble du bassin versant.

5.1. Etude de la variabilité pluviométrique dans le bassin versant

Elle est faite au pas de temps mensuel et annuel sur la période 1965-2010 pour analyser la variabilité climatique. Par ailleurs, la troisième phase de reprise pluviométrique survenue au cours des décennies 1990 et 2010 a été observée par Amani (2003), à partir de 1993 dans certaines régions de l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Man, Guiglo). Goula Bi *et al*. (2006) à travers leur étude ont souligné une reprise de la pluviométrie normale sur le bassin versant du N'zo à Kahin de 1994 à 2000. De même, Yao *et al*. (2005) a montré la reprise de la pluviométrie au cours de la décennie (1980-1989) dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire (Tabou et Tai).

Ces résultats montrent l'apport très important de la pluviométrie dans l'alimentation de la nappe souterraine à Bétérou. Ainsi, l'on comprend aisément les répercussions sur les ressources en eau souterraines lors d'une éventuelle diminution de la pluviométrie.

5.1.1. Champ moyen annuel de précipitations à Bétérou

Pour Fontaine et Janicot (1993), au moins deux facteurs indépendants responsables de la variabilité pluviométrique justifient ce fait : la position en latitude de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) et l'intensité de la convection. Les valeurs moyennes annuelles de précipitations oscillent de 1075 à 1275 mm sur la période 1965-2010 et suivant un gradient sud-est d'une part et sud-ouest d'autre part. La figure (fig. 37) ci-dessous présente la variation spatiale des champs de pluie moyenne annuelle dans le bassin versant de 1965 à 2010.

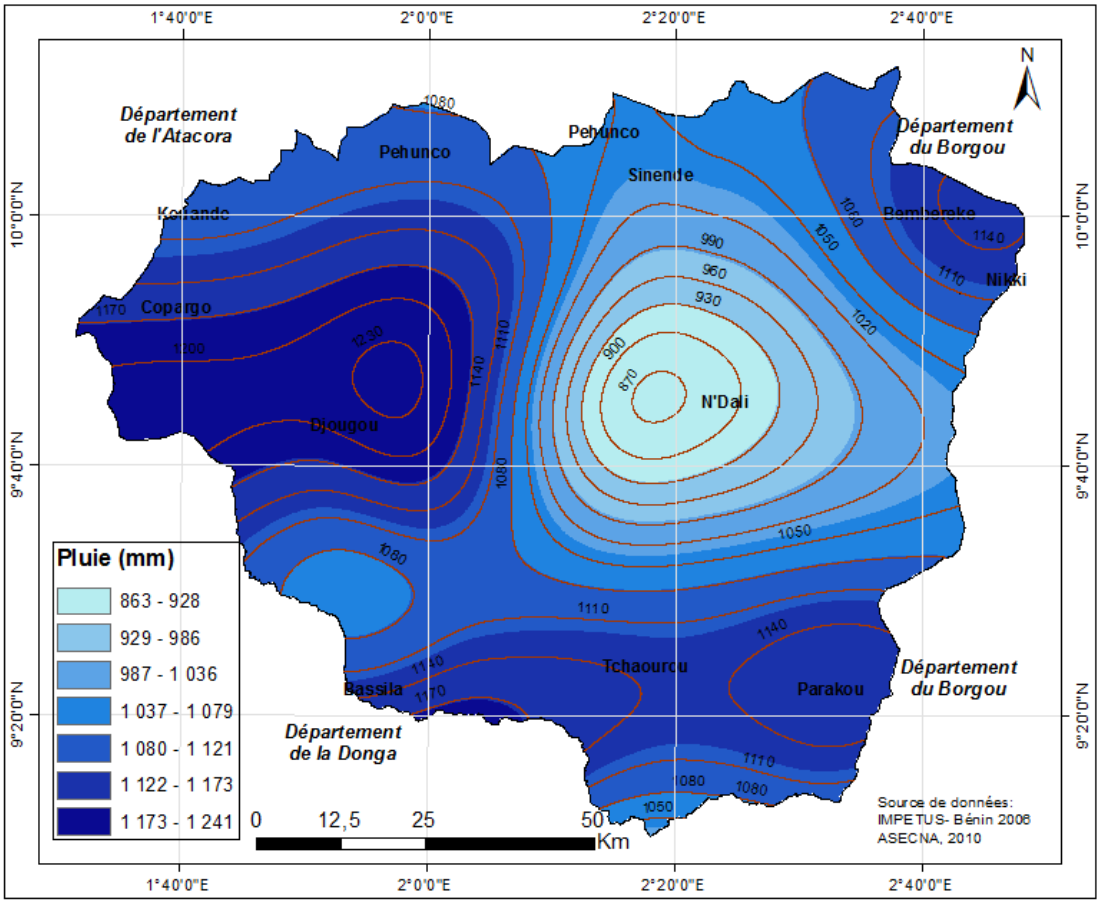


Figure 37: Variation spatiale des champs de pluie annuelle moyenne (1965 à 2010) sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

L'analyse de la figure 37 révèle que la station de Djougou est la plus arrosée (1225 mm) alors que Partago enregistre la plus faible valeur (1050 mm). Un champ modéré s'observe au centre (1100 mm) et le champ sec dans la région de Partago (1050 mm).

Ainsi, la répartition des totaux moyens annuels ne respectent pas un ordre géographique clair. En réalité, au nord-ouest se trouve une chaîne de montagne (Atacora) et le bassin versant semble en effet subir l'effet orographique. Ces résultats confirment ceux obtenus par Yabi en 2008. Par ailleurs, l'influence des facteurs géographiques locaux (la topographie et la couverture végétale) semble aussi expliquer cet état de chose (Afouda, cité par Yabi, 2008).

En effet, le champ pluviométrique (humide) est stationnaire sur toute la ville. Il est stationnaire dans le secteur est d'une part et ouest d'autre part autour de Parakou (1150 mm) et Djougou (1150). En cumulant les champs annuels, le champ moyen résultant présente un léger gradient est-ouest similaire à celui mis en évidence par Lawin (2007) sur les cumuls annuels de précipitation sur la haute vallée de l'Ouémé. Mais compte tenu

de la taille de la zone d'étude concernée ici, le gradient est très faible et corrobore les résultats obtenus par Lawin (2007).

Par ailleurs, cette répartition du gradient, plus forte au sud-ouest et au sud-est pourrait s'expliquer par les effets orographiques car les sommets varient ici entre 300 et 600 m, alors qu'au sud les altitudes varient de 250 à 350 m. Ces reliefs élevés jouent un rôle d'amplificateur de la pluviogénèse comme l'avait souligné (Amoussou, 2010) dans la partie togolaise. En outre, cette région est soumise à l'alizé saharien du nord-est qui est relativement frais et très sec (Le Lay, 2006). Ces ondes d'est, plus actives à la latitude de Parakou, sont génératrices de perturbations atmosphériques capables de donner des précipitations à caractère orageux.

Au total, le secteur d'étude est influencé par plusieurs centres d'action. Ainsi, les pluies de mousson surviennent avec la montée de la ZCIT. La ZCIT migre lentement et irrégulièrement vers le nord de février à avril. Cette remontée s'accélère en fin avril et le flux de mousson du sud-ouest pénètre le continent. A partir de mai jusqu'en septembre, la ZCIT se dirige vers le Sahel, et atteint les 17 et 18° N comme l'indique la figure (fig. 38).

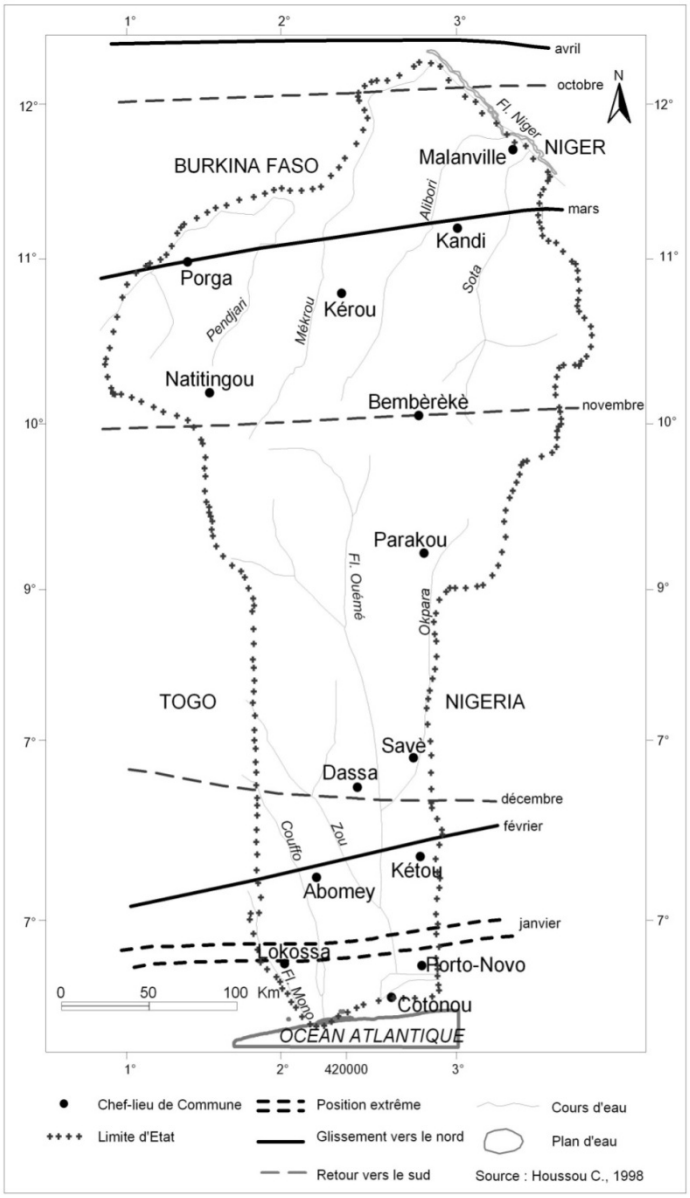


Figure 38: Schéma de circulation en surface en avril et septembre

En avril, les basses pressions couvrent le Sahara alors qu'en septembre, la ZCIT amorce son retrait vers le sud, qui est plus rapide que sa migration vers le nord, à cause de la différence thermique entre les masses océaniques et continentales. Deux régimes pluviométriques, directement associés aux mouvements méridiens de la ZCIT, sont dès lors distingués, à savoir une première saison dite océanique, essentiellement due à l'apport d'humidité à partir du Golfe de Guinée, et une seconde dite continentale après le saut de mousson, mettant en jeu une dynamique très différente (Le Lay, 2006).

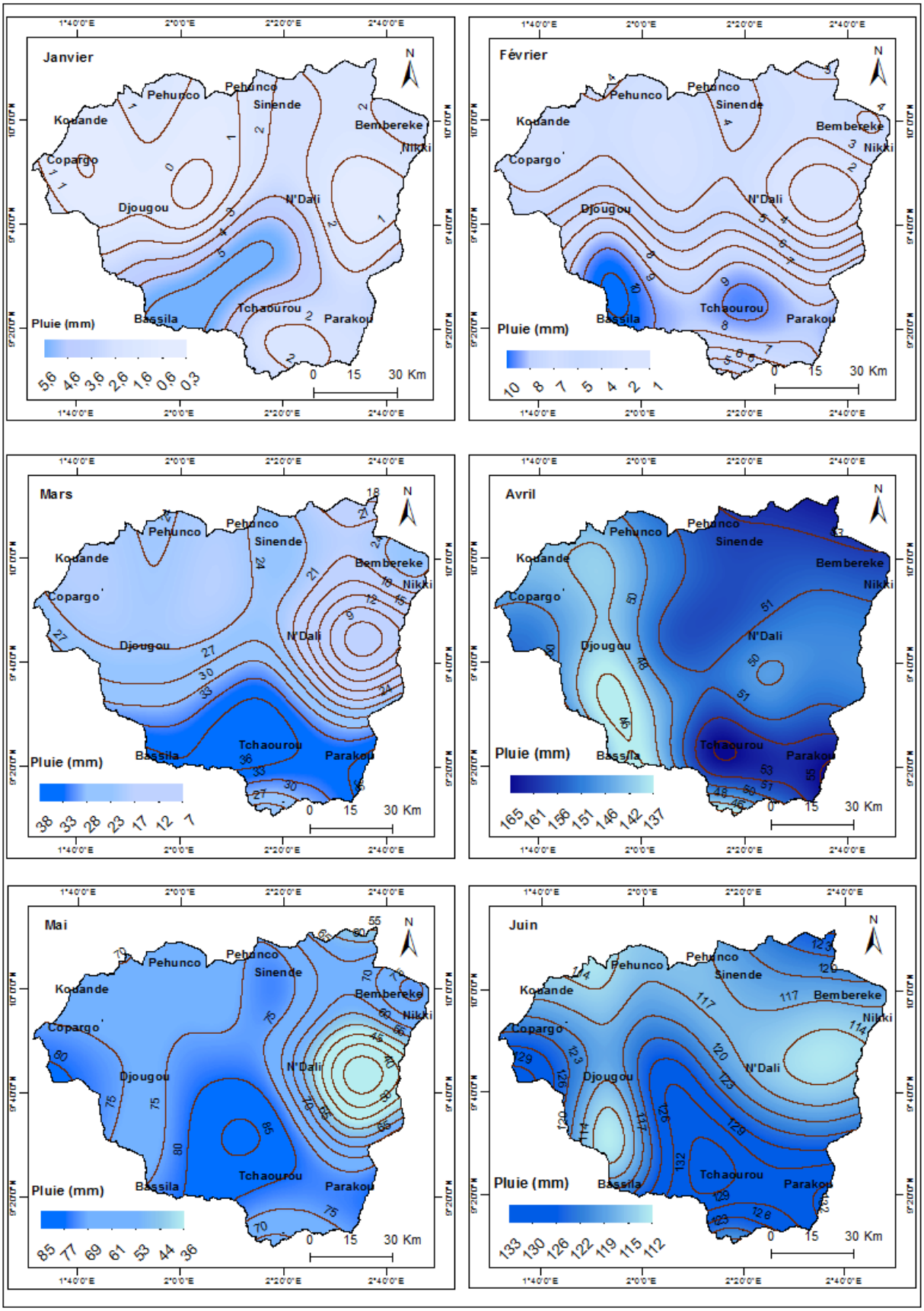
Ainsi, comme pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, le climat est régi par le déplacement du Front Intertropical (FIT), qui résulte de l'interaction de deux masses

d’air : l’air continental tropical, chaud et sec, venant du secteur nord-est à est, appelé le Harmattan (alizé continental venant du Nord Est) ; et l’air équatorial maritime, humide et instable, originaire de l’anticyclone de Sainte Hélène, appelé la Mousson (alizé maritime austral). La mousson ouest africaine est donc une réponse dynamique de l’atmosphère au contraste entre l’océan et les surfaces continentales sous les latitudes tropicales). L’élément majeur de la circulation atmosphérique au-dessus de l’Afrique de l’Ouest et donc du secteur d’étude est la circulation de mousson. La mousson africaine est une source vitale de pluie dans les régions du Sahel (Sultan et Janicot, 2004). Mais elle joue également un rôle important à l'échelle du globe. Or depuis trente ans, l'Afrique de l'Ouest est frappée par une sécheresse d'une ampleur et d'une durée sans précédent au XXème siècle. A l'origine de cette crise majeure, des perturbations de la mousson africaine (Lebel *et al*., 2005).

5.1.2. Répartition spatio-temporelle des précipitations moyennes mensuelles à Bétérou

Dans le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou, le climat est régi par le déplacement du Front Inter Tropical (FIT), qui résulte de l’interaction de deux (2) masses d’air : l’air continental tropical, chaud et ceux venant du secteur nord-est à est, appelé le harmattan et l’air équatorial maritime, humide et instable, originaire de l’anticyclone de Sainte-Hélène appelé la Mousson. Le FIT se déplace sur un axe nord-sud au cours de l’année (Boko, 1988 ; Tapsoba, 1997).

En effet, le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou appartient à l’Ouémé supérieur et bénéficie donc d’un climat soudanien pur au nord et tropical de transition au sud. Ainsi, en régime tropical pur ou nord soudanien, le bassin versant connaît deux saisons (Totin *et al*., 2007). Il en résulte que le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou est caractérisé par un climat de type soudanien avec une seule saison des pluies d’avril à octobre. La moyenne annuelle des précipitations est comprise entre 1200 et 1300 mm (Impetus, 2005). La figure (fig. 39) ci-contre présente la répartition spatio-temporelle des pluies moyennes mensuelles dans le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou sur la période 1965 à 2010.


Janvier
Pehunco
Sinende
Kouande
Bembereke
Nikki
Copargo
Djougou
N'Dali
Bassila
Tchaourou
Parakou
Pluie (mm)
5,6 4,6 3,6 2,6 1,6 0,6 0,3
0 15 30 Km
Février
10 8 7 5 4 2 1
Mars
38 33 28 23 17 12 7
Avril
165 161 156 151 146 142 137
Mai
85 77 69 61 53 44 36
Juin
133 130 126 122 119 115 112
N
1°40'0"E
2°0'0"E
2°20'0"E
2°40'0"E
10°0'0"N
9°40'0"N
9°20'0"N

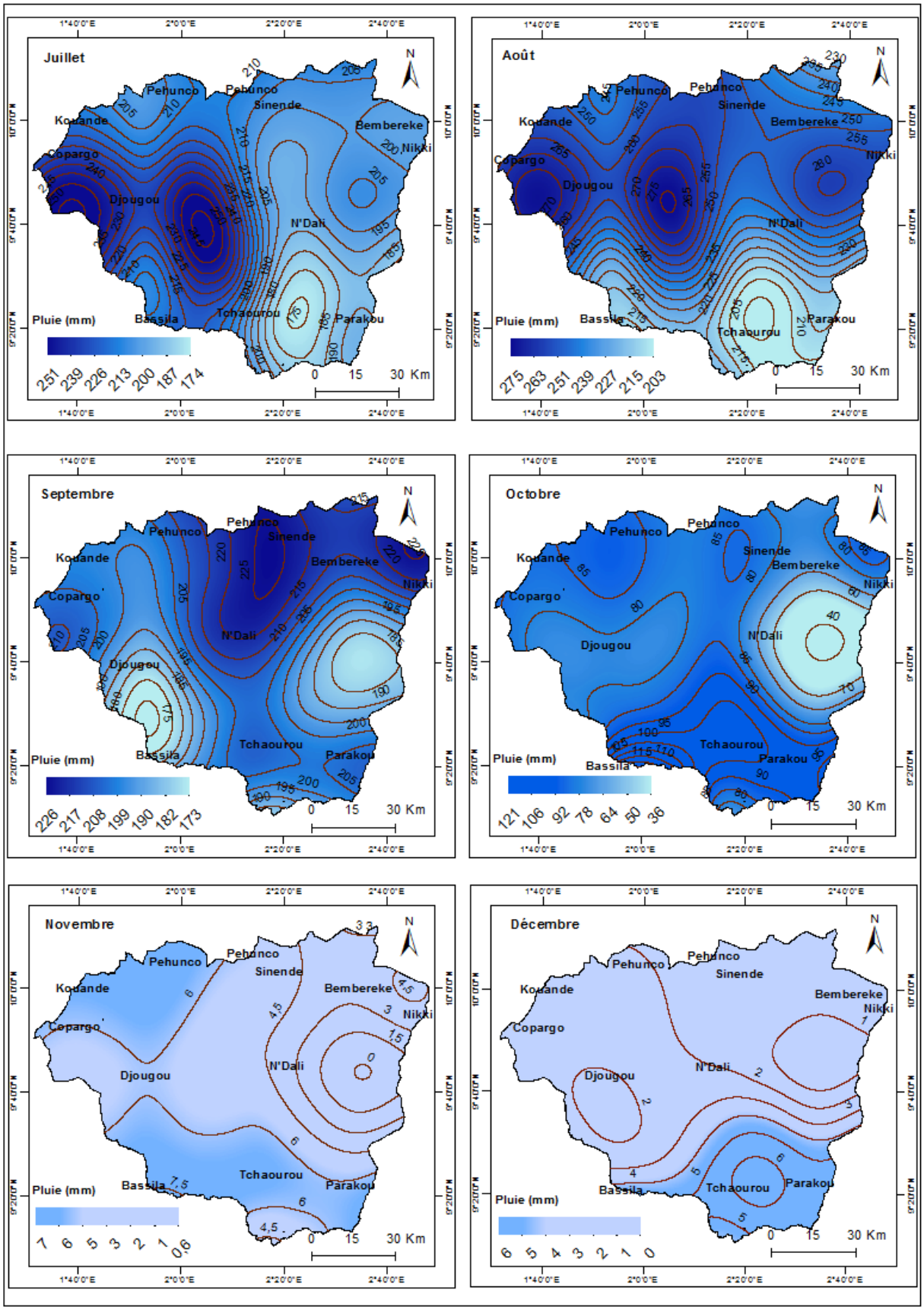


Figure 39: Champs de pluie moyens mensuels (1965-2010) dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

L’analyse de la figure 39, montre que le gradient des précipitations se révèle être sud-est et sud-ouest au début et en fin d’année, tandis qu’en août et septembre, c’est plutôt un gradient nord-sud qui est observé. 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 ou moins arrosée (novembre-mars) qui s’appliquent quasiment à l’ensemble du bassin versant au cours de la période 1965-2010.

En effet, dans le contrefort septentrional, le climat est marqué par une pluviosité forte supérieure à 1500 mm/an et des contrastes climatiques saisonniers relativement modérés (Akongnongbé, 2014). La distribution des climats est réglée par le déplacement saisonnier de masses d’air qui balaient la région. La trajectoire des anticyclones mobiles polaires devient plus septentrionale et provoque la remontée vers le nord de la mousson qui envahit tout le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou en juillet-août.

Le front intertropical, correspondant à la ligne de contact des deux masses d’air, se déplace du 8° parallèle au mois de janvier (extension maximale de l’anticyclone saharien) jusqu’au 20° parallèle courant août (extension maximale de la mousson).

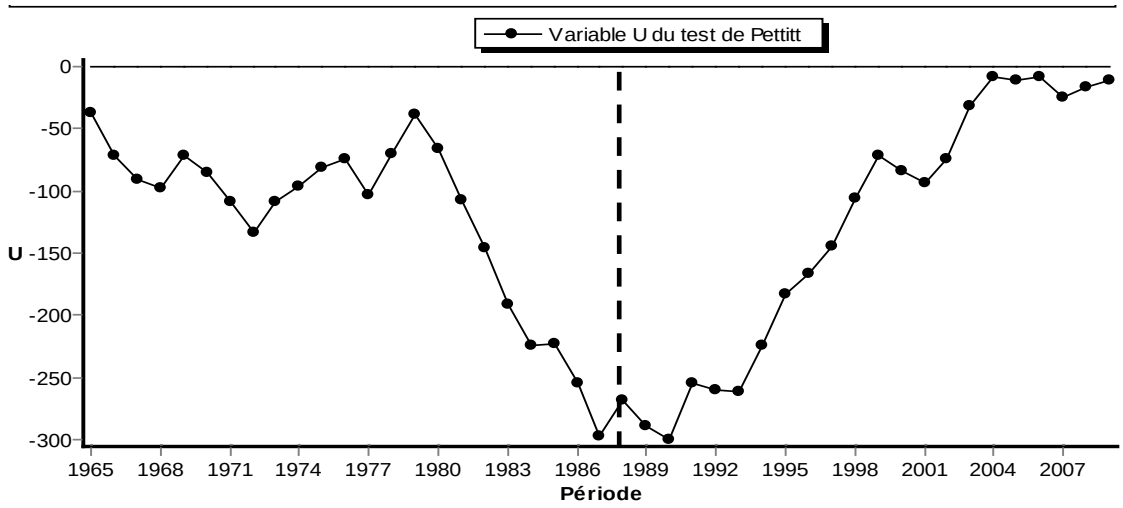
À l’inverse, pendant l’hiver boréal, l’anticyclone saharien mis en mouvement par le déplacement de l’anticyclone des Açores, descend vers le sud et prévient l’incursion de masses d’air humides porteuses de pluie (Houssou, 1998). Dans la zone du Harmattan, les précipitations sont quasiment absentes d’Octobre à Avril dans le secteur d’étude (Janicot, 1990).

5.1.3. Ruptures de stationnarité : variation et tendances pluviométriques

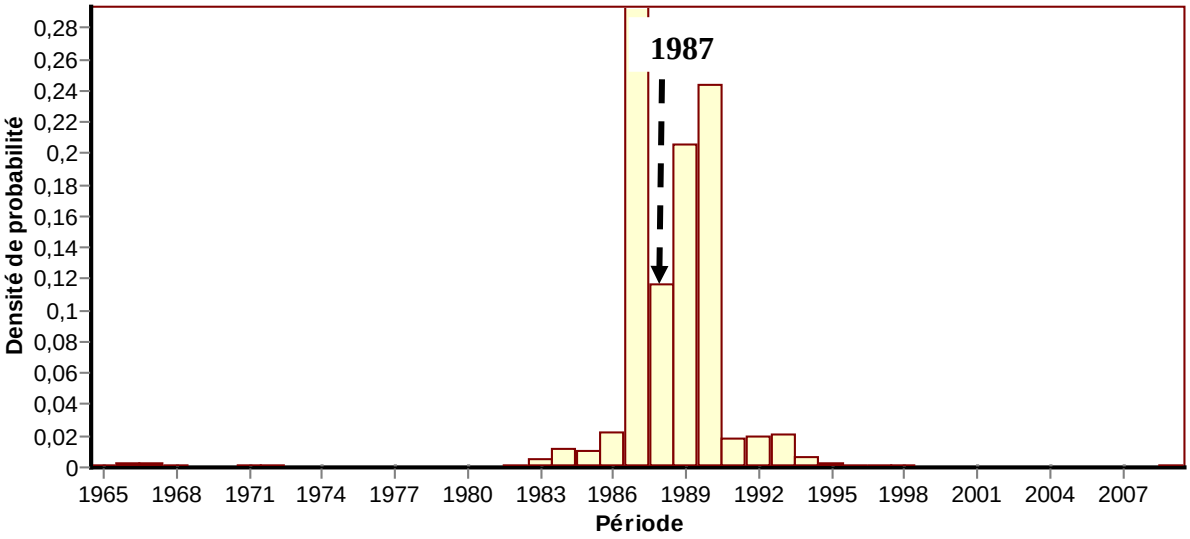
Les dates de ruptures primaires détectées sont liées à des probabilités de dépassement. Paturel *et al*. (1996, 1997, 1998), utilisant cette même méthode appliquée à un ensemble de stations pluviométriques couvrant l'Afrique de l'Ouest non sahélienne et Centrale, ont pu identifier des ruptures primaires majoritaires entre 1960 et 1979 ainsi que des ruptures autour de 1940. Ces résultats ne concordent pas avec ceux obtenus par cette thèse alors que c’est la même méthodologie qui a été adoptée. Mais les résultats de (Akongnongbé, 2014) dans le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bétérou ont confirmé les résultats. Ces différents résultats pourraient s’expliquer par la superficie de la zone d’étude.

La figure (fig. 40) illustre quelques paramètres de la rupture de stationnarité dans le

champ pluviométrique moyen du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.



(a) Evolution de la variable U du test de Pettitt



(b) Densité de probabilité « *a posteriori* » de la position d'un changement

Figure 40: Rupture de stationnarité dans l'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Le test de Pettitt a permis d'observer une modification dans l'évolution de la pluviométrie à partir de 1987. L'application du test de Pettitt complétée par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian a permis de détecter des ruptures (modifications) de stationnarité dans les séries pluviométriques à partir de 1987. Cette rupture, significative au seuil de 95 %, est en phase avec celles détectées par des travaux antérieurs entre la fin de la décennie 1960 et le début des décennies 1970 et 1980, dans la région ouest africaine et centrale (Albergel, 1987 ; Carbonnel *et al*., 1992 ; Paturel *et al*., 1996 ; Aka *et al*., 1997 ; Servat *et al*., 1998 et 1999 ; Mahé *et al*., 2001 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoin-Bardin,

2004). Par ailleurs, la procédure de segmentation confirme le caractère non aléatoire des deux séries pluviométriques en mettant en évidence des ruptures de stationnarité. Ces segmentations ont été obtenues au niveau de signification 0,05 du test de Scheffé.

Au Bénin, les travaux de recherche conduits dans plusieurs secteurs du Bénin sur la problématique climat-ressource en eau superficielle et souterraine Houndénou (1999), Vissin (2001 et 2007), Ogouwalé (2006), Yabi (2008), Totin (2005, 2007 et 2010), Ogouwalé (2013); Boukari, (1998), Linsoussi, (2000) ; Amoussou, (2005, 2010) ; Tossa, (2005) ; Vissin *et al*. (2006) ; Vissin, (2001 et 2007) ; Idiéti, (2009), Totin, (2009) attestent des ruptures intervenues dans les chroniques hydroclimatiques au cours des années 1970 et indiquent une tendance à la baisse des ressources en eau de surface, deux à quatre fois plus importante que celle de la pluviométrie dans les principaux bassins versants hydrologiques.

L'apparition d'années humides à partir de 1994, a été notée aussi en zone soudano-sahélienne sur le bassin versant du Niger à Koulikoro avec un excédent de 15 % et celui du Bani à Douna avec un excédent de 7 % par rapport à la moyenne de 1922-1997 (Mahé *et al*., 2000). Ainsi, les représentations cartographiques et les méthodes statistiques de détection de ruptures s'accordent donc sur la réalité d'une importante baisse de la pluviométrie sur l'ensemble de la zone non sahélienne d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Si l'amplitude du phénomène, apparu aux alentours des années 1970, n'est pas uniforme, toutes les régions ont cependant été touchées. En saison sèche comme en saison des pluies, toutes les périodes de l'année ont subi une diminution des précipitations.

Cette variabilité est en tout point comparable à ce qui avait été décrit jusque-là plus au nord dans le Sahel. Bien que la région étudiée soit qualifiée « d'humide », cette modification du régime pluviométrique ne peut qu'avoir des conséquences importantes sur la disponibilité des ressources en eau de surface. La fluctuation interannuelle de la pluviométrie est assez importante sur le bassin versant. Toutefois, c'est la manifestation à l'échelle saisonnière de la variabilité climatique qui en augmente l'effet. Ceci n'est donc pas sans conséquence sur le régime moyen mensuel des précipitations sur le bassin versant sur les deux sous-périodes 1965 à 1987 et 1988 à 2010. La figure (fig. 41) présente la variation saisonnière des précipitations sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou de 1965 à 2010.

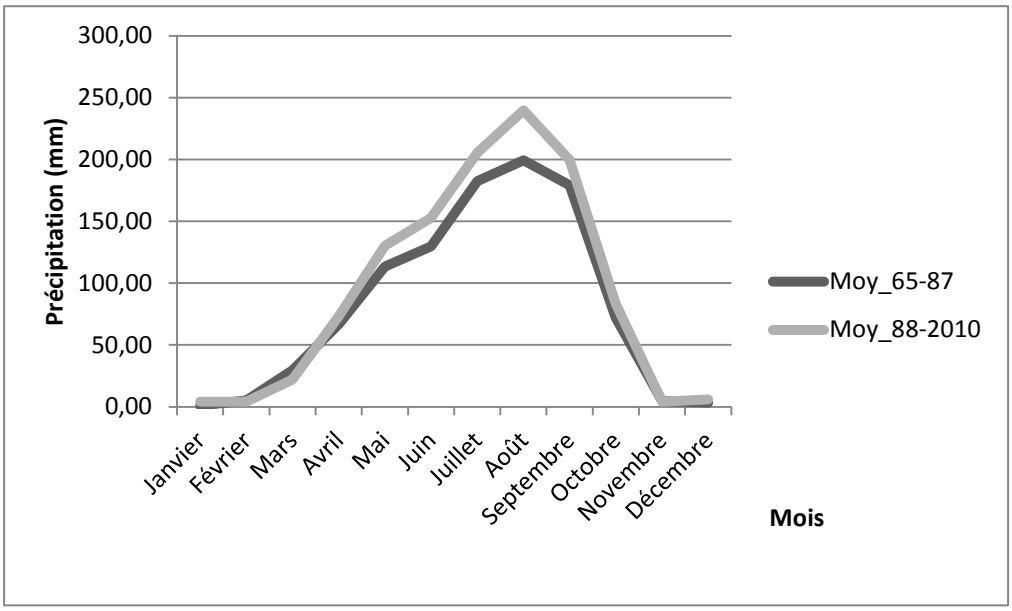


Figure 41: Variation des pluies moyennes mensuelles par sous périodes sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Le régime mensuel de la seconde sous période (1988-2010) montre une augmentation des lames d'eau précipitée par rapport à la première sous période (1965-1987). Cette hausse est remarquable au cours des mois sensibles de juin, juillet, août et septembre. Ces mois correspondent aux mois les plus humides donc à la période probable de recharge des eaux des cours d'eau dans le bassin versant et aussi à la recharge des réservoirs souterrains. Les mois secs que sont janvier, février, mars, novembre et décembre sont les mois de faible précipitation dans le bassin versant.

5.2. Evolution interannuelle de l'écoulement de surface dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Le débit moyen annuel est le témoin par excellence, de toutes les variations en matière de ressources en eau disponibles. La figure (fig. 42) présente l'évolution interannuelle de l'écoulement sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou de 1965 à 2010.

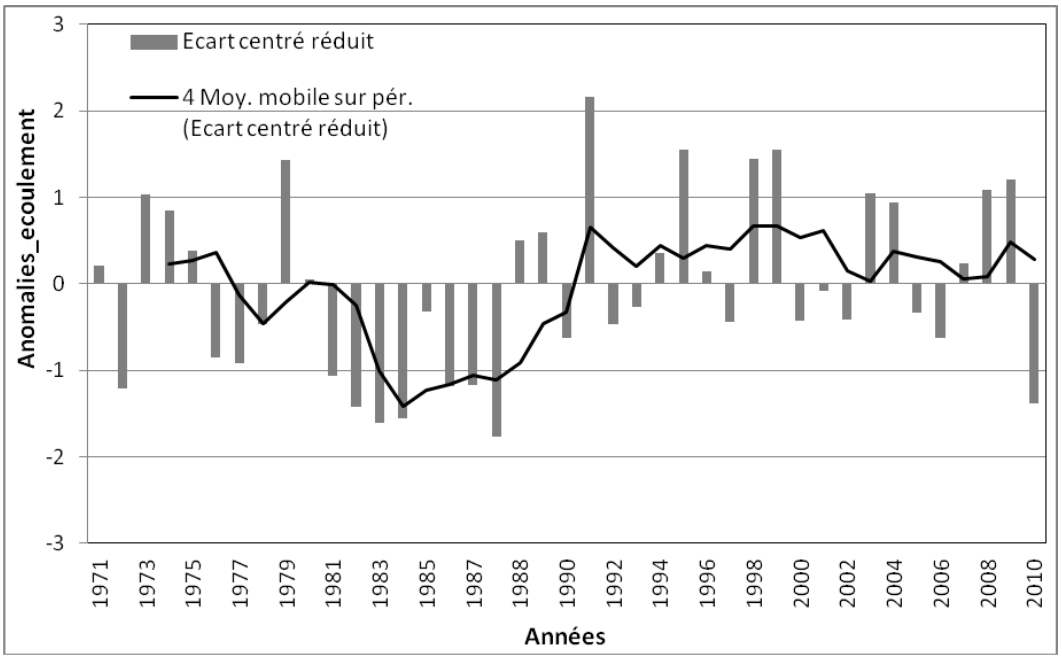


Figure 42: Evolution interannuelle de l'écoulement à Bétérou de 1965 à 2010

La figure 42, révèle une très grande variabilité de l'écoulement à Bétérou. Cette dynamique semble identique à celle de la pluie toujours sur la même période.

Pour Le Lay (2006), les écoulements apparaissent probablement après l'intensification des pluies liées au saut de mousson. L'écoulement est important au cours de la décennie 1960. Il connaît une diminution pendant la phase de récession pluviométrique (décennie 1969-1986) et une hausse pendant la phase de reprise pluviométrique (décennie 1987-2010) sur le bassin versant.

Le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou est caractérisé par des écoulements déficitaires au cours des années 1972 (39,43 mm), 1982 (24,10 mm), 1983 (11,95 mm), 1984 (14,89 mm), et 2010 (27,47 mm) et d'importants écoulements au cours des années 1967 (236,17 mm), 1968 (278,72 mm), 1991 (274,83 mm), 1995 (232,22 mm), 1999 (231,53 mm). Toutefois, il est à noter également qu'à Bétérou, l'écoulement minimal est important au cours de la décennie 1991 à 2010, qui est ici considérée comme la période de reprise pluviométrique. Quant à la variation mensuelle sur les sous périodes, (figure 38), elle révèle que l'écoulement a connu une baisse assez remarquable au cours de la sous période 1965-1987. Ceci signifie que la baisse pluviométrique des décennies 70 et 80 a eu des répercussions sur l'écoulement. Ces résultats concordent bien avec ceux déjà obtenus par plusieurs auteurs (Mahé et Olivry, 1995 ; Mahé et *al*., 2000 ; Vissin, 2007 ;

Amoussou, 2010 ; Totin, 2010) concernant la baisse pluviométrique des décennies 70 et 80 et ses répercussions sur les écoulements du bassin versant.

L'augmentation des écoulements dans la sous-période suivante (1988-2010) pourrait s'expliquer par :

- l'augmentation des apports hydriques dans le bassin versant pendant la sous période de reprise pluviométrique ;
- la dégradation du couvert végétal due à la pression anthropique qui se traduit par un encroûtement superficiel des sols occasionnant ainsi une baisse de l'infiltration et une augmentation de l'écoulement sur les pentes faibles.En effet selon Da Dapola (1993), par tassement, surtout sur les sols déstructurés par les labours et le piétinement du bétail, les particules fines (argile, limon) consituent un veritable ciment pour les grains de sable, les gravillons, les fragments de roches. Toute l'eau qui ne peut s'infiltrer déclenche alors un ruissellement de type aréolaire, puis pélluculaire. Ce type de ruissellement débarasse en partie lasurfacedu sol des particules libres ou libérés. Le sol qui se tasse sous le splash devient compact sur quelques mm à 2 cm. Cette croûte de battance peut être qualifiée de « croûte structurale ».

La figure suivante (fig. 43) présente l'évolution mensuelle de l'écoulement sur les sous périodes 1965-1987 et 1988-2010 à Bétérou.

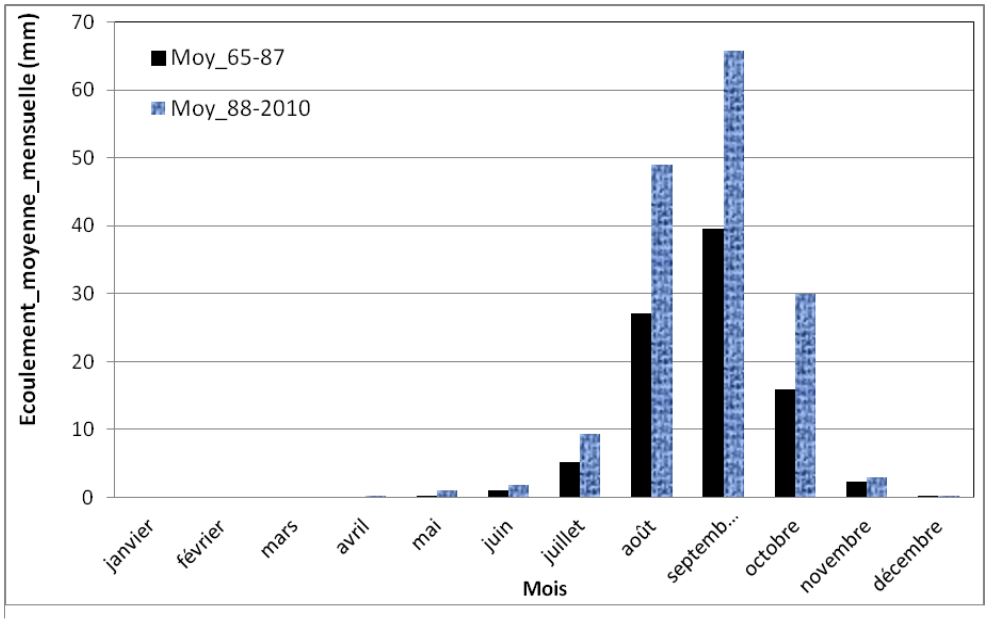


Figure 43: Evolution mensuelle de l'écoulement sur les sous périodes 1965-1987 et 1988-2010 à Bétérou

Pour une estimation quantitative de la corrélation entre précipitations et écoulements, le taux de baisse des écoulements correspondant à un taux donné de baisse de la pluie a été établi. Ainsi, les moyennes des valeurs annuelles de pluie et de lame écoulée sur les périodes 1965-1987 et 1988-2010 ont été calculées. Ces moyennes ont permis de déterminer les valeurs de taux de baisse en pourcentage.

5.2.4. Relations précipitations/débits dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

La complexité du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant mérite que dans le cas d'une étude comme celle-ci, l'on s'interroge sur les facteurs qui influencent significativement la transformation de la pluie en débit. Le coefficient de détermination a été utilisé pour apprécier le degré de liaison ou de dépendance qui existe entre les lames précipitées et les lames écoulées sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. La figure suivante (fig. 44) présente la corrélation pluie/débits sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou sur la période 1965 à 2010.

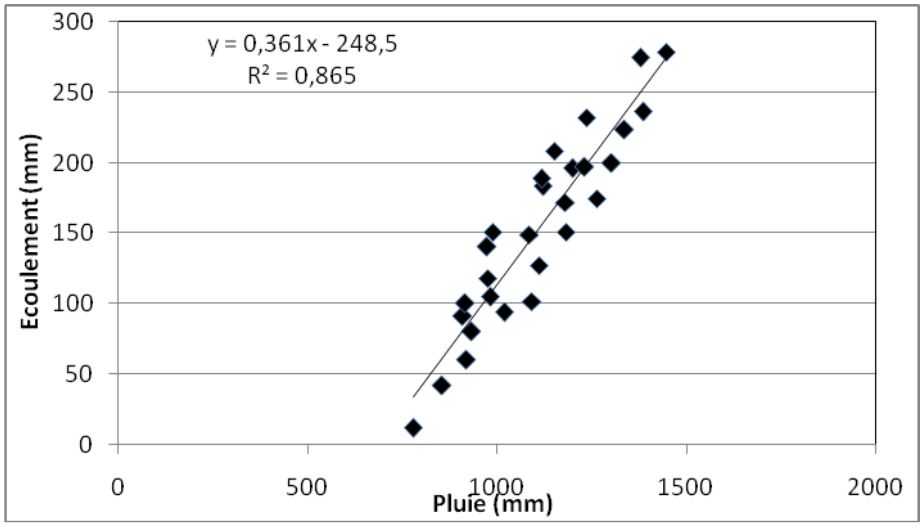


Figure 44: Corrélation écoulement /pluie dans le bassinversant du complexe de 1965 à 2010

L'application d'une courbe de tendance (polynomiale de degré 2) au nuage de points représentatif des lames écoulées et lames précipitées donne un coefficient de détermination $R^2 > 80$ %. En effet, l'écoulement n'a lieu que lorsque les précipitations atteignent la valeur 750 mm. Pour Zannou (2006), cette valeur est de l'ordre de 300 mm à Bétérou et confirme celles obtenues par Peugeot et *al*., 2005. Cette différence entre les

deux valeurs dans le même bassin versant s'explique non seulement par le temps de réponse du bassin versant mais aussi par la taille du réservoir.

Ceci corrobore bien les résultats obtenus par Amoussou (2010) dans l'ensemble du bassin versant Mono-Ahémé-Couffo. On peut donc conclure que la pluie influe bien sur l'écoulement mais ne constitue pas le seul paramètre déterminant. Ces résultats viennent confirmer ceux obtenus par Zannou (2006) à Bétérou qui indique clairement que l'écoulement n'est pas lié à la forme géométrique du bassin versant, mais plutôt aux autres paramètres de l'environnement (pluie, superficie, nature et occupation des terres, topographie, activité humaine…).

Ainsi, les variations des précipitations et de la température entraînent une modification du ruissellement et des disponibilités en eau. Face à cette situation et compte tenu des scénarii climatiques qui prédisent la poursuite du réchauffement climatique à l'horizon 2025 voire 2050, des mesures urgentes méritent d'être prises pour non seulement atténuer les impacts sur les populations mais aussi amener ces dernières à s'adapter et gérer durablement les ressources en eau.

Au total, la variabilité climatique montre que le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou est marqué par des phases humides des décennies 1960, 1990 et 2000 et sèches de 1970 et 1980.

5.3. Variation des termes du bilan hydrologique et corrélations entre ces différents termes à Bétérou

Le bilan hydrologique rend compte des entrées et des sorties d'eau à l'échelle du bassin versant en fonction des précipitations P, du débit à l'exutoire Q, de l'évapotranspiration ETR et de la variation du stock d'eau de la nappe.

La figure (fig. 45) présente les différents termes du bilan hydrologique (%) en lame d'eau sur le bassin versant de Bétérou.

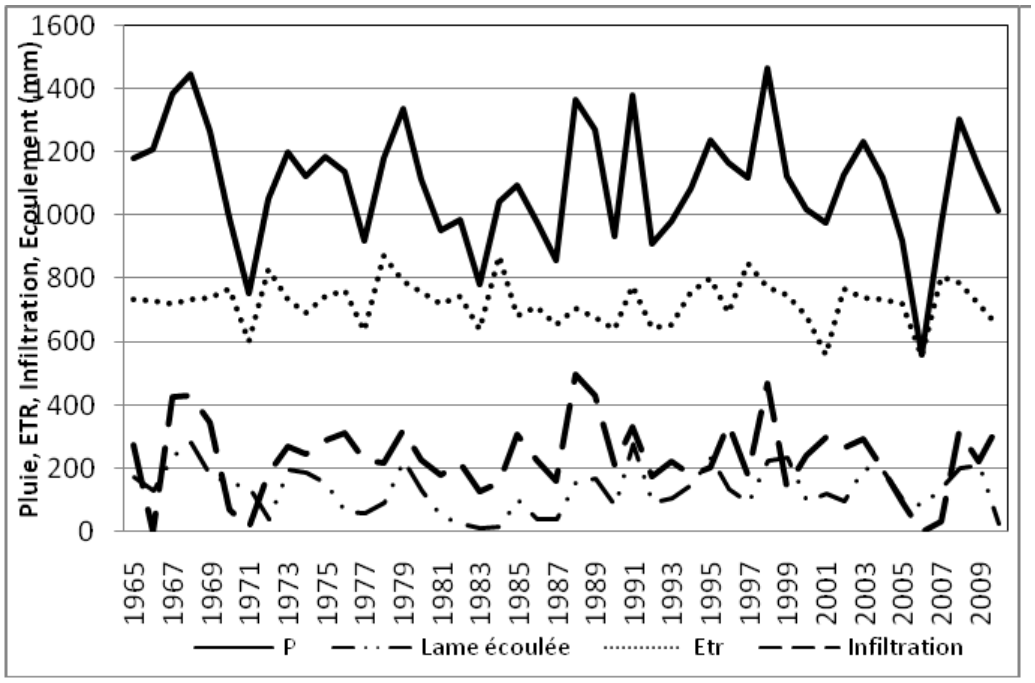


Figure 45: Bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou en % de 1965 à 2010

L'évapotranspiration représente à elle seule plus de 50 % du bilan hydrologique à l'échelle annuelle tandis que le stockage avoisine les 35-40 %. Ainsi, la plus grosse part de la pluie tombée s'évapore tandis que 11-13 % se transforme en écoulement. Les résultats de Bétérou sont en accord avec ceux de la modélisation (Topamma) obtenus par Le Lay (2006) et Zannou (2006) à savoir : évapotranspiration = 50 % ; écoulement = 12 % et variation de stock souterrain = 38 %. Ceci justifie la crédibilité de l'estimation grossière de l'ETR (modulation de l'ETP par l'API) utilisée dans ces études. Toutefois, il est important de valider ce calcul de la variation de stock souterrain dans une approche de bilan car, d'une part cette variation est estimée comme résidu (il n'y a pas d'observations directes et il est possible qu'il y ait un effet de compensation entre ETR et ΔS) et d'autre part, elle constitue un élément important dans la problématique AEP (Approvisionnement en Eau Potable).

En effet, les écoulements annuels sont estimés à environ 10-15 % des précipitations et l'évaporation ne dépasse guère les 55 %. Le terme prépondérant du bilan d'eau sur cette période est donc l'ETR, ensuite vient la percolation. On observe alors une surestimation de l'ETP sur la période 1965-2010. Ceci s'explique par le fait qu'en valeur absolue,

l’ETR varie peu d’une année sèche à une année humide, ce qui semble indiquer, que sous ce climat, la demande évapotranspirative est pratiquement satisfaite.

Par ailleurs, l'évapotranspiration domine le budget (40 à 60 % de la pluviométrie annuelle). Ceci conduit donc à des incertitudes en termes de répartition de l'eau. La dynamique des réservoirs souterrains peuvent expliquer les effets sur la mousson continentale diagnostic à l'échelle régionale.

La part de la percolation dans le bilan reste toutefois assez importante période d’étude, avec des valeurs proches de 32 %. En effet, d’une année à une autre, la percolation alimentant les nappes d’altérite augmente peu (environ 2 %). La dynamique des écoulements est nettement meilleure avec une bonne simulation de l’apparition des crues. La part du flux de percolation dans le bilan total est d’environ 30 %. Ces mêmes résultats obtenus par modélisation (Topamma) par Le Lay (2006) et Métadier (2006), démontrent la justesse des approches considérées, même si celles utilisés dans le cadre de cette étude diffèrent un peu de celle utilisée par Le Lay (2006) notamment en ce qui concerne les courbes de tarage (méthode combinée) et l’ETR (modulation sigmoïdale de l’ETP) et Métadier (2006) sur le bassin versant de la Donga/Kolokondé.

De façon générale, le bassin versant est donc plus sensible aux situations de stress qu’à celle de la recharge hydrique. Les modifications éco-climatiques (récessions pluviométrique, déforestation et dégradation des sols) survenues au cours de ces dernières années, ont impacté les ressources en eau du bassin versant.

Toutefois, une analyse multicritère révèle que les paramètres tels que l’évaporation, la forme de la surface du bassin versant, la nature des formations géologiques (degré de perméabilité), le jeu de recharge/décharge des nappes souterraines, le couvert végétal influencent fortement la variabilité hydrologique et par conséquent la disponibilité en eau (Totin et *al*., 2007). Tout ceci confirme qu’il y a une relation étroite entre ces différents paramètres. Le tableau XVII présente les corrélations entre les différents termes du bilan hydrologique sur la période 1965 à 2010.

Tableau XVII: Corrélation entre les différents termes du bilan hydrologique à Bétérou

	Pluie	**Ecoulement**	**ETR**	**Infiltration**
Pluie	1			
Ecoulement	0,75**	1		
ETR	0,84**	0,28	1	
Infiltration	0,79***	0,84***	0,34**	1

Source : Résultats de recherche, Akognongbé, 2011

** : Seuil de significativité de Spearman (95 %) ; *** : Seuil de significativité de Spearman (99 %)

L'analyse du tableau XVII révèle une corrélation positive (r > 0,70) entre la pluie et l'ETR (0,84) d'une part et la pluie et l'écoulement (0,75) d'autre part. Ceci témoigne toujours de la dépendance de ces facteurs (ETR, écoulement) à la pluie sur le bassin versant.

Ces résultats sont conformes à ceux de Vissin (2007) sur le bassin versant du Niger au Bénin ; Akognongbé et Vodounnon (2008), à Atchérigbé et Bétérou, Atchadé (2011) sur le bassin versant du Zou à Atchérigbé et Amoussou (2010) sur les sous-bassins versants du Mono-Couffo. La plupart de ces études ont été effectuées sur des formations de socle.

Aussi, la pluie influe réellement sur les autres termes du bilan hydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.

Par ailleurs, la faible corrélation positive entre les autres termes du bilan (évaporation/écoulement et évaporation/infiltration) pourrait bien s'expliquer par le fait que les lames d'eau précipitées ne sont pas les seuls facteurs qui influencent la dynamique des écoulements au niveau du bassin versant, mais aussi les états de surface dont dépend l'évaporation.

Les auteurs comme Rossi *et al* (1990) ; Vissin (1998 et 2001) et Amoussou (2005 et 2010) ont montré, en plus des conséquences hydrologiques engendrées par la baisse très remarquée des pluies des décennies 1970 et 1980, que le régime hydrologique dépend des précipitations, mais aussi de la végétation, de la nature du sol et de l'occupation des terres.

5.4. Variation du coefficient de tarissement à Bétérou

Le tarissement a une importance considérable dans la mesure où il conditionne la réalisation de nombreux ouvrages, les calculs des débits réservés en aval (Ouédraogo, 2001).

La méthode utilisée pour cette analyse est celle de la loi de Maillet. Le coefficient de tarissement est proportionnel à la vitesse de vidange de l'aquifère et il augmente en période de sécheresse (Mahé et *al*., 2000). Selon Olivry (1993), il permet également d'apprécier l'état des « entrées » d'eau qui contribueraient à la modification apparente des relations pluie/débit observées sur les bassins versants fluviaux. Il permet ainsi de comparer l'évolution de l'eau de surface et le stockage de l'aquifère afin de mieux cerner le comportement du réservoir de vidange (Atchadé, 2011).

La figure (fig. 46) présente l'évolution du coefficient d'écoulement à Bétérou sur les deux sous périodes.

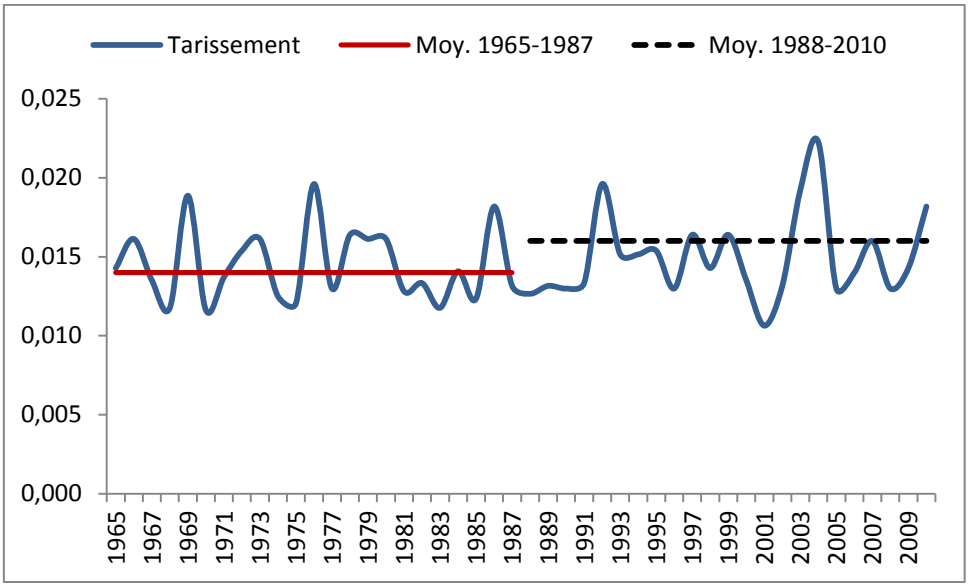


Figure 46: Variation interannuelle du coefficient de tarissement dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou

De l'analyse de la figure 46, il ressort une intermittente des coefficients de tarissement dans le bassin selon les années et cela en fonction de chaque sous-période. Ainsi, la première sous période (1965 à 1987), il est observé des coefficients de tarissement compris entre 0,010 et 0,020 j-1 dont la moyenne pour la sous-période 1965-1987 est de

0,014 j-1. En ce qui concerne la seconde sous-période, (1988-2010), avec une moyenne de 0,016 j-1 donc supérieur à celle de la première sous-période (1965 à 1987), les valeurs des coefficients de tarissement ici sont situées entre 0,010 et 0,030 j-1. La hausse du coefficient de tarissement dans la seconde sous-période comparativement à la première sous-période se justifie par le fait que la seconde sous-période a été relativement plus humide que la première.

Par ailleurs, à l'échelle du bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou, les plus faibles valeurs du coefficient de tarissement (0,010-0,015) observées traduisent un recul très rapide des débits mettant ainsi fin au ruissellement superficiel. Ce type de ruissellement est directement conditionné par le volume d'eau précipitée dans le bassin du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

En revanche, pour des valeurs relativement élevées (0,015 - 0,024) du coefficient de tarissement, la décrue est moins rapide. Cela traduit l'écoulement hypodermique ou ressuyage des sols.

Ces résultats corroborent ceux obtenus par Olivry (1993) ; Olivry et *al*. (1994) sur le Mali, Mahé et *al*. (2000)et Atchadé (2011) sur le Zou à Atchérigbé. En outre, le bassin versant étant situé en climat soudanien, cette zone a été la plus marquée par les sécheresses des années 71 et 80, ce qui a entraîné une vidange très sévère des nappes aquifères peut être amplifié par un faible coefficient d'emmagasinement des nappes. Ainsi, malgré une légère amélioration de la pluviométrie pendant la décennie 1980 et 1990, les coefficients de tarissement n'ont que peu diminué. Par ailleurs, ces résultats sont en contradiction avec les résultats obtenus par Atchadé (2011) sur le bassin versant du Zou à Domè qui se trouve en majeure partie sur le sédimentaire.

Les valeurs moyennes autour desquelles oscillent les coefficients sont de 0,018 j-1 soit (65 jours) avant 1987 et 0,020 j-1 soit (60 jours) après 1987 (ce qui représente une augmentation de 11 % dans le bassin versant). Ces moyennes traduisent un tarissement plus rapide et moins étalé dans le temps pour la seconde sous-périodeà Bétérou. Ces résultats confirment ceux obtenus par Atchadé (2011) à Atchérigbé (socle) contrairement à ceux obtenus à Domè où le tarissement est plus lent et plus étalé dans le temps. Ceci s'expliquerait par la formation géologique en place (socle) sur le bassin versantl'exutoire de Bétérou. Le bassin versant est essentiellement constitué de socle, ce qui expliquerait

cette évolution des coefficients d'écoulement. Par ailleurs, l'extrême précarité des ressources en eau de surface, particulièrement dans la zone sahélienne, implique la nécessité d'une politique rationnelle de gestion des ressources en eau (Ouédraogo, 2001). Selon Bahiré (1986), la durée variable du tarissement pourrait s'expliquer par la répartition des pluies au cours de l'année et par l'importance des pluies qui arrivent en saison sèche et qui soutiennent l'étiage. En effet, les débits de basses eaux dépendent de l'état de remplissage des nappes en fin de saison pluvieuse et de la loi de tarissement du cours d'eau. La rapidité du tarissement amène le même auteur à dire que les nappes qui alimentent les cours du N'zi sont de faible perméabilité et de petite taille. Face à cette situation et compte tenu des scénarii climatiques qui prédisent la poursuite du réchauffement climatique à l'horizon 2025 voire 2050, des mesures urgentes méritent d'être prises pour non seulement atténuer les impacts sur les populations mais aussi à s'adapter et gérer durablement les ressources en eau.

5.5. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI par sous période dans le bassin versant

5.5.1. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI sur la période 1982-2010

La figure suivante (fig. 47) présente une variation mensuelle des précipitations et des écoulements.

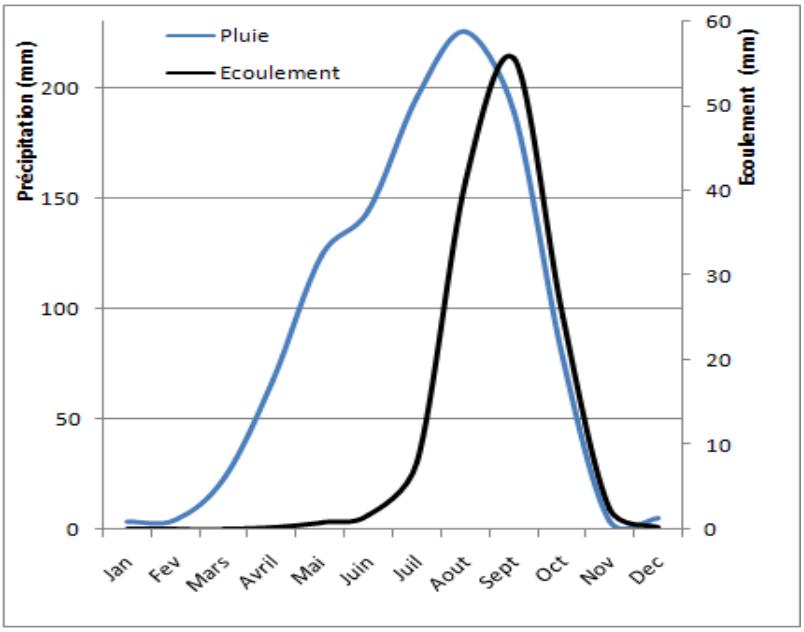


Figure 47: Pluie et écoulement dans le bassin versant entre 1982 et 2010

Cette figure montre que les écoulements et les précipitations ont une évolution semblable à l'échelle mensuelle. Les écoulements commencent à partir du mois de mai et atteignent leur pic au mois de septembre puis diminuent progressivement pour s'annuler aux mois de décembre à avril qui correspond à l'étillage. Cette évolution des écoulements suit celle du régime pluviométrique du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Mais l'analyse de cette figure montre également qu'il ya un décalage d'un mois entre le maximun des précipitations et celui des écoulements.

5.5.2. Evolution comparée de la pluie et de NDVI sur la période 1982-2010

L'évolution inter mensuelle du NDVI, et des précipitations du bassin est représentée par la figure (fig. 48).

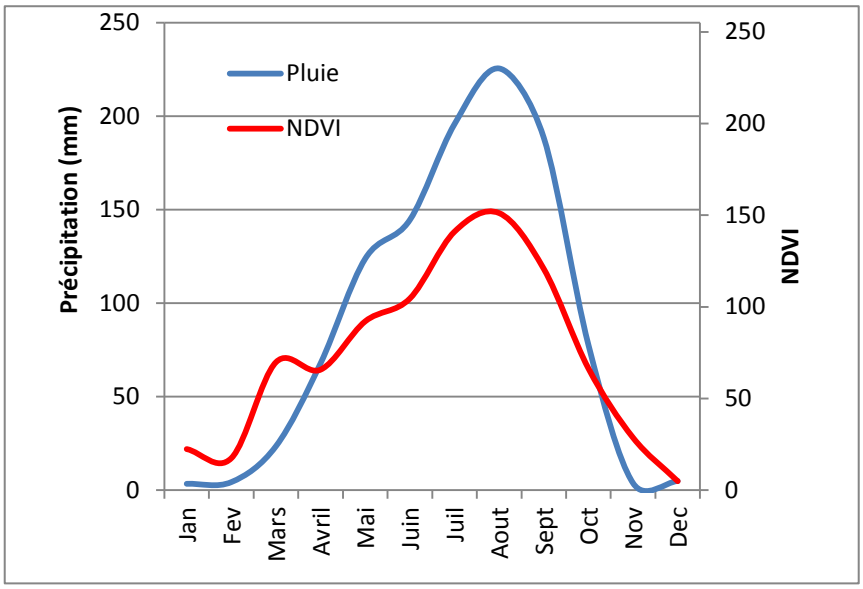


Figure 48: Pluie et NDVI dans le bassin entre 1982 et 2010

Il ressort de l'analyse de la figue 48, qu'au pas de temps mensuel entre 1982 et 2010, le NDVI et la pluie évoluent de façon semblable. Les variations du NDVI peuvent être directement liées à la variabilité des précipitations. En effet, l'indice de végétation augmente dès les premières averses. Ainsi, une réponse plus rapide du couvert végétal est favorisée par le seul événement pluvieux qui caractérise le bassin versant. Le maximum pluviométrique et le maximum de NDVI est atteint pendant le même mois d'août. Les deux variables décroissent jusqu'en novembre.Mais la pluie va plus vite que le NDVI.

5.5. 3. Evolution comparée de l'écoulement et de NDVI sur la période 1982-2010

L'évolution inter mensuelle du NDVI, et des écoulements du bassin est représentée sur la figure (fig. 49).

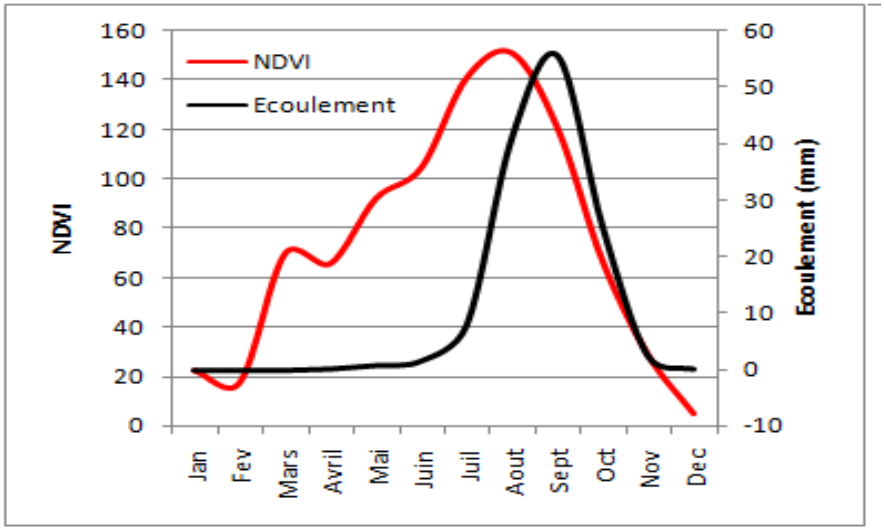


Figure 49: Ecoulement et NDVI dans le entre 1982 et 2010

L'analyse de la figure 49, montre que l'écoulement et le NDVI évoluent dans le même sens. L'écoulement a atteint son pic un mois après celui de NDVI. La montée de NDVI entre février et mars pourrait être mis en rapport avec les feux pastoraux qui provoquent la répousse des graminées notament dans les bas-fonds. La variation des écoulements est fonction des NDVI, ce qui signifie que le NDVI jouerait un rôle capital dans le fonctionnement hydrologique.

5.5.1.1. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI sur la sous période 1982-1987

Les figures 50 et 51 présentent respectivement la pluie et le NDVI dans le bassin d'une part et écoulement et NDVI dans la deuxième sous période d'autre part.

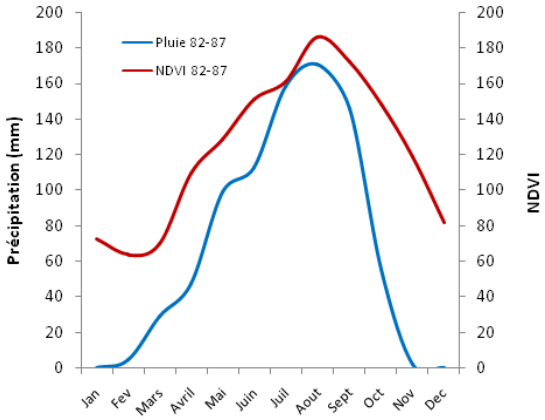


Figure 50: Pluie et NDVI dans le bassin pour la sous période 1982-1987

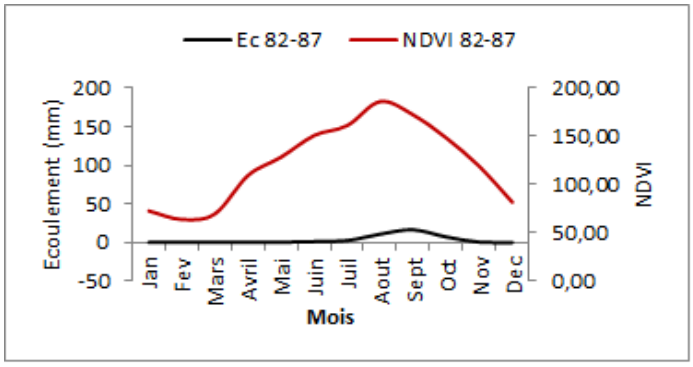


Figure 51: Ecoulement et NDVI dans le bassin pour la sous période 1982-1987

L'évolution au pas de temps saisonnier entre le NDVI, la pluie et l'écoulement au cours de la sous période 1982-1987 est semblable. Les précipitations et l'écoulement ont été en-deçà de l'indice de végétation normalisé. Pendant cette sous-période, l'activité photosynthétique a été intense et cela est due aux années déficitaires enregistrées au cours de cette période. Cependant, on a observé une baisse importante des écoulements à cause d'une forte évapotranspiration due aux déficits pluviométriques. De même, en ce qui concerne la seconde sous période (1988-2010), l'évolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI met en exergue une évolution relativement identique.

5.5.1.2. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI sur la sous période 1988-2010

L'évolution de la pluie, de l'écoulement et des NDVI est illustrée par les figures 52 et 53 suivantes.

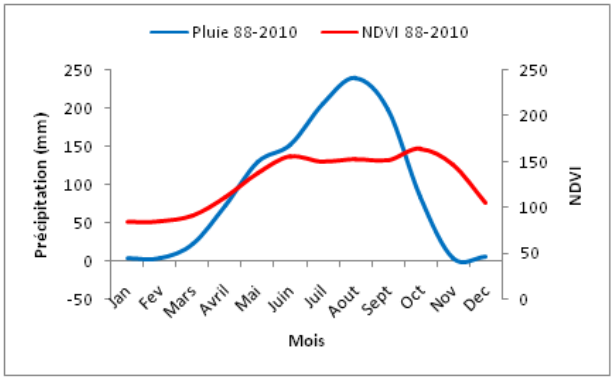


Figure 52: Pluie et NDVI dans le bassin pour la sous période 1988-2010

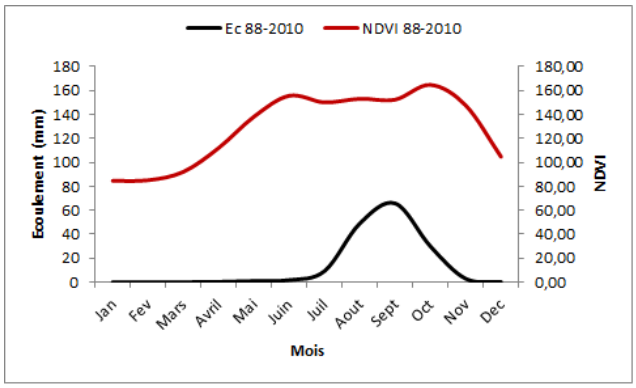


Figure 53: Ecoulement et NDVI dans le bassin pour la sous période 1988-2010

On observe une similitude dans l'évolution de la pluie, du NDVI et de l'écoulement. S'agissant de la pluie, de juin à septembre, la courbe d'évolution de l'indice de végétation normalisé est en-dessous de celle des précipitations. Pendant cette période, le NDVI connait une légère baisse car le sol est suffisamment imbibé d'eau et de ce fait, ne permet plus donc l'accroissement de l'indice de végétation normalisé.

5.5.1.3. Discussion

Au pas de temps mensuel, entre 1982 et 2010 dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, le NDVI, la pluie et l'écoulement ont présenté une évolution similaire. Ainsi, le NDVI croît à un rythme semblable à celui des précipitations. Ces deux paramètres ont atteint leur pic dans le même mois d'août. L'écoulement quant à lui atteint son pic un mois après ceux de la pluie et le NDVI soit en septembre. Ce décalage pourrait s'expliquer soit par la distance parcourue par les eaux avant d'atteindre l'exutoire, soit par l'effet d'atténuation de la végétation (NDVI) et de la topographie (pente). Ces résultats obtenus sont semblables d'une part à ceux obtenus par Assaba (2014) dans le bassin de l'Ouémé à Savè et Vissin (2007) dans le bassin du fleuve Niger d'autre part. De plus, pendant la saison sèche la valeur relativemnt élevée de NDVI pourrait s'expliquer par la présence des galeries forestières, de la repousse de certaines herbacées due aux feux pastoraux et les bas-fonds. Ceci est conforme aux travaux de Poccard et Richard (1996) qui ont montré que malgré la variabilité pluviométrique en Afrique tropicale, les NDVI sont similaires. Ce qui traduit l'existence d'un seuil au-delà duquel le NDVI est peu sensible aux pluies. Il faut signaler que les résultats obtenus dans le contexte soudano-guinéen de la présente étude sont comparables à ceux de ces auteurs au Cameroun en milieu guinéo-congolais. De même, Nicholson et *al*, (1990) ont prouvé que la capacité photosynthétique atteint son maximun même si la croissance de la végétation continue. Ces résultats sont aussi semblables à ceux de Tucker et Sellers (1986) qui ont démontré qu'au-delà du seuil maximun de NDVI, la pluie n'est pas le facteur limitant de la croissance de la végétation et que le NDVI mesure l'activité photosynthétique et non la végétation totale. Le NDVI dépendrait alors du bilan hydrique du sol et non de la pluie. Dans les mêmes perspectives, Phillipon *etal*, (1986) ont également prouvé qu'au-delà de 800-1000 mm de cumul de pluie par an, un effet de

saturation survient : le NDVI reste toujours très élevé quel que soit le cumul pluviométrique.

5.5.3. Détermination des régions homogènes dans le bassin versant

L'analyse et l'interprétation concernent deux types de graphiques : le cercle de communauté et l'espace des unités statistiques, obtenus respectivement à partir du tableau des vecteurs propres et du tableau des coordonnées des variables.

Le tableau XVIII des valeurs propres et des pourcentages cumulés, permet d'apprécier l'importance du caractère représenté par l'axe factoriel par rapport aux autres. Il permet également de connaître le nombre de facteurs nécessaires pour l'interprétation des graphiques. Les facteurs F1 (33,96 %), F2 (25,63 %), F3 (19,12 %), ont été choisis car ils représentent 78,71%.

Tableau XVIII: Valeurs propres, pourcentages et pourcentages cumulés

N° de facteurs	Valeurs propres	% individuel	% cumulé
F1	6,52	54,34	54,34
F2	1,21	10,11	64,45
F3	1,007	8,39	72,85

***Source** : Traitement de données, août, 2013*

Le plan factoriel F1-F2 représente 64,45 % de la variance totale du nuage de point. Le facteur F1 est le plus important car il exprime à lui seul 54,34 %. Les informations fournies par ce plan factoriel résultent de la matrice de corrélation et du cercle de communauté.

Le plan factoriel F1-F3 représente quant à lui 72,85 % de la variance totale du nuage de points. Ceci donne une bonne représentation des variables mises en jeu pour l'ACP. En effet, ces variables sont fortement corrélées entre elles, et sont aussi fortement corrélées avec les variables de la couverture végétale du bassin. De ces variables, on obtient donc la matrice de corrélation présentée dans le tableau XIX (annexe).

L'Analyse en Composante Principale (ACP) a été faite dans le but de détecter les régions homogènes du point de vue de la variabilité (fig. 54).

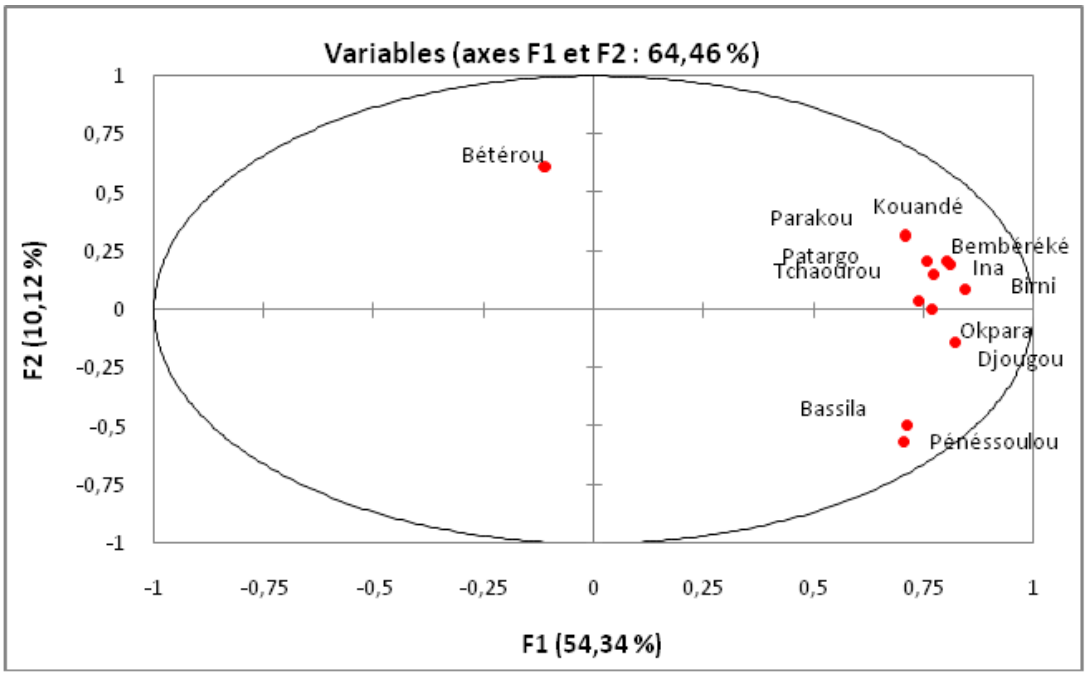


Figure 54: Corrélation des stations sur les axes 1 et 2

IL ressort de l'analyse de la figure 54 que les 12 stations sont toutes corrélées sur les deux premiers axes factoriels à l'exception de la station de Bétérou. Elles représentent une contribution de 54,34 % de variables/stations initiales à la détermination de la première valeur propre et de 10,12 % de contribution sur le deuxième axe factoriel, soit un total de 64,46 %.L'étude des ACP a abouti à des résultats qui confirment une variabilité spatiale des pluies sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. La station de Bétérou s'est isolée à cause peut-être de l'influence des facteurs orographiques (la chaîne de l'Atacora au Nord-Ouest et les collines de Soubakpérou à l'Est de Bétérou) qui ne sont pas abordés au cours de cette recherche.Ces résultats confirment aussi ceux obtenus par Yabi (2008) qui atteste que, l'influence des facteurs géographiques locaux (la topographie et la couverture végétale) semble aussi expliquer cet état de chose. Pour Atchadé (2014), cette situation pourrait être liée à la qualité des données utilisées.Cette situation met encore en exergue la problématique de lafiabilité des données fournies par les différentes stations météorologiques au Bénin.

Conclusion

La dynamique hydrologique dans le bassin versant a été étudiée en fonction des différents paramètres tels que les précipitations, les écoulements et les NDVI. Au total, dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou, la variabilité pluviométrique est marquée par deux sous périodes dont celle de 1965-1987 a connu une tendance à la baisse, c'est-à-dire à la récession pluviométrique et celle de 1988-2010 a connu une tendance à la hausse, c'est-à-dire une humidification. Cette variabilité hydro-pluviométrique et les différentes composantes de l'état de surface pourraient être en partie responsables de l'évolution des écoulements dans le sous- bassin versant.
Par contre sur la sous-période 1988-2010, les points sont plus regroupés autour de la droite de tendance. Cette situation peut s'expliquer par le fait que sur la période 1965-1987, le couvert végétal est plus important et contribuerait à garder l'humidité.

De l'analyse synthétique de la confrontation des résultats obtenus avec ceux des autres auteurs, il a été constaté que, l'évolution au cours de l'année du NDVI est semblable à celle des pluies et des écoulements. Le NDVI ne dépend pas uniquement des pluies, mais surtout du bilan hydrique.L'écoulement intervient avec un léger retard par rapport au pic du NDVI et des précipitations. Le climat intervient dans les apports pluviométriques qui déterminent l'évoultion du couvert végétal et des écoulements au cours de l'année. Ces écoulements dépendent également de la structure géologique en place. Les variations interannuelles des précipitations se traduisent par les modifications du coefficient d'écoulement. Ainsi, la troisième hypothèse qui dit que la dynamique hydrologique dépend de plusieurs facteurs dont les facteurs climatiques, édaphiques et du couvert végétal est vérifiée. Comme le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétrou peut être imputable à l'effet du couvert végétal, il est intéressant de voir l'impact des formations végétales sur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

CHAPITRE VI : INCIDENCES DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES SUR L'ECOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU

L'objectif de ce chapitre est d'analyser l'incidence de la dynamique de l'occupation des terres sur l'écoulement au pas de temps mensuel à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Il s'agit de chercher à première vue, le lien entre pluie et NDVI, ensuite une relation de ce dernier avec l'écoulement dans le bassin versant et enfin utiliser le modèle SWAT pour identifier les secteurs à fort et faible écoulement de même que les pertes de sédiments dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

6.1. Evolutions spatiales du NDVI et cumuls annuels moyens de pluie

En Afrique tropicale, les études ont montré que dans les régions sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest, les valeurs du NDVI évoluent généralement de manière synchrone avec celles des précipitations à l'échelle interannuelle (Nicholson, Davenport et Malo, 1990).

La variation du NDVI à l'échelle annuelle a été réalisée à l'aide des moyennes annuelles. Ces dernières ont été calculées pour chaque pixel, à un pas de temps mensuel. Le but ici, grâce aux figures 55 et 56, est de montrer les zones où les variations annuelles du NDVI et des précipitations sont identiques.

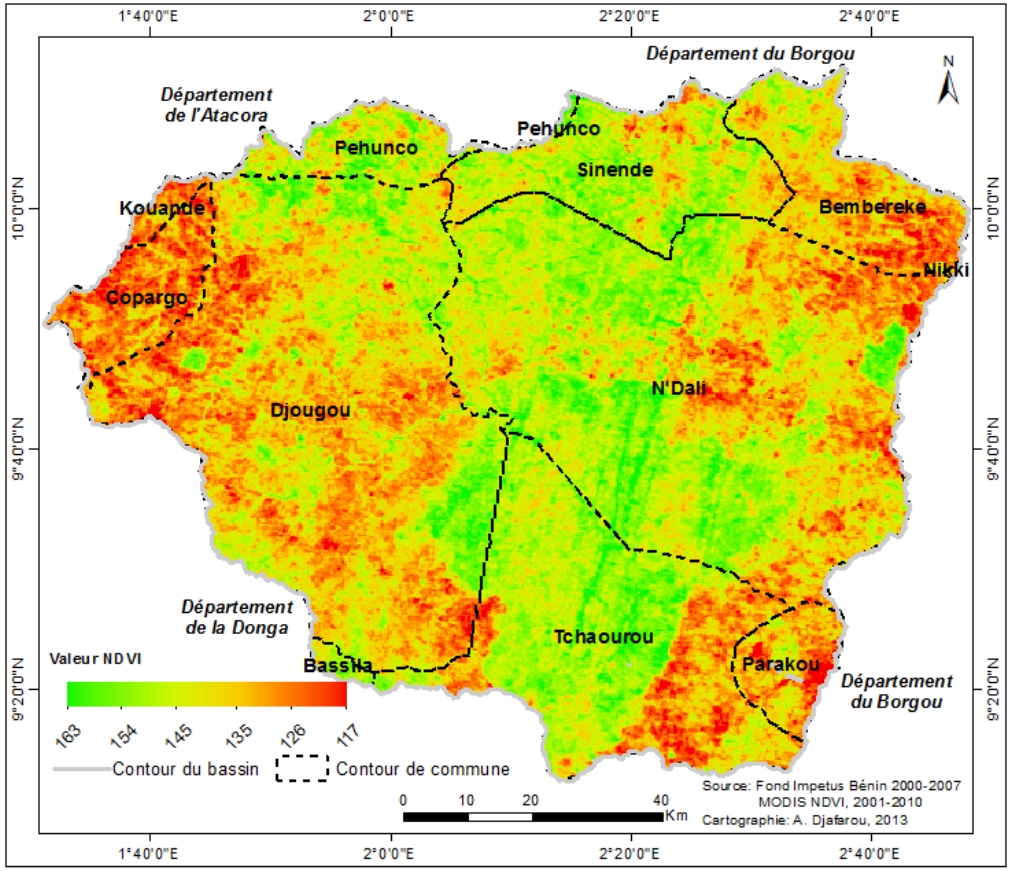


Figure 55: NDVI annuel moyen (1982-2010) à l'échelle du bassin versant

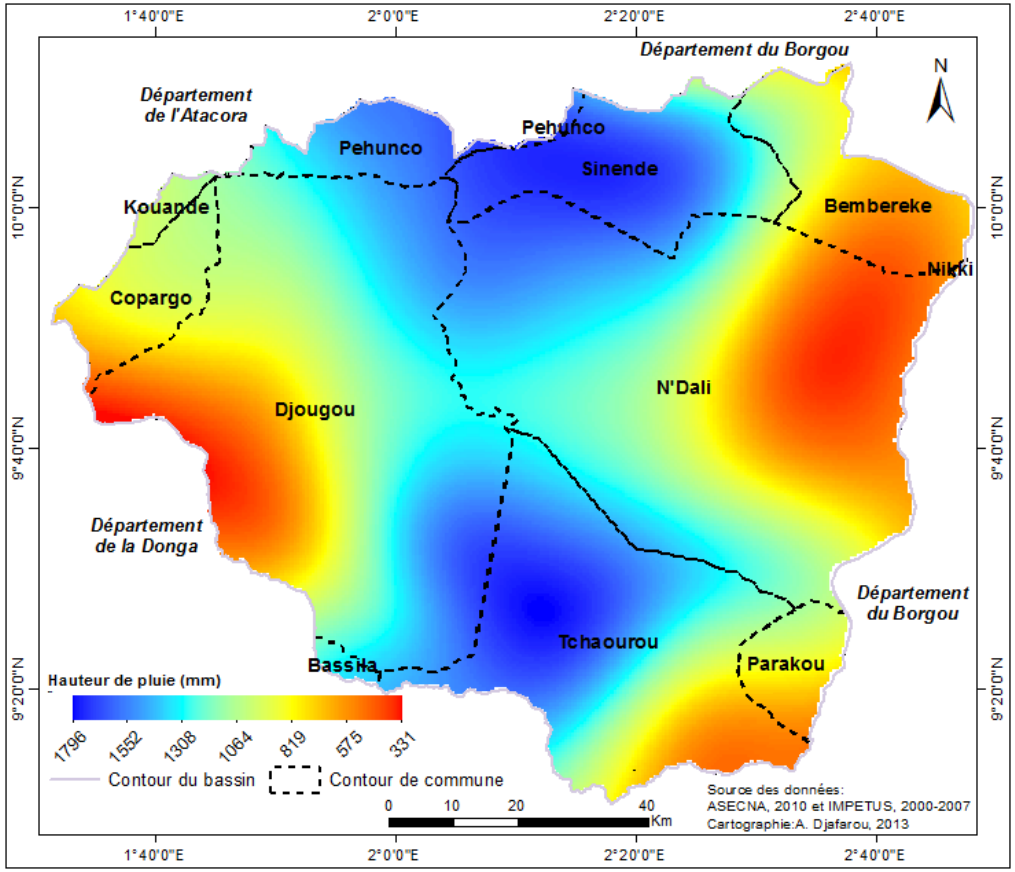


Figure 56: Précipitation annuelle moyenne (1982-2010) à l'échelle du bassin versant

Les figures 55 et 56 présentent les résultats d'une classification hiérarchique ascendante appliquée aux pixels de la zone en prenant en compte le régime moyen annuel (1982-2010) de précipitation et de NDVI.

Sur la figure 55, deux zones ont été retenues : la zone de fortes valeurs de NDVI de l'ordre de 145/163 qui se localise au centre du bassin versant et du sous bassin versant de Bétérou et la zone de faibles valeurs de NDVI de l'ordre de 117/145 qui se trouvent généralement à l'ouest et à l'est du bassin versant (Barérou, Wèwè, Donga et ouest de Ouémé Affon).

En comparant les figures 55 et 56, on constate que les mêmes zones sont retrouvées. En effet, les deux zones ayant respectivement des fortes et faibles valeurs de NDVI ont également des valeurs annuelles de précipitations fortes et faibles. Ces dernières atteignent au maximum la valeur de 1620 mm/an. En outre, il est possible d'observer que ces deux zones correspondent à une même classe d'occupation des terres. La zone de forte NDVI et de pluie correspondent aux forêts et aux savanes arborées et arbustives. La zone de faibles valeurs de pluie et de NDVI sont les zones de forte exploitation agricole (champs et jachères, plantations …) et d'habitations. De même, on constate que les niveaux de NDVI sont identiques dans le bassin versant pour les cumuls annuels similaires.

La structure de la saison des pluies est donc la cause majeure des disparités entre les zones dans le cycle saisonnier d'activité chlorophyllienne de la végétation. Elle conditionne en particulier l'efficacité de l'utilisation des pluies par la végétation. Une saison des pluies brève et intense telle qu'observée en Afrique tropicale est moins favorable à un développement marqué de la végétation (Camberlin *et al.*, 2007).

6.2. Relations entre Pluie-NDVI et écoulement-NDVI

6.2.1. Relation interannuelle entre cumul de pluie et NDVI

Les relations entre les variations interannuelles de NDVI et de pluie sont estimées pour chaque pixel du bassin versant à l'aide des coefficients de corrélation entre valeurs annuelles. La carte de corrélations (fig. 57) montre de fortes disparités spatiales. On

remarque d'une part des zones de faible corrélation voire nulle, et d'autre part, des zones de corrélations significatives supérieures à 0,45, par exemple le centre du bassin versant.

Pour ces zones (centre), en moyenne, plus de 65 % de la variance du NDVI est liée à celle des précipitations. La répartition spatiale des fortes corrélations se calque sur celles des isohyètes 1000 à 1650 mm. Mais, dans le sous-bassin versant de Barérou à l'Est par exemple, les corrélations restent fortes par endroits pour des pixels enregistrant moins de 1000 mm alors qu'à l'Ouest, elles sont plus faibles pour les pixels enregistrant entre 450 et 950 mm.

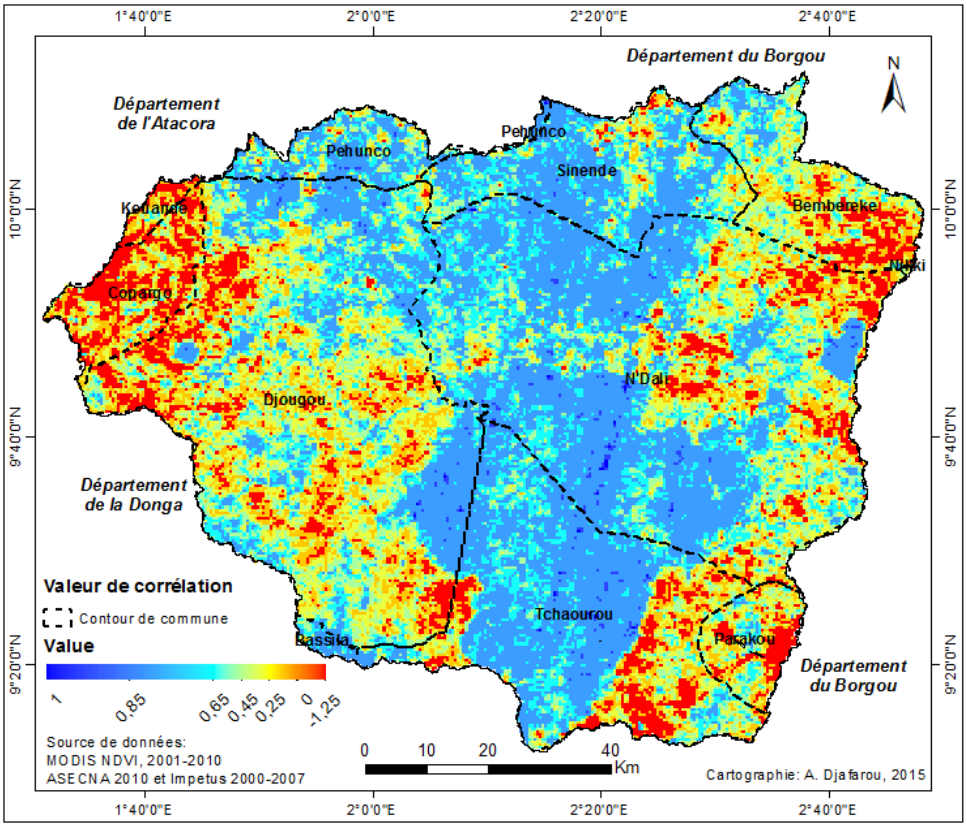


Figure 57: Corrélations entre cumul de pluie et NDVI (1982-2010)

Le fait que les relations NDVI - pluie soient plus fortes pour un cumul pluviométrique annuel donné, insinue également un lien avec le type de végétation. Trois grands types d'occupation des terres sont prédominants dans les fortes relations pluie – NDVI : les savanes, les forêts et les champs. Ainsi, dans le tableau XXIII une valeur de corrélation de 0,62 pour les pixels combinant 1000-1650 mm de pluie et des savanes/forêts/champs est remarquée. En comparant avec les pixels couverts par le même type de végétation mais en dehors de la classe 1000-1650 mm de pluie, ou bien avec d'autres pixels mais

non couverts par la savane, les forêts ou les champs, les corrélations médianes prennent environ la même valeur. Ceci prouve que le cumul de pluie et le type de végétation ont le même poids dans la relation pluie – NDVI (tableau XIX).

Tableau XIX: Corrélation médiane pluie – NDVI en fonction du type d'occupation du sol et des cumuls de pluie

Types d'occupation du sol	Cumuls annuels moyens	
	1000-1650 mm	450-950 mm
Forêts, savanes et champs	0,62	0.54
Autres types	0,54	0,39

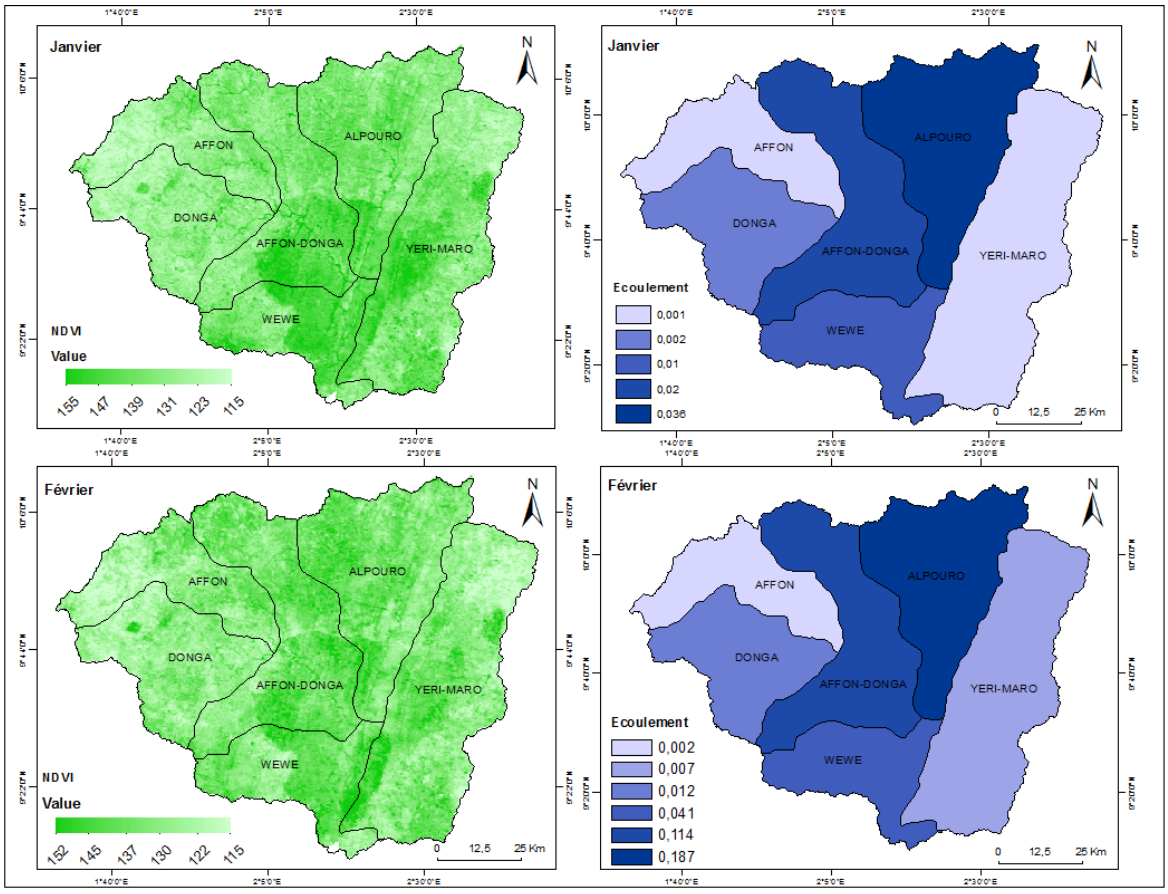
À l'échelle considérée, le rôle des autres paramètres climatiques est supposé secondaire par rapport à celui de la pluie sur l'activité chlorophyllienne de la végétation. Celui de l'écoulement direct de surface qui représente le ruissellement a été examiné à l'échelle saisonnière pour différents types de couvert végétal.

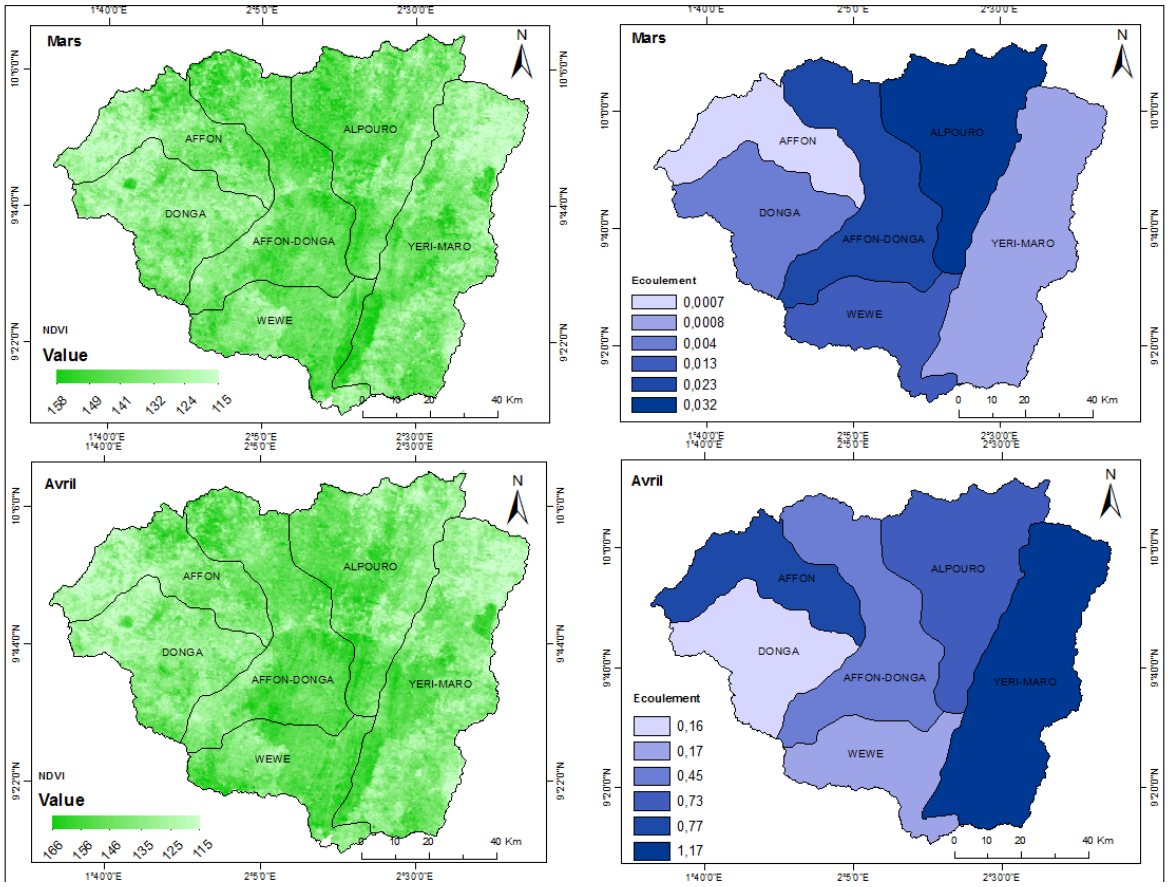
6.2.2. Relations inter-mensuelles entre écoulement et NDVI

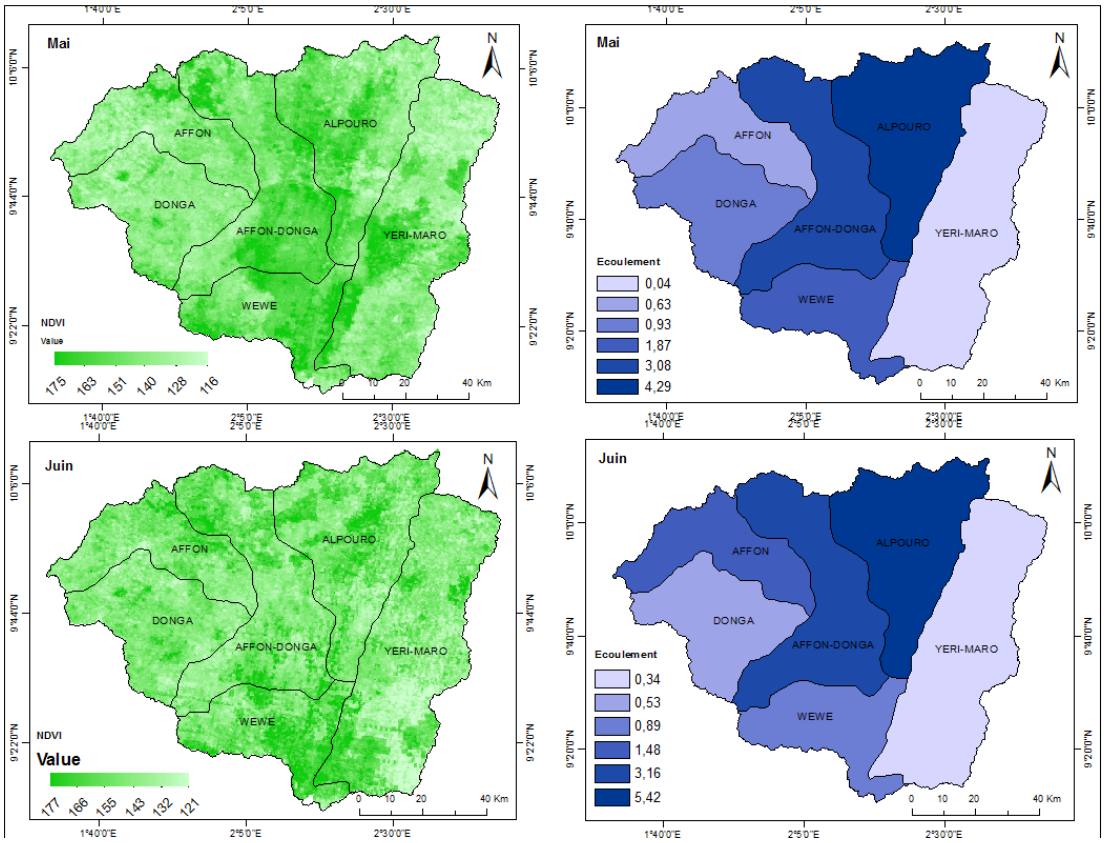
Les relations entre l'écoulement dans les formations végétales et NDVI annuels sont analysées dans ce paragraphe. Un examen de ces relations à l'échelle mensuelle pour le bassin versant a été réalisé, afin de préciser l'évolution des relations au cours du cycle saisonnier.

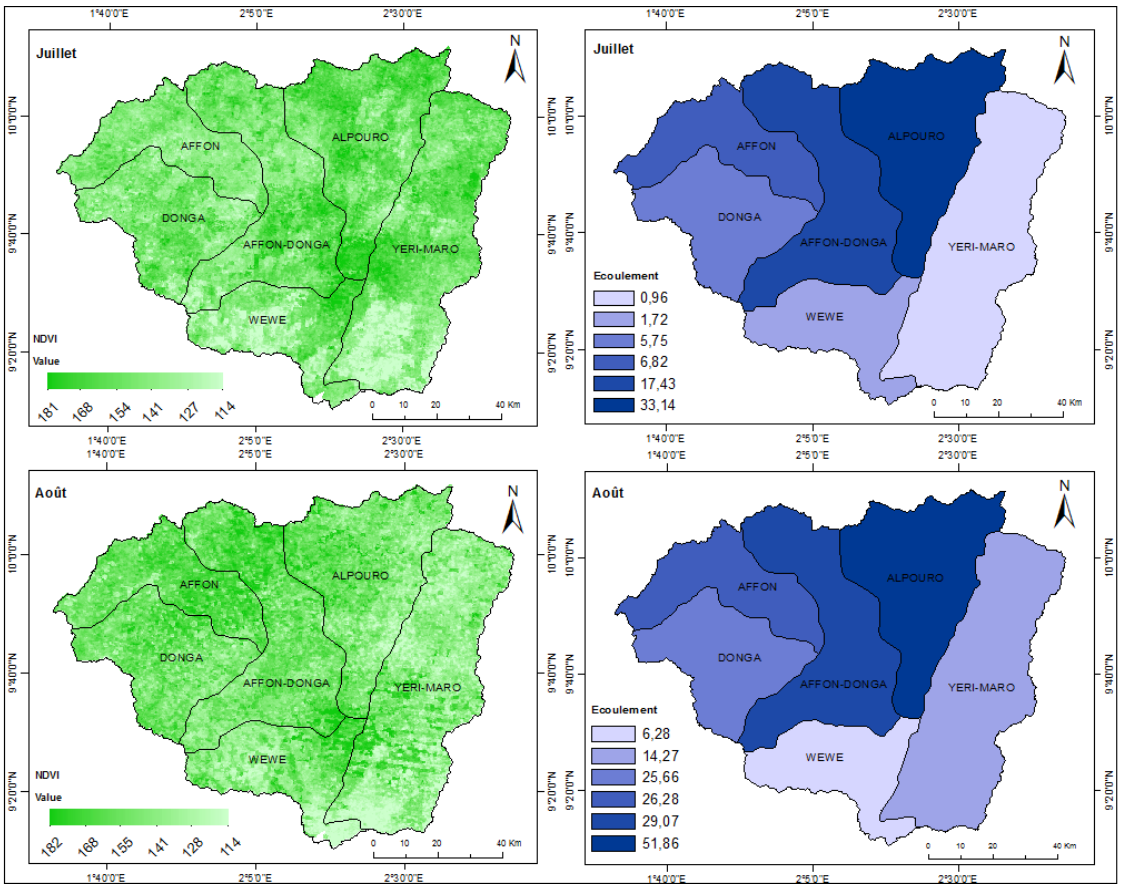
En premier lieu, une cartographie de NDVI et de l'écoulement (fig. 58) au pas de temps mensuel sur la période 1982-2010 a été effectuée.

La similitude entre les cartes de NDVI et celles des écoulements n'est pas impressionnante. Les variations du comportement végétatif du bassin versant ne suivent pas celles des écoulements mais plutôt celle des précipitations ou précisément du bilan hydrique du sol comme cela a été mis en évidence dans le chapitre précédent.


Janvier
AFFON
ALPOURO
DONGA
AFFON-DONGA
YERI-MARO
WEWE
NDVI
Value
155 147 139 131 123 115
Janvier
Ecoulement
0,001
0,002
0,01
0,02
0,036
0 12,5 25 Km
Février
NDVI
Value
152 145 137 130 122 115
Février
Ecoulement
0,002
0,007
0,012
0,041
0,114
0,187


Mars
AFFON
ALPOURO
DONGA
AFFON-DONGA
YERI-MARO
WEWE
NDVI
Value
158 149 141 132 124 115
Mars
Ecoulement
0,0007
0,0008
0,004
0,013
0,023
0,032
0 10 20 40 Km
Avril
NDVI
Value
166 156 146 135 125 115
Avril
Ecoulement
0,16
0,17
0,45
0,73
0,77
1,17


Mai
AFFON
ALPOURO
DONGA
AFFON-DONGA
YERI-MARO
WEWE
NDVI
Value
175 163 151 140 128 116
Ecoulement
0,04
0,63
0,93
1,87
3,08
4,29
Juin
177 166 155 143 132 121
0,34
0,53
0,89
1,48
3,16
5,42
0 10 20 40 Km
N


Juillet
AFFON
ALPOURO
DONGA
AFFON-DONGA
YERI-MARO
WEWE
NDVI
Value
181 168 154 141 127 114
Ecoulement
0,96
1,72
5,75
6,82
17,43
33,14
Août
182 168 155 141 128 114
6,28
14,27
25,66
26,28
29,07
51,86
0 10 20 40 Km
N

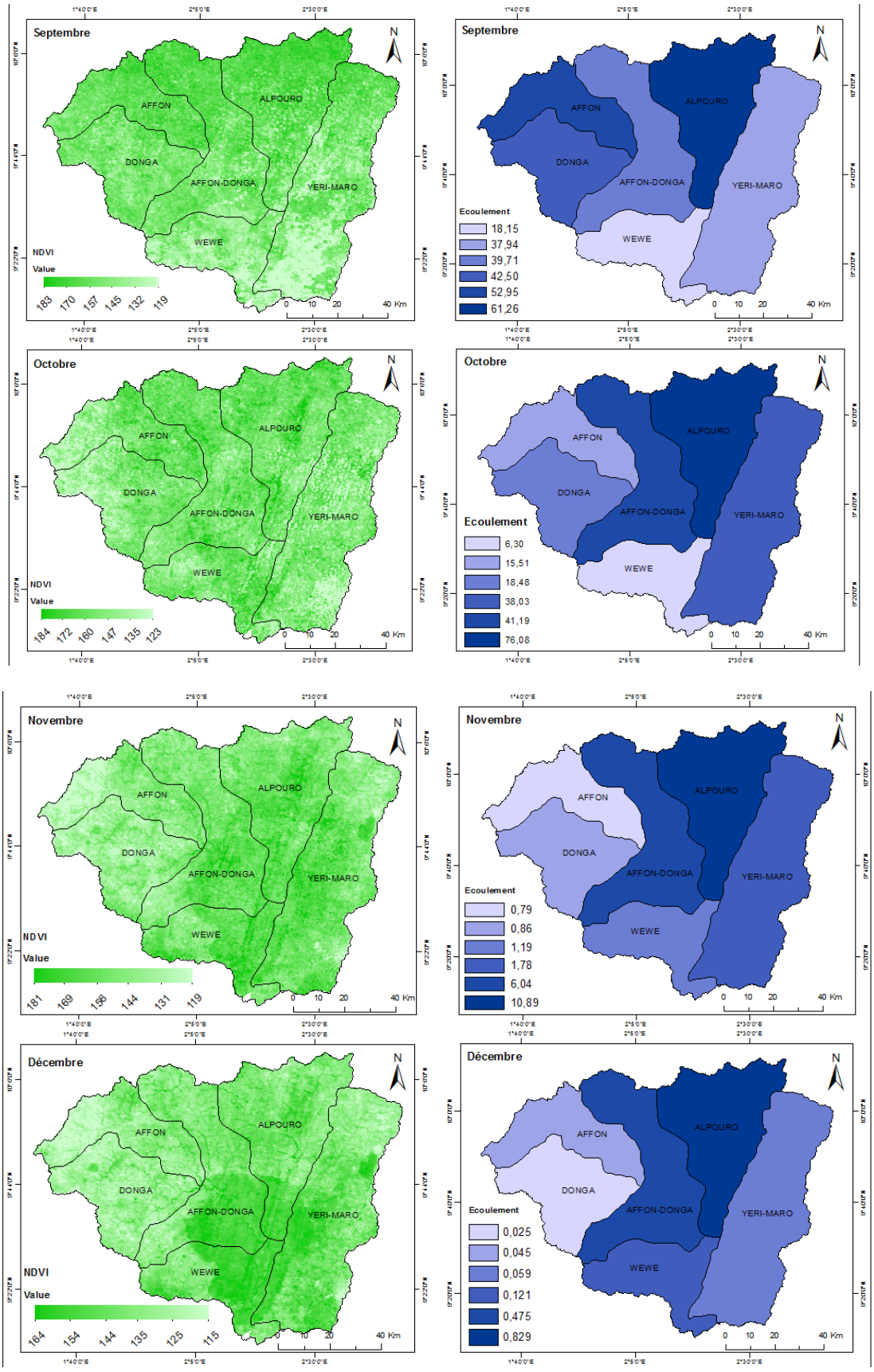


Figure 58: Evolution mensuelle de NDVI et de l'écoulement dans le bassin versant (2001-2010)

Globalement, la végétation réduit l'écoulement superficiel au sol, exception faite pour les pixels couverts par les savanes ou les cultures.

Le tableau XX et La figure 59 permettent d'interpréter visuellement les corrélations entre le NDVI et l'écoulement.

Dans une seconde étape, l'Analyse en Composante Principale (ACP) entre le NDVI et l'écoulement dans les types de couvert végétal a été réalisée pour analyser la relation entre les deux paramètres.

Tableau XX: Corrélation NDVI-écoulement en fonction des types de couvert végétal

	NDVI	FCSB	FDSD	GF	SAA	MCJ	Plant
NDVI	1	0.310	0.323	0.237	0.436	**0.552**	**0.491**
FCSB	0.310	1	0.756	0.943	0.888	0.849	0.846
FDSD	0.323	0.756	1	0.803	0.942	0.863	0.908
GF	0.237	0.943	0.803	1	0.894	0.795	0.812
SAA	0.436	0.888	0.942	0.894	1	0.966	0.983
MCJ	**0.552**	0.849	0.863	0.795	0.966	1	0.992
Plant	**0.491**	0.846	0.908	0.812	0.983	0.992	1

Légende

FCSB : forêt claire et savane boisée ; FDSD : Forêt dense sèche ; GF : galerie forestière ; SAA : savane arborée et arbustive ; MCJ : mosaïque de champ et jachère ; Plant : plantation

En gras, les valeurs de corrélation entre le NDVI et l'écoulement.

Les corrélations significatives au seuil alpha=0,050 sont soulignées

De la lecture du tableau XX, il ressort que l'écoulement dans les plantations (r=0.50) et les mosaïques de champs et jachères (r=0,55), ont une incidence forte sur l'activité photosynthétique de la végétation.

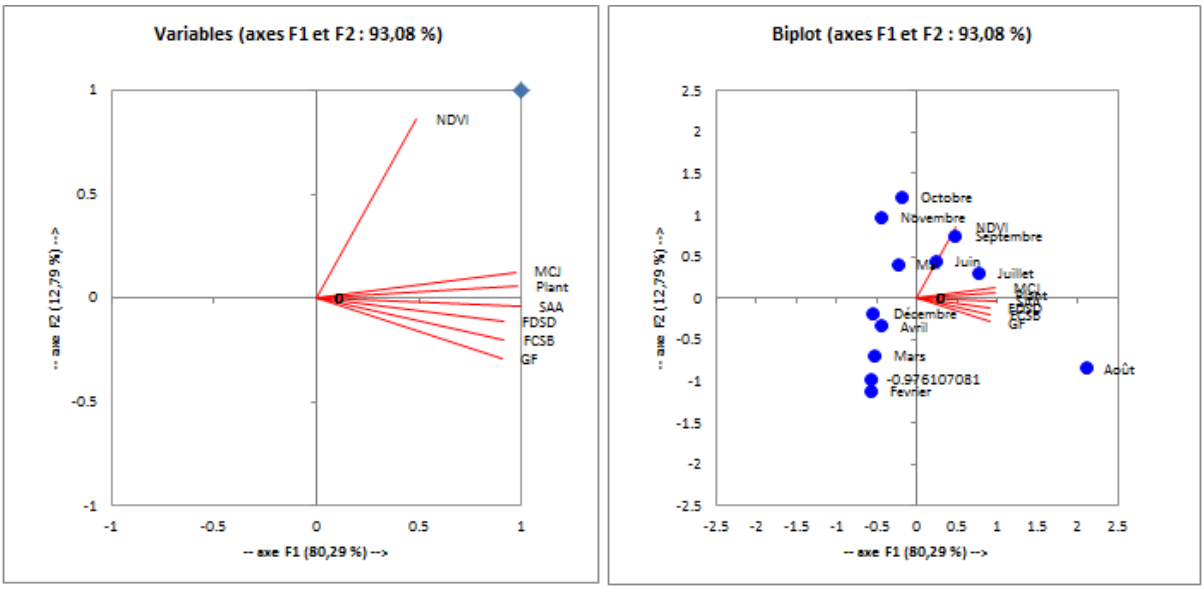


Figure 59: Projection des variables sur un plan à deux dimensions

La figure 59, présente mieux cette relation, car les variables "Plant" et "MCJ" sont proches du NDVI du bassin versant, les unes des autres. On voit sur la même figure que sur la base des variables dont on dispose, les "Plant" et "MCJ" sont assez particuliers de même que les autres variables (FCSB, FDSD, GF et SAA) qui semblent partager des caractéristiques. En observant la figure 59, on s'aperçoit que les variables "Plant" et "MCJ" sont corrélés positivement avec le NDVI en particulier dans les mois de mai, juin, juillet, septembre, octobre et novembre.

La figure suivante (fig. 60) montre les cycles de NDVI associés à ceux des écoulements dans les types de couvert végétal en utilisant les données mensuelles (1982-2010).

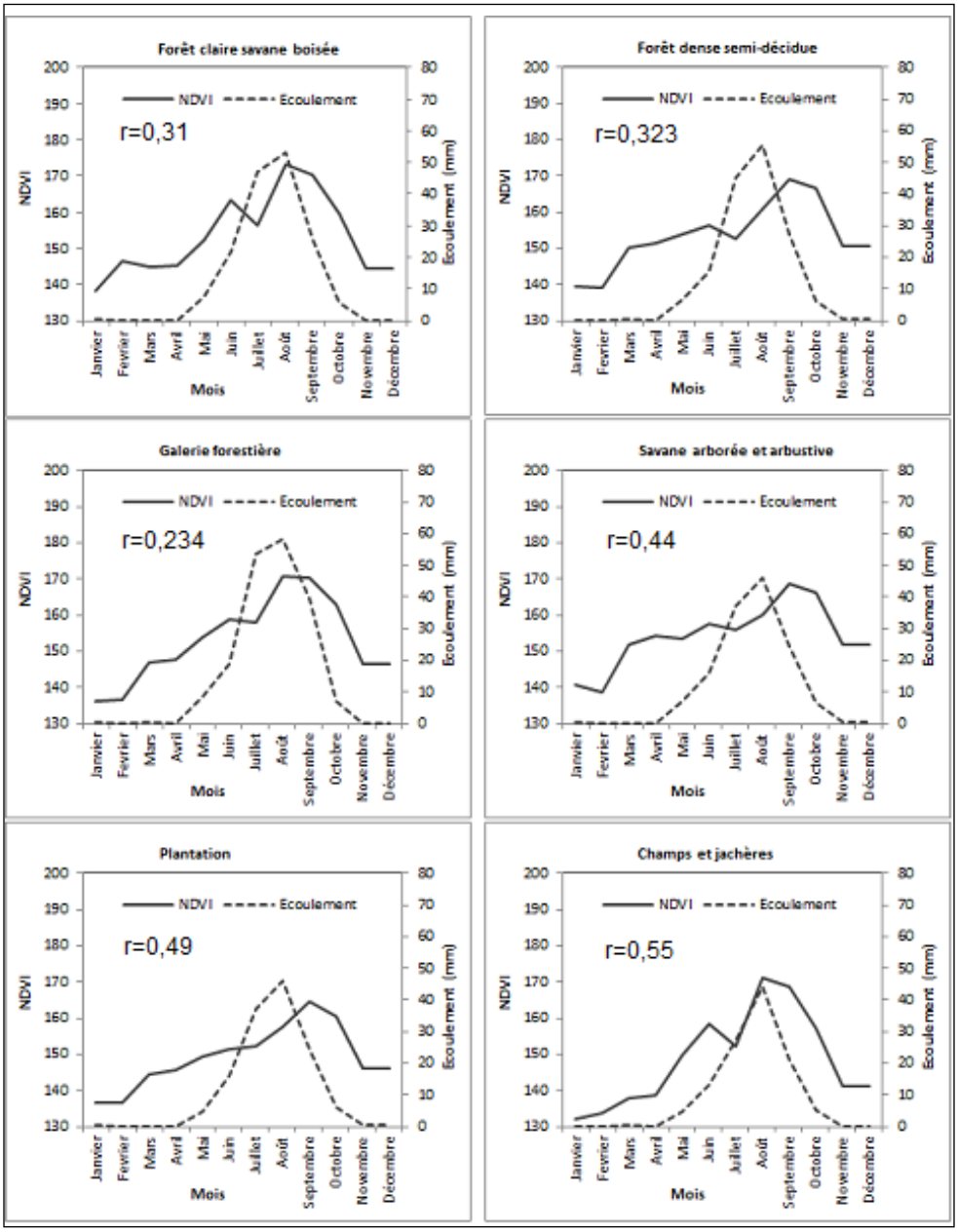


Figure 60: Cycles mensuel entre écoulement et NDVI des formations végétales dans le bassin versant (1982-2010)

De l'analyse de la figure 60, il ressort que les écoulements et les NDVI ont une évoultion semblables quelque soit la nature du couvert végétal. Pour tous les types de formation végétale, l'écoulement atteind son pic au mois d'août. Le NDVI atteind son pic dans le même mois d'août sur les galeries forestières et forêts claires et savanes boisées. Avec les autres unités d'occupation des terres qui concernent les espaces perturbés par les activités humaines (savanes arborées et arbustives, plantations et mosaïques de champs et jachères). Le pic de NDVI est obtenu en septembre. Ainsi, dans le bassin versant, le coefficient de corrélation décroit en fonction de la structure de la végétation. Le

coefficient de corrélation inférieur à 0,4 concerne les formations végétales naturelles répartition (galeries forstières, forêts claires et savanes boisées et forêts denses semi-décidues) d'où la relation : coef GF <coef FCSB <coef FD <coef SAA <coef PLANT < coef MCJ.

6.3. Effets de la dynamique de l'occupation des terres sur la disponibilité des ressources en eau à long terme dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

6.3.1. Caractéristiques physiques du sol du bassin de l'Ouémé à Bétérou

Les caractéristiques physiques des différents types de sols du bassin d'étude (tableau XXI) ont permis au modèle SWAT de faire la délimitation des HRUs. Les propriétés physiques étudiées sont le nombre de couches ou horizons (H) ainsi que leur profondeur (Z), la capacité de rétention (AWC), la conductivité hydraulique à saturation (Ks), leur teneur en carbone organique (CBN), la densité apparente (BD) et enfin la granulométrie.

Tableau XXI: Propriétés physiques des différents types de sols

Sol	H	Z (cm)	AWC ou CR	Ks (cm/jr)	CBN	BD	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)
Sol minéral brut peu évolué (SMB)	A	18	0,16	14,35	0,75	1,61	86	11,5	2,5
	B	75	0,26	18,72	0,25	1,64	70,05	27,4	2,55
	C	118	0,3	16,24	0,21	1,49	64,5	23	12,5
Sol ferralitique faiblement désaturé sur quartzite du socle (SF)	A	30	0,26	8,38	2,28	1,7	75	18	7
	B	55	0,32	6,44	0,52	1,73	69,25	17	13,75
	C	117	0,22	7,32	0,62	1,66	69	18	13
Sol hydromorphe lessivé (SH)	A	22	0,22	2,73	1,18	1,58	69,53	10,25	20,22
	B	77	0,54	1,5	0,56	1,58	77,81	5,75	16,45

***Source** : Résultat du modèle SWAT, 2013*

De ce tableau XXI, une comparaison a été faite entre la capacité de rétention (AWC ou CR) et la conductivité hydraulique à saturation (Ks) de chacun des sols et suivant la première et la deuxième couche (fig. 61).

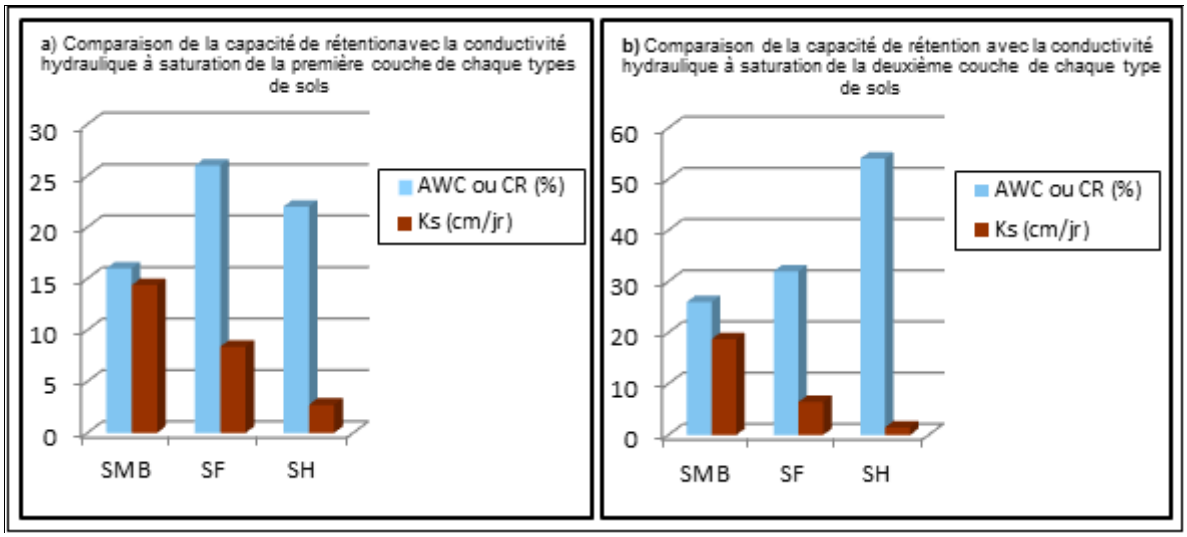


Figure 61: Comparaison de CR et Ks dans la première (a) et deuxième (b) couche de sol

L'analyse de cette figure montre que les sols ferralitiques faiblement désaturés sur quartzite de socle et hydromorphe lessivés présentent au niveau de leurs premiers horizons de fortes capacités de rétention en eau (un peu plus de 25%) que les sols minéraux bruts.

Dans le même temps, c'est au niveau des sols minéraux bruts que l'eau arrive à traverser plus rapidement (Ks = 14,35 Cm/Jr) le 1er horizon, suivi du sol ferralitiques faiblement désaturés sur quartzite de socle et hydromorphes lessivés avec des valeurs des Ks respectivement égales à 8,38 Cm/Jr et 2,73 Cm/Jr. L'eau arrive à franchir également de façon plus ou moins rapide l'horizon B des sols minéraux bruts (Ks = 18,72 Cm/Jr). Ce qui n'est pas le cas au niveau des autres types de sol. Ce sont les sols hydromorphes lessivés qui gardent la plus faible valeur de la conductivité hydraulique à saturation avec Ks = 1,5 Cm/Jr.

Plus les horizons du sol sont riches en particules fines (limon et argile surtout) et en carbone organique, plus ils retiennent l'eau et la vitesse d'infiltration est plus réduite. Ainsi ces variations observées peuvent être expliquées par les différentes teneurs en particules fines et en carbone organique contenus dans chaque type de sols et suivant les couches successives.

Au niveau de la première couche, les fortes capacités de rétention notées dans les sols ferralitiques faiblement désaturés sur quartzite de socle et les sols hydromorphes lessivés

sont surtout une conséquence de leurs teneurs élevées en carbone soient respectivement 2,28 et 1,18 avec un taux d'argile respectifs de 7% et 20,22% ; ce qui explique également leur Ks faible.

Dans la deuxième couche les teneurs plus ou moins élevées en argile et en carbone des sols hydromorphes lessivés, lui confèrent sa forte capacité de rétention en eau et son Ks très faible, comparativement aux autres qui ont des valeurs de capacité de rétention faible et des Ks élevées.

En somme, on retient que plus les sols sont riches en matières organiques et en particules fines, plus ils retiennent de l'eau et celle-ci traverse ces couches plus lentement.

6.3.2. Discrétisation des sous bassins versants et des HRUs

Plusieurs combinaisons ont été effectuées entre les types de sols et les types d'occupation pour la délimitation des sous-bassins versants et des unités de réponse hydrologique (HRUs) comme l'indique la figure (fig. 62).

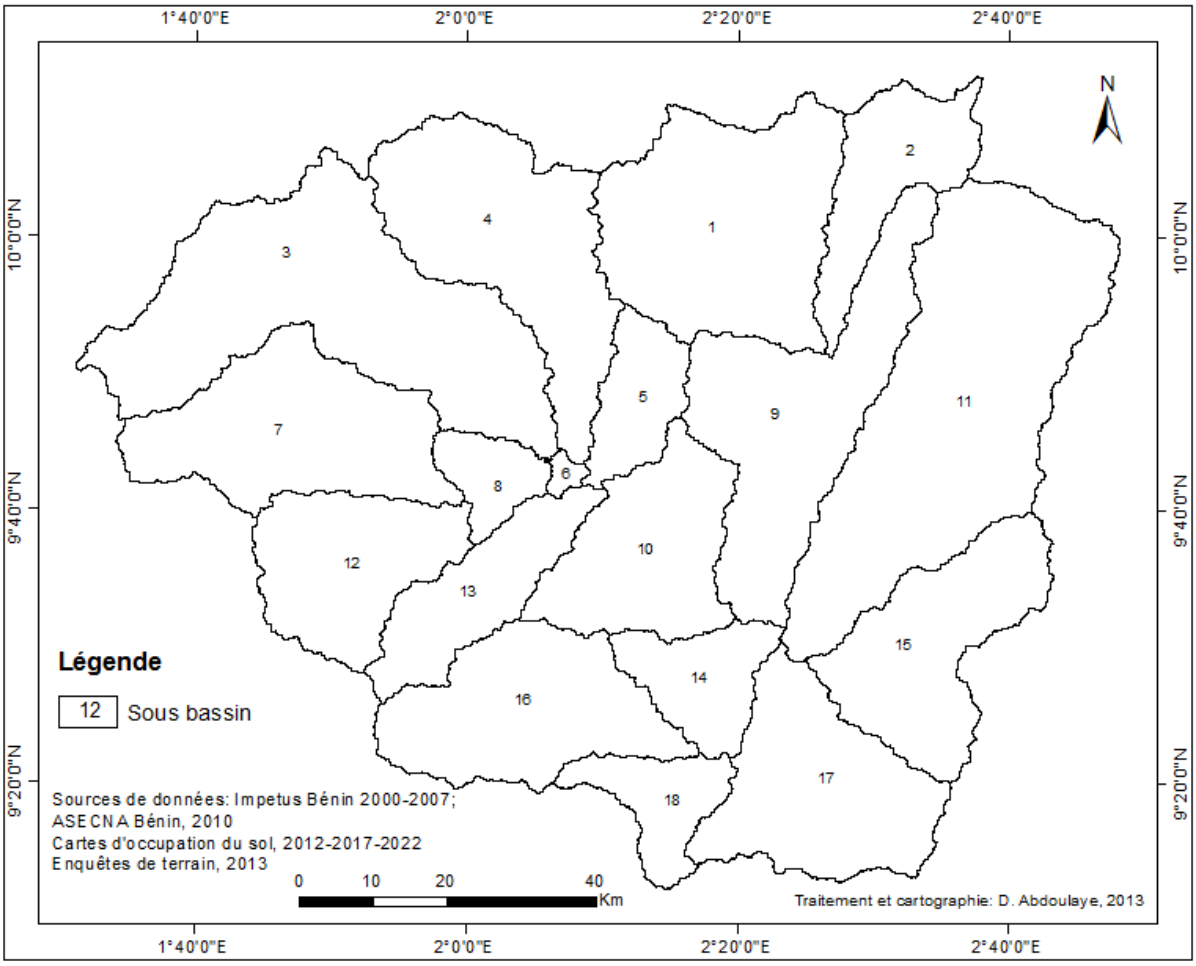


Figure 62: Sous-bassins versant définis par le modèle SWAT

Les seuils de discrétisation sont fonction des objectifs et de l'importance des informations à obtenir (Di Luzio et *al.,* 2001). Les seuils de drainage (délimitation des sous-bassins versants) et ceux de pris en compte du couvert végétal et du sol (délimitation des HRUs) retenus, figurent dans la littérature (Neitsch et *al.*, 2002 ; Di Luzio et *al.*, 2001). Le tableau XXII ci-dessous récapitule les différents seuils utilisés ainsi que les nombres de sous-bassins versants et de HRUs obtenus.

Tableau XXII: Scénarii de discrétisation retenus

Seuil de discrétisation des sous-bassins (ha)	Nombre des sous-bassins	Seuil de définition des HRUs (% occupation des terres/%type de sol	Nombre d'HRU
7500	18	5/10	67

***Source** : Résultat du modèle SWAT, 2013*

6.3.3. Résultats des paramètres de calage du modèle

Les paramètres du modèle ont été calés manuellement. Le tableau XXIII indique les ordres de grandeur des différentes modifications qui ont été apportées.

Tableau XXIII: Paramètres ajustés lors du calage hydrologique de SWAT

Paramètres	Description	Valeur par défaut	Modification
ESCO	Facteur de compensation pour l'évaporation du sol	0,95	0,400
GWREVAP	Le coefficient permettant le transfert de l'aquifère vers les horizons sus-jacents et non saturés du sol	De 0,02 à 0,20	0,11
REVAPMN	Hauteur d'eau minimale dans l'aquifère peu profond pour qu'il y ait un mouvement d'eau vers le sol (mm)	-	2 mm
RCHRGDP	Fraction de l'eau qui percole de la zone racinaire et qui atteint l'aquifère profond	0 à 1	0,05
GWQMN	Hauteur d'eau minimale pour qu'il y ait un transfert d'eau de l'aquifère peu profond vers le cours d'eau (mm)	-	20 mm
GWDELAY	Délai pour que l'eau souterraine qui transite par l'aquifère atteigne le cours	-	31 jours
ALPHABF	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain	-	0,048
SURLAG	Coefficient traduisant le temps de ruissellement de surface	4	0,9

***Source** : Résultat du modèle SWAT, 2013*

6.3.4. Calage de la réponse hydrologique du bassin versant

6.3.4.1. Comparaison entre débits simulés et débits observés

Les efforts de calage au pas de temps mensuel apparaissent très satisfaisants avec un coefficient de détermination de 0,88; une efficience du modèle (indice de Nash et Sutcliffe) de 0,86 et un indice d'agrément de 0,97. La figure suivante (fig. 63) montre le degré de concordance des débits simulés et observés à l'exutoire de Bétérou pour la période de calage. Cela témoigne d'un bon ajustement entre les débits simulés et observés. Les processus hydrologiques modélisés par SWAT durant la période de calage sont donc très proches de la réalité.

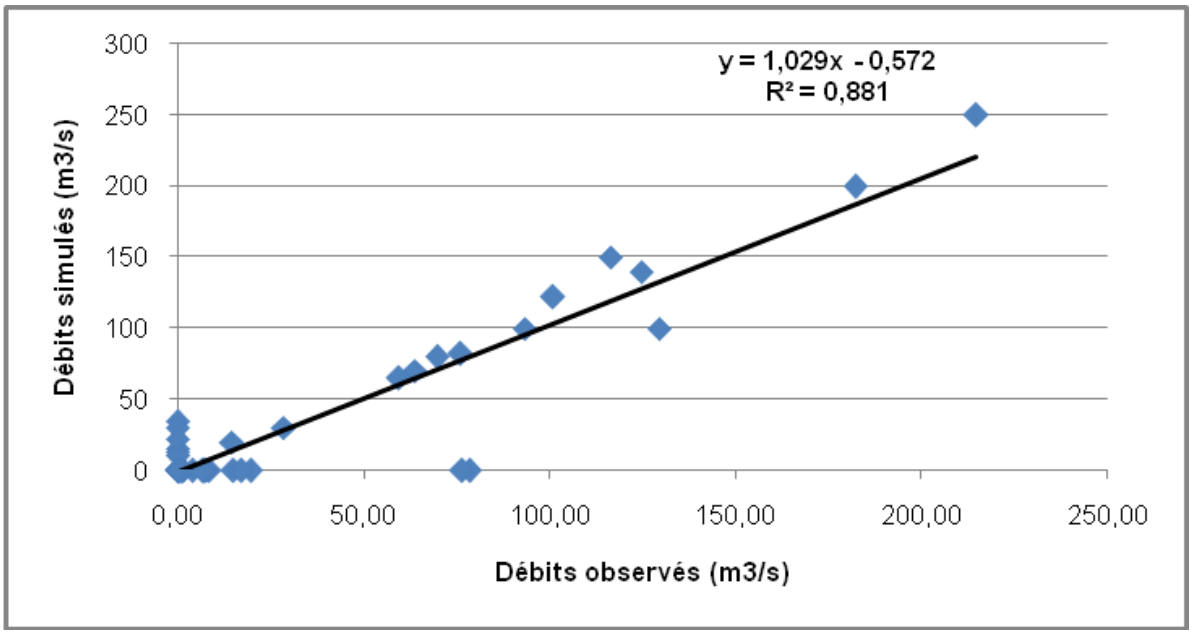


Figure 63: Corrélation des débits observés et simulés au pas de temps mensuel àl'exutoire de Bétérou pour la période de calibration (droite de régression)

Le tableau XXIV, présente les résultats du coefficient d'évaluation.

Tableau XXIV: Coefficients d'évaluation du modèle

Moyennes mensuelles (m^3/s)		Coefficient d'évaluation		
Débit observé	Débit simulé	R^2	ME	IA
21,24	21,29	0,88	0,86	0,97

***Source** : Résultat du modèle SWAT, 2013*

6.3.4.2. Moyenne annuelle du bilan hydrologique durant la période de calage

Le tableau XXV présente les valeurs moyennes annuelles des différents termes du bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.

Tableau XXV: Composantes du bilan annuel (2000-2005)

Composantes du bilan hydrologique	Quantités (mm)
Précipitations totales	1108,9 mm
Ecoulement de surface	139,52 mm
Ecoulement latéral	2,77 mm
Ecoulement souterrain	301,6 mm
Recharge de l'aquifère profond	25,4 mm
Recharge de l'aquifère peu profond	8,03 mm
Evapotranspiration réelle	611,6 mm
Evapotranspiration potentielle	2166,4 mm
Variation du stock d'eau du sol	19,98 mm
Production d'eau	740,7 mm
Production de sédiments	2,05 t/ha

***Source** : résultats de traitement de données, 2013*

Le tableau XXV montre que l'évapotranspiration est le mécanisme majeur par lequel l'eau est perdue dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Elle représente 55% de la précipitation totale alors que l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain représentent respectivement 12.58 % et 27.20 % de la précipitation. La recharge totale de l'aquifère (écoulement souterrain, recharge de l'aquifère peu profond, recharge de l'aquifère profond) représente 30.2% des précipitations. Des résultats semblables ont été obtenus par Sintondji (2005) et Giertz *et al.* (2006). Selon Sintondji (2005), l'écoulement de surface contribue à 11, 1 % et l'évapotranspiration à 67,3 % dans le bassin versant de Terou-Igbomakoro (sous-bassin de l'Ouémé). Selon Giertz *et al*. (2006), l'écoulement de surface varie entre 9,5 et 18,7 % dans les bassins versants de Aguima et Niaou qui sont aussi des sous-bassins de l'Ouémé situés juste en aval du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

6.3.5. Validation du modèle

6.3.5.1. Comparaison entre débits simulés et débits observés

Les figures suivantes (fig. 64 et fig. 65) et le tableau XXVII révèlent au pas de temps mensuel, les niveaux de corrélation entre les débits observés et simulés à l'exutoire de

Bétérou au cours de la période de validation qui s'étend du premier janvier 2005 au 31 décembre 2010. Les coefficients d'évaluation (coefficient de détermination, indice de Nash et Sutcliffe, indice d'agrément) sont restés dans le même ordre de grandeur par rapport à la période de calibration du modèle.

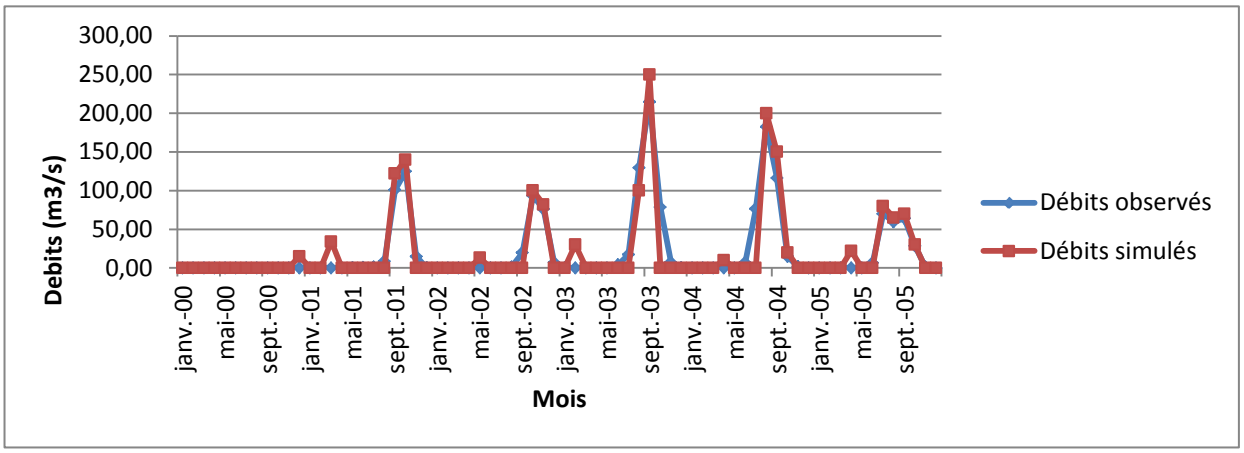


Figure 64: Evolution des débits observés et simulés au pas de temps mensuel à l'exutoire de Bétérou pour la période de validation (2005 – 2010)

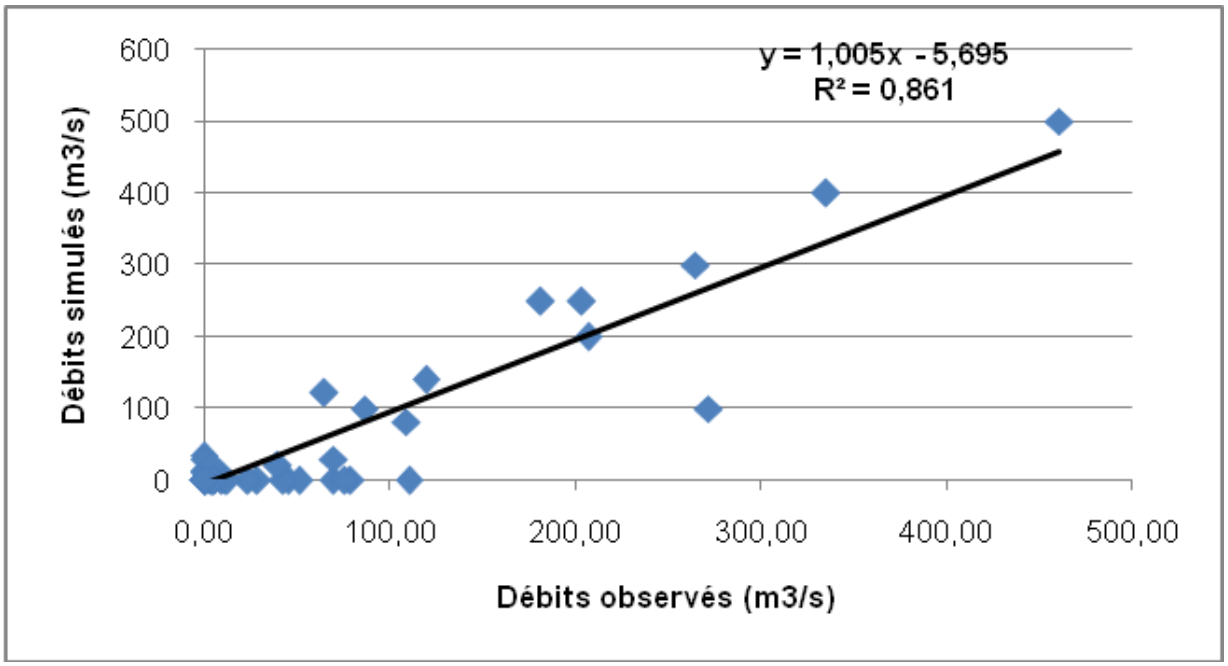


Figure 65: Corrélation entre débits observés et débits simulés au pas de temps mensuel à l'exutoire de Bétérou pour la période de Validation

Tableau XXVI: Coefficient d'appréciation du modèle (Validation)

Moyennes mensuelles (m3/s)		Coefficient d'évaluation		
Débit observé	Débit simulé	R^2	ME	IA
41,83	36,36	0,86	0,83	0,96

***Source** : résultats de traitement de données, 2013*

6.3.5.2. Moyenne annuelle du bilan hydrologique durant la validation

Les composantes du bilan hydrologique (moyenne annuelle) sont présentées dans le tableau XXVII.

Tableau XXVII: Composantes du bilan (2005 - 2010)

Composantes du bilan hydrologique	**Quantités (mm)**
Précipitations totales	1257,9 mm
Ecoulement de surface	85,07 mm
Ecoulement latéral	2,28 mm
Ecoulement souterrain	389,81mm
Recharge de l'aquifère profond	17,15 mm
Recharge de l'aquifère peu profond	21,69 mm
Evapotranspiration réelle	758,4 mm
Evapotranspiration potentielle	2145,4 mm
Variation du stock d'eau du sol	-16,5 mm
Production d'eau	474, h65
Production de sédiments	2,131 t/ha

***Source** : résultats de traitement de données, 2013*

Le tableau XXVII montre que la majeure partie de l'eau de précipitation est perdue sous forme d'évapotranspiration (60,29 %) comme observé au cours de la période de calage. L'écoulement de surface et l'écoulement souterrain représentent respectivement 6,76 % et 31 % des précipitations totales.

6.3.6. Impacts des scenarii d'occupation des terres sur les termes du bilan hydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Les effets des modifications futures d'occupation des sols sur les ressources en eau du

bassin versant de l'Ouémé à Bétérouont été analysés sur la base des résultats des simulations. Celles-ci ont été faites en maintenant le climat de référence (2000-2005) et en variant les cartes d'occupation des terres pour les années 2012, 2017 et 2022. Avant de comparer les résultats des scenarii d'occupation des sols à ceux de référence (calage), les proportions des superficies agricoles et des zones de savane des différentes cartes d'occupation des sols après la distribution des HRUs sont d'abord présentées (fig. 66).

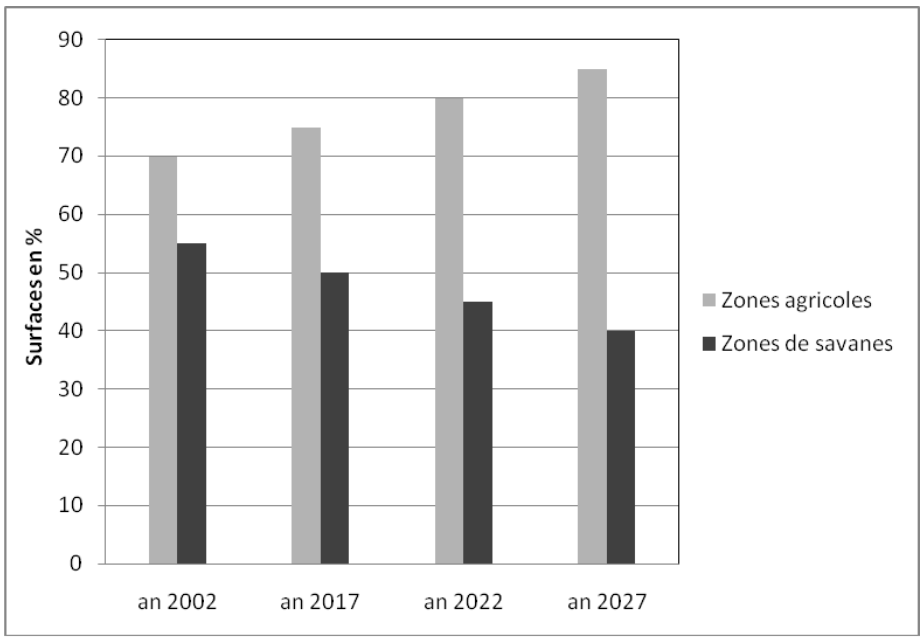


Figure 66: Proportion des espaces agricoles et ceux de savanes après la distribution des HRUs

L'analyse de la figure 66 montre que les espaces agricoles occuperont près de 83 % de la superficie du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou ; soit une augmentation de 15,2 % de leur superficie par rapport à 2002. Par contre, les zones de savane occuperont moins de 40 % de la superficie du bassin versant, soit une diminution d'environ 14,8 % de leur superficie par rapport à 2002. Cette distribution temporelle des occupations futures des sols aura des influences perceptibles sur les composantes du bilan hydrologique comme le montre le tableau XXVIII

Tableau XXVIII: Proportions de variations, de certaines composantes du bilan hydrologique sous les influences des scénarii d'occupation des sols par rapport à la période de référence (2000-2005).

Composantes du bilan hydrologique	Lu 02	Lu 17	Lu 22	Lu27
PCP (mm)	1108,9	1108,9	1108,9	1108,9
ΔPCP (%)	-	0	0	0
ET (mm)	611,6	599,98	598,15	594,48
ΔET (%)	-	-1,9	-2,2	-2,8
QSurf (mm)	139,52	156,26	159,05	164,63
ΔSurfQ (%)	-	12	14	18
GWQ (mm)	301,6	292,55	291,35	277,47
ΔGWQ (%)	-	-3	-3.4	-8
TAQR (mm)	335,03	324,98	321,63	320,62
ΔTAQR (%)	-	-3	-4	-4.3
WY (mm)	740,7	711,07	708,11	695,52
ΔWY (%)	-	-4	-4,4	-6,1

Légende :

PCP = précipitation, **SurfQ** = écoulement de surface, **GwQ** = écoulement souterrain, **TAQR**= recharge totale des aquifères, **ET**= évapotranspiration réelle, **WY**= production moyenne d'eau, Δ: variation

Sous les influences des occupations futures des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou, il est attendu une augmentation de l'écoulement de surface de 12 % en 2017, 14 % en 2022 et de 18 % en 2027. Par contre, les autres composantes du bilan hydrologique vont connaître une diminution. L'écoulement souterrain connaîtra une baisse de 8 %, la recharge totale des aquifères diminuera de 4,3 %, la production d'eau du bassin versant connaîtra une baisse de l'ordre de 6,1 % et l'évapotranspiration réelle de 2,8 % en 2027 comparativement à la période de calage (2000-2005) du fait de la dégradation des formations végétales naturelles car la plante est une grande consommatrice d'eau par la transpiration.

L’augmentation de l’écoulement de surface serait une conséquence de la réduction de la perméabilité de la surface des sols des champs (Dossou-Yovo, 2011). D'autres raisons comme la diminution de l'évapotranspiration et la diminution de la capacité de rétention en eau du sol due à la réduction de l’épaisseur du sol (effet de l’érosion) auraient aussi entrainé l’augmentation de l’écoulement de surface dans le bassin versant (Dossou-Yovo, 2011). Les études de Hiepe (2008) dans le bassin versant de l’Ouémé supérieur et ses sous-bassins versants (Donga et Térou), ont signalé une augmentation de l’ordre de 10,65 à 22,70% de l’écoulement de surface à l’horizon 2022 sous l’effet des changements dans l’occupation des sols. Celles de Kounou (2009) ont indiqué une augmentation de l’écoulement de surface de l’ordre de 16 % dans le bassin versant de l’Ouémé à Savè. Dans le bassin versant de l’Okpara à Kaboua, les études de Dossou-Yovo (2011) ont projeté une augmentation de l’écoulement de surface de l’ordre de 14 % en 2027 comparativement à 2002 sous la dynamique future des occupations du sol.

Pour ce qui concerne, l’écoulement souterrain et la recharge totale des aquifères, leur baisse serait due aux effets conjugués de la faible perméabilité et de la faible conductivité hydraulique sur les parcelles cultivées (Dossou-Yovo, 2011). En effet, du fait de l’exposition aux effets directs de la pluie entrainant la formation des croûtes de battance, la perméabilité du sol liée aux labours et sarclages est le plus souvent de courte durée.

La variabilité spatio-temporelle de l’écoulement de surface dans le bassin versant de l’Ouémé à Bétérou (fig. 67), montre que les sous-bassins versants 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 et 15 pourraient avoir des écoulements de surface les plus élevés à l’horizon 2022 ; ce qui favoriserait une plus grande disponibilité de l’eau de surface mais également des risques accrus d’érosion.

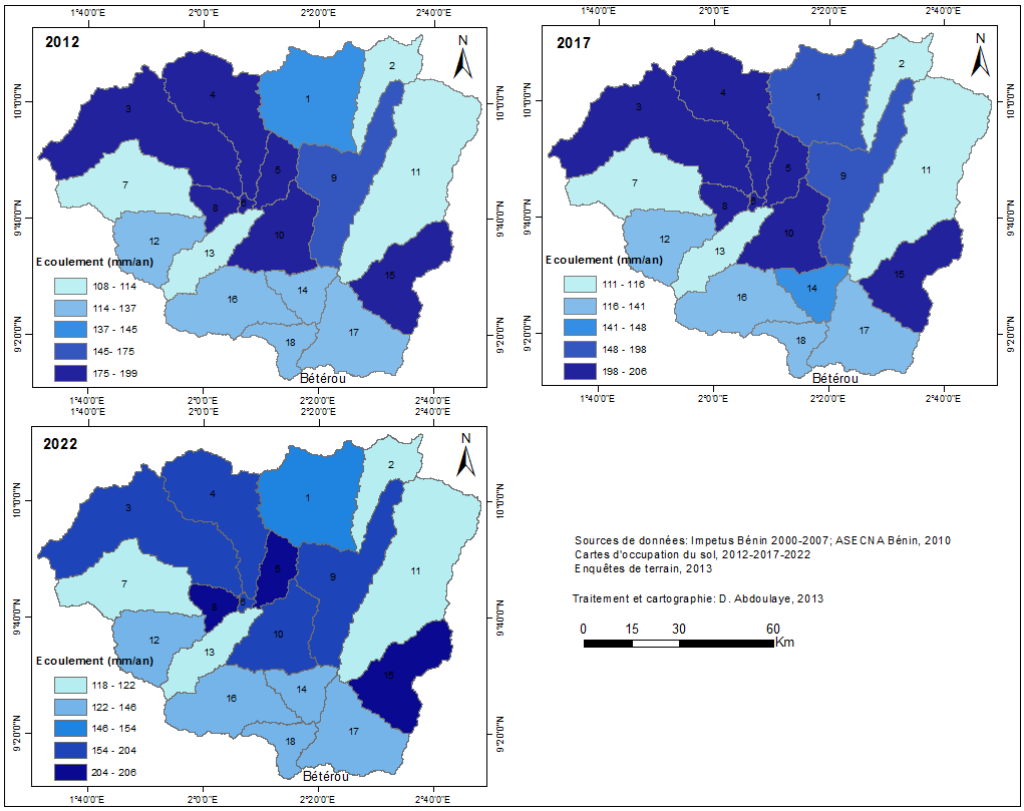


Figure 67: Evolution de l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

6.3.4.4. Production de sédiments dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou à l'horizon 2022

La perte de terre par sous-bassin versant à long terme concerne la fraction de sédiments déplacés de l'ensemble du sous-bassin versant et qui atteint réellement le réseau hydrographique (fig. 68). Les pertes sont assez élevées dans les sous-bassins versants 6, 7, 15, 17 et 18, qui doivent désormais être une priorité dans les programmes de réalisation d'ouvrages de lutte antiérosive.

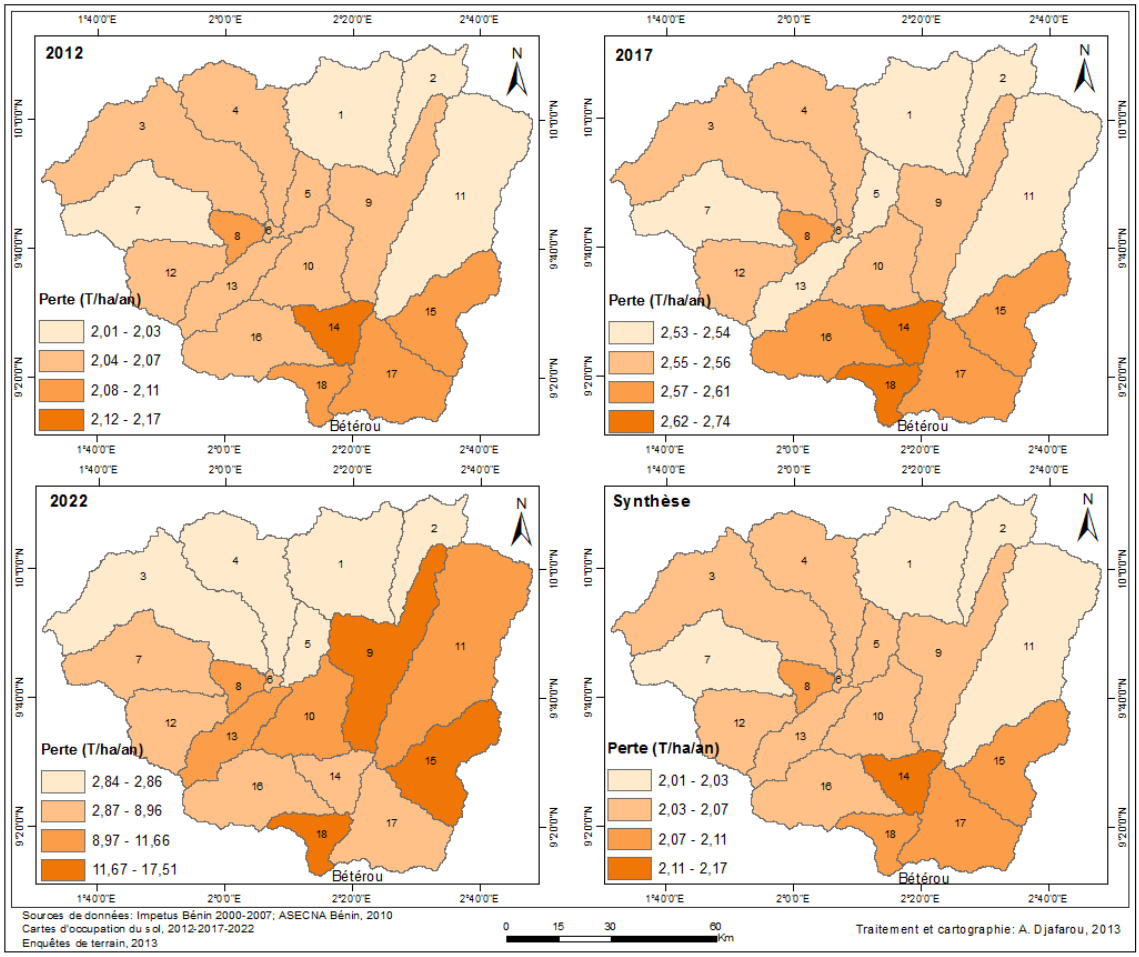


Figure 68: Evolution de la perte moyenne annuelle de terre par sous-bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou

L'analyse de la figure 68 montre que le taux annuel moyen de terre réellement transportée vers le cours d'eau dans le sous-bassin versant 18, varie entre 2,08 et 2,11 tonnes/ha/an en 2012. Ce taux variera entre 2,62 et 2,74 tonnes/ha/an en 2017 et entre 11,67 et 17,51 tonnes/ha/an en 2022. Il en résulte donc que sous les influences des occupations futures du sol dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou, il est attendu en moyenne, une augmentation de la perte de terre de l'ordre de 26 à 30 % en 2017 par rapport à celle de 2012 et de 5 à 8 fois la quantité de perte de terre enregistrée en 2012 à l'horizon 2022. Cette tendance positive est liée à l'augmentation de l'écoulement de surface suite à la réduction de la densité de la végétation et à l'accroissement des superficies agricoles.

Les études de Sintondji *et al.* (2012) dans le bassin versant de l'Okpara à Kaboua ont signalé une augmentation de l'ordre de 57% de la production des sédiments à l'horizon 2022 sous l'effet des changements dans l'occupation des sols. De même Agoïnon (2012) dans ses travaux a trouvé une perte de sédiment de 18,9 t/ha/an, une situation qu'on pourrait enregistrer dans huit ans dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou si les dispositions ne sont pas prises pour atténuer la perte de sédiments. Ce qui corrobore les résultats de Jha et *al.*(2007) qui avait trouvé un coefficient de détermination de 0,87 et une efficience du modèle (indice de Nash et Sutcliffe) de 0,87 dans ses études sur le calage de la réponse hydrologique du bassin versant de la rivière Raccoonau centre-ouest de l'Iowa avec SWAT. Benham et *al.* (2006) a également trouvé un coefficient de détermination de 0,70 et une efficience du modèle (indice de Nash et Sutcliffe) de 0,63 dans ses études de modélisation du bilan hydrologique du bassin versant d'une rivière de Sud-ouest du Missouri.

On constate que les résultats des différents modèles sont globalement satisfaisants. En effet, les valeurs obtenues pour le critère de Nash calcule´ sur les débits sont supérieures à 0,5, ce que Moriasi *et al.* (2007) qualifient de « satisfaisant » pour des simulations de débits au pas de temps mensuel.

Les travaux de recherche de Ouessar et *al.* (2009) et de Oeurng et *al.* (2012) ont aussi montré respectivement que 72 % des pluies tombées sont évaporées à l'échelle d'un bassin versant agricole dans une zone aride en Tunisie et 78,3% à l'échelle d'un bassin versant agricole de Coteaux de Gascogne en France.

.Nelson et *al.* , (2005) rapportent que la perte des nutriments et des sédiments sur le bassin versant de Delaware dans le Nord de Kansas est due à la dynamique des terres cultivées.

Conclusion

L'application du modèle SWAT aux conditions agro-climatiques dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou a exigé une bonne maîtrise des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), qui ont permis le traitement et la gestion de

l’ensemble des données ayant servi dans la caractérisation physique du bassin versant et d’entrées pour le modèle.

L’intersection spatiale des données du couvert végétal, de topographie et de pédologie a permis de créer 67 HRUs. Ce découpage a permis d’exprimer la variabilité spatiale des propriétés locales et d’en modéliser l’effet sur l’activité hydrologique.

Le calage et la validation du modèle ont été faits respectivement de 2000 à 2005 et de 2005 à 2010, se basant sur les données hydrométriques observées à l’exutoire du bassin versant de l’Ouémé à Bétérou et la contribution de l’aquifère libre estimée à partir du programme base flow de Arnold et *al.* (1999). En général, les indicateurs statistiques de l’ajustement du modèle aux débits mensuels et hebdomadaires mesurés sont acceptables.

A moyen terme (horizon 2022), la dégradation future du couvert végétal dans le bassin versant de l’Ouémé à Bétérou entrainera une augmentation de l’écoulement de surface ; ce qui impliquerait une plus grande disponibilité de l’eau de surface mais également des risques plus accrus de perte en terre. Une diminution des ressources en eau souterraine et de la production en eau du bassin versant est également attendue.

Cette étude montre que la productivité des hydrosystèmes varie dans l’espace et dans le temps, suite aux variabilités climatiques, aux fortes emprises anthropiques et aux conditions édaphiques locales. Il en résulte que tous les projets d’utilisation des ressources en eau du bassin versant, doivent tenir compte de cette variabilité spatio-temporelle desdites ressources.

Les résultats ont montré que certains sous-bassins versants possèdent des potentiels hydrauliques non négligeables. À cet effet, il est à recommander la construction des retenues d’eaux et micro barrages dans ces sous-bassins versants.

Conclusion générale

L'étude dela dynamique de l'occupation des terres sur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou a montré que plusieurs facteurs interviennent dans cette dynamique. Il s'agit des facteurs naturels (le relief et le climat) et socio-anthropologiques (migration des colons agricoles vers le bassin, production des cultures vivrières et de rentes, usage des outils rudimentaires et modernes). Tous ces facteurs associés, accroissent la pression sur les espaces agricoles dans le bassin. Ainsi, le premier objectif spécifique qui est d'identifier les causes géographique et anthropique de la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou est atteint.

La dynamique observée dans l'occupation des terres du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou entre les périodes 1990-2000, 2000-2010 et 1990-2010, portent essentiellement sur les formations naturelles (forêt dense semi-décidues, galerie forestières forêts claires et savanes boisées, savanes arborées et arbustives) et les formations anthropiques (champs et jachères, plantations et agglomérations). Cette dynamique de l'occupation des terres à révélé que de 1990 à 2010, les formations naturelles ont enregistré une régression générale de 2,25 % de leurs superficies. A ce rythme, il va de soit qu'à l'horizon 2030, elles connaîtront davantage une régression des superficies de ces unités.

Les hypothèses qui concernent le scénario de "stabilité environnementale" priorisent la préservation et une gestion contrôlée des ressources environnementales. Ainsi, il faut noter que les formations naturelles qui faisaient 51,42 % du bassin versant en 2010 pourraient être conservées jusqu'en 2030 (38,03 %). Par contre, les formations anthropiques (champs et jachères, plantations et agglomérations) connaîtront une progression de 61,85 % entre 2010 et 2030.

Sur la base des hypothèses émises par rapport au scénario « tendance vers la catastrophe », Les forêts claires et savanes boisées vont passer de 8,13 % en 2010 à 5,30 % en 2030. Les savanes arborées et arbustives seront réduites de 20,95 % à 12,19 % en 2030. Simultanément les agglomérations vont s'étendre de 0,45 % en 2010 à 2,90 % en 2030. De même les champs et jachères pourraient s'étendre également de 37,96 % à

63,91 % en 2030. Par ailleurs, le second objectif spécifique qui est de cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire Bétérou est aussi atteint.

La dynamique hydrologique dans le bassin versant a été étudiée en fonction des différents paramètres tels que les précipitations, les écoulements, l'évapotranspiration et l'infiltration. Au total, dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou, l'application du test de Pettitt a mis en évidence une rupture de stationnarité en 1987 subdivisant la période 1965-2010 en deux sous périodes (1965-1987 et 1988-2010). Ainsi, la sous périodes 1965-1987 a connu une tendance à la baisse, c'est-à-dire à la récession pluviométrique et celle de 1988-2010 a connu une tendance à la hausse, c'est-à-dire une humidification. Cette variabilité hydro pluviométrique et les différentes composantes de l'état de surface pourraient être en partie responsables de l'évolution des écoulements dans le bassin versant. Pendant la sous-période (1982-1987), l'activité photosynthétique a été intense. Cependant, on a observé une baisse importante des écoulements à cause d'une forte évapotranspiration due aux déficits pluviométriques.
Par contre, le regroupement des points autour de la droite de tendance peut s'expliquer par le fait que sur la sous-période 1965-1987, le couvert végétal est plus important et contribuerait à garder l'humidité. De même, en ce qui concerne la seconde sous période (1988-2010), l'évolution comparée de la pluie, de l'écoulement et de NDVI met en exergue une évolution relativement identique. Par conséquent, le troisième objectif spécifique qui consiste à analyser la variabilité pluviohydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou est aussi atteint.

L'analyse de l'influence de la dynamique de l'occupation des terres à travers le NDVI sur l'écoulement a révélé que le coefficient de corrélation est fort (0,4 à 0,5) pour les formations anthropiques (plantations et champs et jachères). L'application du modèle agro-hydrologique SWAT aux conditions agro-climatiques dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétrou a exigé une bonne maîtrise des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

La combinaison des données du couvert végétal, de topographie et de pédologie a permis de créer 18 HRUs. Ce découpage a permis d'exprimer la variabilité spatiale des propriétés locales et d'en modéliser l'effet sur l'activité hydrologique. Les processus hydrologiques modélisés par SWAT durant la période de calage sont donc très proches de la réalité. Le modèle SWAT a montré que l'Evapotranspiration réelle diminue. Sous l'influence des occupations futures des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, il est attendu une augmentation de l'écoulement de surface de 12 % en 2017 à 18 % en 2027. Par conséquent, il est attendu en moyenne, une augmentation de la perte de terre de l'ordre de 26 à 30 % en 2017 par rapport à celle de 2012 et de 5 à 8 fois la quantité de perte de terre enregistrée en 2012 à l'horizon 2022. De tout ce qui précède, le quatrième et dernier objectif consistant à déterminer l'influence de la dynamique de l'occupation des terres sur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou pleinement atteint.

En perspective, il s'agira de réfléchir sur l'intégration des facteurs tels que le climat, le réseau hydrographiques, la densité de la population,dans le modèle SpaCelle qui permettra de mieux apprécier la situation réelle. De plus, l'utilisation des images satellitaires à haute résolution temporelle (AVHRR de NOAA et VEGETATION de SPOT) sera déterminante, pour le suivi des aires forestières.

Poursuivre l'étude de la variabilité hydropluviométrique dans le bassin versant avec un accent particulier à la station de Bétérou

Bibliographie

Abbott, M.B. et J.C. Refsgaard (1996): *Distributed hydrological modelling*. Kluwer Akademic Publishers Dordrecht, Netherlands. 321 p.

Abdoulaye D. (2010) : Impact de la dynamique des états de surface sur l'écoulement dans le sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou, Mémoire de DEA, FLASH/UAC/Abomey-Calavi (Bénin), 88p.

Adam S. et Boko M. (1993) : Le Bénin. Paris, Edicef, 2ème édition, 93 p.

Adam S. I. (2005) : Impact environnementaux de la gestion des aires de cultures dans la Commune de Banikoara. Mémoire de DEA FLASH/UAC, Bénin 86 pages.

Adjanohoun E. J. Adjakidjè V. Ahyi M. R. A. Akeassi L. Akoègninou A. d'Almeda J. Apovo F. Boukef K. Chadare M. Cusset G. Dramane K. Eyme J. Gassita J. N. Gbaguidi N. Goudote E. Guinko S. Houngnon P. Issa LO. Keita A. Kiniffo H. V. Kone-bamba D. Musampa N. A. Saadou M. Sodogandji T. H. De-souza S. Tchabi A. Zinsou Dossa C. et Zohoun T. H. (1989) : Contribution aux études ethnobotaniques et floristiques en République populaire du Bénin. Paris, Agence de Coopération Culturelle et Technique, 895 p.

Adjinacou C. et Onibon H. (2004) : Etude multisectorielle pour le développement durable dans la portion béninoise du bassin du fleuve Niger : analyse des opportunités et des contraintes. Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN)/DG-Eau, COTONOU, 176 p.

Adjovi C. L. (1991) : Analyse statistique des précipitations dans le bas-Bénin : étude de tendance et de persistance. Mémoire de maîtrise de Géographie, UNB/FLASH. 94p.

Adomou, A.C. (2005): Vegetation patterns and environmental gradients in Benin: Implicatations for biogeography and conservation. PhD thesis, Wageningen University, 150p.

Afouda A. et Adisso P. (1997) : Etude Stochastique des structures de séquences sèches au Bénin, In sustainability of water resources under Increasing Uncertainy. IAHS Publ. N° 240, pp 153-162.

Afouda A. et Adisso P. (1997) : Etude Stochastique des structures de séquences sèches au Bénin. In Sustainability of water resources under IncreasingUncertainy. IAHS Publ. N° 240, pp 153-162.

Afouda A. et Depraetère C. (2001) : Le groupement observatoire hydrométéorologique de l'Ouémé (H2O) au Bénin : une initiative pour fédérer les études d'impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau. Séminaire international sur « L'eau, patrimoine mondial commun : pratiques innovatrices locales et gouvernance, réalités statistiques, actions interculturelles et dynamiques socio-économiques » organisé par PRELUDE du 15-19 octobre 2001, Cotonou, Bénin, 5 p.

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

Agbidinoukoun A. S. (2011) : Estimation des ressources en eau superficielles à l'horizon 2025 dans l'Ouémé à Bétérou, Savè et le Zou à Atchérigbé à l'aide des modèles GR2M et GR4J. Mémoire de Master, 2iE, Ouagadougou (Burkina Faso), 61p.

Agbidinoukoun A. S. and Gbaguidi F. (2007) : Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) au Bénin. Apport quantitatif du bassin du Fleuve Ouémé ; Mémoire d'Ingénieur, EPAC/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 80p.

Agli H. (1995) : Recherches sur la variabilité pluviométrique dans le bassin versant du Niger au Bénin. Mémoire du DEA "climats et contraintes climatiques", Centre de Recherche de Climatologie, Dijon, 48 p.

Agoïnon N. (2012) : Etude morphodynamique du bassin versant du Zou à l'exutoire de Domè (République du Bénin). Thèse de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, DGAT/FLASH/UAC, 240 p.

Ahouansou M. (2008) : Modélisation du bilan hydrologique dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè : contribution à la gestion intégrée des ressources en eau. Mémoire d'ingénieur agronome. FSA, UAC, Abomey-Calavi, Bénin, 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.

Akognongbé A. J. S. (2008) : Caractérisation hydropluviométrique avec le modèle GR4J sur le bassin de l'Ouémé supérieur à Savè et du Zou à Atchérigbé. Mémoire de Maîtrise de Géographie. UAC/FLASH/DGAT, 96 p.

Akongnongbé A.J.S. (2014) : Influence de la variabilité climatique et les activités anthropiques sur les eaux de surface dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou au Bénin. Thèse de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, DGAT/FLASH/UAC, 255 p.

Albergel J. (1987) : Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface : Application aux petits bassins du Burkina Faso. IAHS Publ. N° 168, 12 p.

Albergel J. et Valentin C. (1988) : « Sahélisation » d'un petit bassin versant soudanien Kognere - Boulsa, au Burkina Faso. In Dégradation des Paysages en Afrique de l'Ouest..., Séminaire de Dakar, 21-26 novembre 1988, pp 119-133

Allan J. D. (2004): Landscapes and riverscapes : The influence of land use on stream ecosystems. In AnnualReview of Ecology Evolution and Systematics 35, pp 257-284.

Amani K. M. (2003) : Apports des méthodes statistiques et géostatistiques à l'étude de la Variabilité hydroclimatique dans la région semi-montagneuse de Côte d'ivoire. Cas du bassin versant du N'Zo. Mémoire de DEA des Sciences de la Terre, Université de Cocody, 65 p.

Ambroise B. (1991) : Hydrologie des petits-bassins versants ruraux en milieu tempéré - Processus et modèles-, Les flux dans les volumes pédologiques et à leurs limites : approches à l'échelle spatiale du bassin versant". INRA, Dijon.

Ambroise B. (1999) : *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, HGA Bucarest, 200 p

Ambroise B. (1994) : Du BVRE, bassin versant représentatif et expérimental, au BVR, bassin Versant de recherche. In : D.H.a.J.L. Verrel (Editor), Du concept de BVRE à celui de Zone Atelier dans les recherches menées en eaux continentales. Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris. France. 10-11/05/1994, pp. 11-24.

Amoussou E. (2005) : Variabilité hydroclimatique et dynamique des états de surface dans le bassin versant du Couffo. Mémoire de DEA, FLASH/UAC, 93 p.

Amoussou E. (2010) : Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat Unique, Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie (CRC) CNRS – UMR 5210, 315 p.

Ardoin-Bardin S. (2004) : Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 240 p.

Arnaud M., Emery X. (2000) :. Estimation et interpolation spatiale. Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Editions Hermès Sciences Publications, Paris, 221 p.

Arnold J. G. Williams J. R. Srinivassan R. Kin K. W. (1999): SWAT: Soil and Water AssessmentTool, USDA, ARS: Temple, TX.

Arnold J.G. Williams J. R. Srinivassan R. King K. W. (1994): SWAT: Soil and Water AssessmentTool, USDA, ARS: Temple, TX.

Arouna O. (2002) : L'exploitation des ressources biologiques et la dynamique de la forêt classée de l'Alibori supérieur (secteur de l'arrondissement Bagou). Mémoire de maîtrise FLASH/UAC, Bénin, 114 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 Unique Université d'Abomey-Calavi, 246 p.

Arouna O. Toko I. Djogbénou C. P. et Sinsin B. (2011) : Comparative analysis of local populations perceptions of socio-economic determinants of vegetation degradation in soudano-guinean area in Benin (West Africa). In International Journal of Biodiversity and Conservation, 3(7), pp 327-337.

Assaba H. M. (2014) : Impacts des péjorations pluviométriques et de la dynamique de l'occupation du sol sur les ressources en eau dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Savè. Thèse de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, DGAT/FLASH/UAC, 282 p.

Atchadé G. A. (2011) : Impacts de la variabilité pluviométrique sur les ressources en Eau superficielles bassin du Zou. Mémoire de DEA. Géographie et Gestion de l'Environnement, 84 p + Annexes.

Aubreville A. (1950) : Flore forestière soudano-guinéenne. Société d'Editions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris, 523 p.

Awa P. O. (2013) : Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè. Thèse de doctorat unique de géographie, Université de Ouagadougou, 305 p.

Baillargeon S. (2005) : Le krigeage : revue de la théorie et application a l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire présente a la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maitrise en statistique pour l'obtention du grade de Maitre des sciences (M.Sc.). Faculté des sciences et de génie Université Laval Québec, 137 p.

Ballouche A. (2004) : L'Aridification du paysage" en Afrique de l'Ouest à l'holocène récent. Changement climatique et/ou action anthropique? In AIC Caen, pp 113-115.

Bamba F., Mahe G., Bricquet J.P., Olivry J.C. (1996) :. Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du haut Niger et de la cuvette lacustre. In. Fritsch J.M. Paturel J.E. & Servat E. (Eds): Réseaux hydrométriques réseaux télématiques réseaux scientifiques, nouveaux visages de l'hydrologie régionale en Afrique au XIIèmes Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, CD-Rom ORSTOM, 26 pages.

Bamba I. (2010) : Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en république démocratique du Congo Thèse de Doctorat, Université libre de bruxelles, 205 p.

Batty M. et Longley P. A. (1994) : Fractal Cities : A geometry of farm and function. Academic Press

Benham, B. L. C. Baffaut R. W. Zeckoski K. R. Mankin Y. A. Pachepsky A. M. Sadeghi K. M. Brannan M. L. Soupir and Habersack M. J. (2006): Modelingbacteria fate and transport in watershedmodels to support TMDLs. Trans. ASABE 49(4):987-1002

Bénichou P. Le Breton O. (1987) : Une méthode d'analyse utilisant le relief pour les besoins de l'hydrométéorologie. In : Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Paris : ORSTOM, 1987, p. 299-304. (Colloques et Séminaires). Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 2. Montpellier (FRA), 1986/09/16-17. ISBN 2-7099-0865-4.

Benkrid E. H. (2008) : Etude de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la plaine du Bas Chéliff (Algérie). Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement, 54 p.

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

Bizangi K. (2004) : Impact de la production des combustibles ligneux en RDC cas du Katanga, de Kinshasa et du Bas-Congo. In : Acte des séminaires de formation et ateliers de haut niveau en évaluation environnementale. 12-17 Janvier 2004. Kinshasa (R. D. Congo) : Association Nationale pour l'Evaluation Environnementale (ANEE), pp. 105-119.

Boak G. (2007) :. Pollution des eaux et rivières et impact sur les populations riveraines: cas de la rivière Mgoua dans la zone industrielle de Douala-Bassa. Master en gestion de l'eau option environnent. Université de Dschang-FASA, 89p

Bogaert J. et Mahamane A. (2005) : Ecologie du paysage: cibler la configuration et l'échelle spatiale. In Annales des Sciences Agronomiques du Bénin, 7,pp 39-68.

Bokary A. K. (2011) : Growth response of Anogeissus leiocarpacoppices to prescribed fire and weeding after plantation harvesting in the Sudanian zone of Mali, West Africa. African Journal of Plant Science, 5(2) : 92-101.

Boko G. J. (2012) : Trajectoires des changements dans l'occupation du sol : déterminants et simulation. Cas du bassin versant de l'Alibori (Bénin, Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, de l'université d'Abomey-Calavi, 291 p

Boko M. (1988) : Climats et communautés rurales du Bénin. Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse d'Etat, Paris IV, 2 volumes, 608 pages.

Boko M. (2000) : Méthodes et techniques des sciences environnementales. CIFRED (édition provisoire), Coopération Pays-Bas – Bénin, CBDD, Cotonou, 288 p.

Borgui, C. et Leffi, S. L. (1992) : Aspect actuel de la dynamique de l'environnement dans les versants ouest du cours de l'Okpara. Mémoire de maîtrise, Faculté des lettres, arts et sciences humaines, Université nationale du Bénin, Abomey-Calavi, 95 p.

Bossa Y. A. (2007) : Modélisation du bilan hydrologique dans le bassin du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé : contribution à l'utilisation durable des ressources en eau. DEA FSA/UAC, 96 P.

Boukari M. (1998) : Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse de Doctorat d'Etat. UCAD, Dakar, 278 p. + annexes.

Brunet R., Ferras R., Thery H. (1992) : Les mots de la géographie : Dictionnaire critique. Ed. RECLUS, Collection Dynamiques du Territoire, 470 p.

Burel F. Baudry J. (1999) : Ecologie de paysage. Concepts, méthodes et applications : Paris, Edition TEC et DOC, 359 p.

Caloz R. Collet C. (2001) : Précis de télédétection, volume 3 : traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec, Agence Universitaire de la Francophonie, Sainte-Foy, Canada.

Camberlin P. Martiny N. Philippon N. Richard Y. (2007): Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. Remote Sens. Environ. 106: 199-216.

Carbonnel J.-P. et Hubert P. (1992) : Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Remise en cause de la stationnarité des séries. Collection Didactique L'Aridité, Edit. ORSTOM, 1992, 37-52

Casenave A. et Valentin C. (1989) : Les états de surface de la zone sahélienne. Ed. ORSTOM, collection Didactiques, 227 p.

Castany G., 1998. Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod, Paris, 236 p.

Chamard. C. et Courelm. F. (1979) : Contribution à l'étude du Sahel voltaïque. Causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal des dunes, Secteur de Menegou-Bidi (Département du Sahel-sous-préfecture de l'Oudalan), Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, 75-90.

Champeaux J. L. Arcos D. Bazil E. Girard D. (2000): AVHRR-derived vegetation mapping over western Europ for use in numerical weather prediction models, International of Remote Sensing, 21, 1235-1249.

Chander G. Markham B. (2003): Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 41(11) 2674-2677.

Chander G. Markham B. Helder D. (2009): Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sens. Environ. 113(5) 893-903.

CILSS. (1998): Décentralisation and local Capacity Building in West Africa ; Results of the PADLOS-Education Study, CILSS, Ouagadougou.

Clarke K. C. Hoppen S. and Gaydos L. (1997): A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area. In Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 24, pp. 247-261.

Codjia C. L. et Gnagna P. (1993) : Dynamique des paysages des forêts classées de Toui et de Kilibo. Mémoire de Maîtrise de géographie. FLASH, UNB, 96 p.

Congalton R.G. et Green K. (2009) : Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, 2nd ed. CRC/Taylor et Francis, Boca Raton, Florida, USA.

Cosandey C. Bigot S. Dacharry M. Gille E. Lagarnier R. Salovador P. G. (2003) : Les eaux courantes : Géographie et environnement. Edition Berlin, Paris, 239 pages.

Cosandey C. et Robinson M. (2000) : Hydrologie continentale. Paris, A. Colin, col. «U», 360 p.

Crotet L. 2007 : Simulation de l'étalement urbain autour du bassin de Thau dans le cadre de l'élaboration du SCOT de Thau, mémoire d'ingénieur, DAA, Montpellier, Sup'Agro, Cemagref, 100 pages.

Cuny P. et Sorg J.P. (2003) : Forêt et coton au sud du Mali : cas de la commune rurale de Sorobasso. Bois et Forêts des Tropiques, 276: 17-31.

Da Dapola (1993) : Croûte de battance et micro marches d'escallier in : aspects des milieux naturels du Burkina Faso, Université de Ouagadougou, Département de Géographie. Collection pays enclavé n°7 pp 47-60

Dagnélie, P. (1970) : Théorie et méthodes statistiques. Les presses agronomiques de Gembloux. Vol. 2, 463 p.

Dai X. Khorram S. (1998) : The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 36(5) 1566-1577.

Davenport M. L. et Nicholson S. E. (1989): On the relation between rainfall and Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. International Journal of Remote Sensing, 12: 2369-2389.

Davenport M. L. et Nicholson S. E. (1993) :.On thé ralation between rainfall and thé Normalized Différence Végétation Index for diverse végétation types in east Africa. *Inter. J. Remove Sensing*, 14, pp 2369-2389

De Sherbinin, A. (2002): Land use and land cover Change. A CIESIN Thematic Guide, Palisades, NY: Center for International Earth Science Information Network of Columbia. NY, USA, 149 p.

Delhez E. J. M. (2005) : Méthodes mathématiques d'analyse et de modélisation appliquées à l'environnement. Chapitre 3 : Interpolation, 46-100.

DH (1985) : Carte hydrogéologique du Bénin. Fonds européen de développement. Géohydraulique. Echelle 1/500000.

Di Luzio M. Srinivasan R. Arnold J.G. Neitsch S. L. (2001): Arcview Interface For SWAT 2000 User's Guide. Grassland Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. 351pp.

Diello P. (2006) : Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse, Université Montpellier II. 395 p.

Direction des Forêts du Burkina Faso (2010) : Convention sur la diversité biologique. 4ème rapport national à la conférence des parties. 119 p.

Dissou M. (1983) : La palmeraie béninoise : exploitation traditionnelle et aménagement volontaire. Thèse de Doctorat d'état, Paris X, 325 pages.

Dossou-Yovo E. (2009) : Modélisation du bilan hydrologique du bassin versant de l'Okpara à Kaboua : Contribution à la gestion intégrée des ressources en eau. Thèse d'ingénieur agronome, FSA-UAC.109p.

Dossou-yovo E. R. (2011) : Impacts des changements climatiques et de la dynamique du couvert végétal sur les ressources en eau dans le bassin de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua à l'horizon 2025. Mémoire de DEA/FSA /Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 132p

Dubos-Paillard E. Guermond Y. et Langlois P. (2009) : L'analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle. L'espace géographique, n° 4, p. 357-378.

Dubreuil V. Lecerf R. et Hubert-Moy L. (2004) : Analyse de la variabilité climatique interannuelle en région de paysage hétérogène (Bretagne) à partir de synthèses mensuelles NDVI à base résolution, AIC, Caen, 31-33 pages.

Eastman R. (2009) : Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing, manual version 16.02, Clark University.

El-Ouafi M. (1993) : Etude des étiages en région crayeuse par l'analyse des tarissements. Application aux bassins de l'Aa, de la Hem, de la Liane et d el'Authie (Nord de la France), Thèse d'Université, Lille-I, multigrade.

Escadafal R. (2007) : Les bases de la surveillance de la désertification par satellites. In Sécheresse, 18 (4) : 263-270

FAO [United Nations Food and Agriculture Organization] (1994) : Evaluation des besoins d'aide alimentaire. Rome, 24 p.

Fares B. (2012): Etude et modélisation des crues des cours d'eaux en milieu semi-aride « cas des grands bassins versants 05, 06 et 07 ». Diplôme de Magister en Hydraulique 181p

Faure P. (1977) : Carte pédologique de reconnaissance de la république populaire du Bénin à 1/200 000, Feuille de Djougou. ORSTOM, Paris, 49 p.

Faure P. et Volkoff B. (1996) : Différenciation régionale des couvertures pédologiques et litho géomorphologie sur socle granito-gneissique du Bénin (Afrique occidentale). C. R. Acad. Sci., 322 : 393-400.

Fischer G. Frohberg K. Parry M.L. et Rosenzweig C. (1994) : Climate change and world food supply, demand and trade. In Global Environ. Change. 4 (1), pp. 7-23.

Fischer G. Frohberg K. Parry M.L. et Rosenzweig C. (2001): Climate change and world food supply, demand and trade. Global Environ. Change. 4 (1), pp 7-23.

Fontaine B., Janicot S. (1993) : L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. La Météorologie, 8e série, n°. 1, pp. 28-41.

Foody G. M. (2003): Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: an example focused on the NDVI-rainfall relationship. Remote Sensing of Environment, 88: 283-293.

FOSA- Bénin, (2001) : L'Etude prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA). République du Bénin, Ministère du Développement Rural, Direction des Forêts et des Ressources Naturelles, Bénin, 64 p.

Fournier J. Serpantier G. Delhoume J.-P. et Gathelier R. (2000) : Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina : Application à l'aménagement des versants. In: Floret C. et Pontanier R. (Editors). In: La jachère en Afrique tropicale : Rôle, Aménagements, Alternatives. 179-188.

Fowé T. Karambiri H. Ibrahim B. et Yacouba H. (2011) : Scénarisation de la dynamique de l'occupation des sols sur le bassin versant du Nakanbé en amont de Wayen. 6ème édition des journées scientifiques du 2iE, Ouagadougou, tazen.fowe@2ie-edu.org , consulté le 24 janvier 2014.

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

Fritsch J-M. (1995) : Occupation des sols et régimes hydrologiques : les enseignements des basins-versants guyanais. *Annales de Géographie*. Vol. 104, n° 581, pp 26-63.

George P., Verger A. (2006) : Dictionnaire de la Géographie, Paris, Quadrige, 521 p.

Georges Y. (2008) : Contribution à l'évaluation de l'érosion dans le bassin versant de la rivière grise en Haiti. Mémoire de Master, faculté universitaire des sciences agronomiques, Liège (Belgique), 90p.

Giertz S. Diekkrüger B. Jaeger A. Schopp M. (2006): An interdisciplinary scenario analysis to assess the water availability and consumption in the UpperOuémécatchment in Benin, Adv. Geosci. 9: 3-13.

Giertz S. Junge B. et Diekkrüger B. (2005): Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in the sub-humid tropical environment ofWestAfrica.PhysicsandChemistryoftheEarth,30,pp:485-496.

Giret A. (2007) : Hydrologie fluviale. Paris, Ellipses, col. «Universités Géographie», 262 p.

Gonzalez P. (2001) : Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel, Climate Research, 17: 217-228.

Gonzalez-Hidalgo J. C. De Luis M. Raventos J. Sanchez J. R. (2001): Spatial Distribution of Seasonal Rainfall Trends in A Western Meditarranean Area. International Journal of Climatology, 21, 843–860.

Goula Bi T.A. Savane I. Brou K. Vamoriba F. et Gnamien B.K. (2006) : "Impact de la Variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide)". Revue en science de l'environnement Vertigo vol 7, n° 1, p. 1-12.

Gravelius H. (1914): Grundrifi der gesamten Gewâsserkunde, Band 1: h'lufikunde (Compendium of Hydrology, vol. 1: Rivers, in German). Goschen, Berlin, Germany pp 32-46

Gregoire J-M. et Giovani F. (1990) : Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins du Haut-Sénégal, de la gambie et du Rio Corubal (novembre 1987- décembre 1988). Télédétection et sécheresse, ed AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext, Paris, pp. 81-93.

Gueye B. et Schoonmaker-Freudenberger K. (1991) : Introduction à la méthode accélérée de recherche participative (Marp ; Rapid Rural Appaisal), quelques notes pour appuyer une formation pratique, Londres, IIED. 70 p.

Gueye M. et Ozer A. (2000) : Apport de la télédétection à l'étude de la transformation de l'agriculture et de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional). In « La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives », Dubois, J.M.M., Caloz, R. et Gagnon, P. (Eds.), AUPELF-UREF, 141-151.

Guillet F. (1997) : Description et cartographie des états de surface d'un petit bassin versant soudano-sahélien. Hydrology, vol 300, PP 33-43.

Hagen E. H. (2003) : The bargaining modèle of depression. In Genetic and Cultural Elevation of Cooperation, pp. 95-123. P. Hammerstein, ed. MIT Press.

Hall F.G. Botkin D. B. Strebel D.E. Woods K.D. Goetz S. J. (1991) : Large-Scale Patterns of Forest Succession as Determined by Remote Sensing. Ecology 72(2) 628-640.

Heller E. Rhemtulla J.M. Lele S. Kalacska M. Badiger S. Sengupta R. Ramankutty N. (2012): Mapping Crop Types, Irrigated Areas, and Cropping Intensities in Heterogeneous Landscapes of Southern India Using Multi-Temporal Medium-Resolution Imagery: Implications for Assessing Water Use in Agriculture. Photogramm. Eng. Rem. S. 78(8) 815-827.

Hernandez K. (1994) : Climat et production agricole dans le region de Djougou en République du Bénin (Afrique Ocidentale). Mémoire de maîtrise, Dijon 55 pages.

Hiepe C. (2008): Soil degradation by water erosion in a sub-humid West-African catchment-amodellingapproachconsideringlanduseandclimatechangeinBenin.Thèse

de doctorat, Université de Bonn.

Hoang K. H., Bernier M. et Villeneuve J-P. (2008) : Les changements de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Câu (VIÊT-NAM) : Essai sur une approche diachronique. Revue Télédétection, 2008, vol. 8, n° 4, pp. 227-236.

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 doctoral, Faculté des Sciences, Laboratoire de Systématique et Phytosociologie. ULB, Belgique, 241 p.

Houinato M. R. B. et Sinsin B. (2001) : Analyse phytogéographique de la région des Monts Kouffé au Bénin. XVIth AETFAT Congress.Syst. Geogr. Pl., 71: 889-910.

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 Bot. Gallica, 148(3) : 237-251.158

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 pages.

Houndénou C. (1999) : Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide, l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne Dijon. 390 pages.

Hountondji H. Yvon-C. (2008) : Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert vegetal. Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences de l'Université de Liège, 153 p.

Hountondji P.J. Mètèhoué G.P. Adandé A.B. dah-Lokonon G.B., Tchitchi T. Y. (1994) : Les savoirs Endogènes – Pistes pour une recherche. Edition Karthala, Paris, 345 p.

Houssou C. S. (1998) : Les bioclimats humains de l'Atacora (Nord-Ouest Du Bénin) et leurs implications socio-économiques, thèse de doctorat, CRC, Université de Bourgogne, Dijon, 328 pages.

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

Hubert P. Carbonnel J.P. and 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., Carbonnel J. P., (1987): Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. Journal of Hydrology, 95; 165-183.

Idiéti E. M. (2009) : Variabilité hydroclimatique dans le bassin versant de la Pendjari (Nord-Ouest du Bénin). Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 94p.

IFPRI [International Food Policy Research Institute]. (2002): Endinghunger in Africa: Only the small farmer can do it. International Food Policy Research Institute. Washington, DC, 66 p.

Igué A. M. (1991) : Etude pédologique de la ferme de l'Okpara. Echelles 1/50000 et 1/5000. Projet de développement de la production Animale. CENAP, Etude N° 294, 125 p.C2

IMPETUS. (2005): Benin Atlas – Research results version 0.7. IMPETUS, Remote Sensing Research Group, University of Bonn, Bonn

INSAE. (2003) : Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation. Cotonou, Bénin

INSAE. (2004) : «Cahier des villages et quartiers de villes du département de l'Ouémè» ; Cotonou, Unicef, 28 p.

Jannicot 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.

Jansen L. J. M. Bagnoli M. and Focacci M. (2008): "Analysis of land-cover/use change dynamics in Manica Province in Mozambique in a period of transition (1990–2004)". Forest Ecology and Management. Vol. 254, n° 2, pp. 308-326.

Jayroe R. R. J. Atkinson R., Dasarathy B. V. Lybanon M. Ramapryian H.K. (1976): Classification software technique assessment. NASA Technical Note TN-D-8240.

Jha, M., P. W. Gassman, and J. G. Arnold. (2007): Water quality modeling for the Raccoon River watershedusing SWAT2000. Trans. ASABE 50(2): 479-493.

Johnson L. B. and G. E. Host. (2010): Recent developments in landscape approaches for the study of aquatic ecosystems. Journal of the North American Benthological Society, 29 : 41-66

Judex M. (2006) : Scénarii de modélisation de la dynamique d'utilisation des terres. IMPETUS, Atlas du Bénin. pp 87-88.

Judex M. Thamm H.P.et Menz G. (2006) : Dynamiques d'utilisation des terres dans le centre du Bénin. IMPETUS, Atlas du Bénin. pp 85-86.

Justice C. O. Digdale G. Townshend J. R. Narracott A. S. et Kumar M. (1991): Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semiarid West Africa. International Journal of Remote Sensing, 12: 1349-1368.

Kamagaté B. Séguis L. Lanciné G. D. Favreau G. et Kouadio K. (2008) : Processus hydrogéochimiques et séparation d'hydrogrammes de crue sur un bassin versant en milieu soudano-tropical de socle au Bénin (Donga, haute vallée de l'Ouémé), 2008. Revue des sciences de l'eau, vol. 21, n° 3, pp 363-372.

Kamagaté B. (2006) : Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute Vallée de l'Ouémé). PhD-Thesis, University of Montpellier II, 320 pages.

Kounou R. (2009) : Impacts du changement climatique et de la dynamique du couvert végétal sur les ressources en eau dans le bassin de l'Ouémé à savè à l'horizon 2025: Contribution à la gestion intégrée des ressources en eau. Thèse d'Ingénieur Agronome, FSA- UAC, 120p.

Kuberow H. (1994) : Quantitative and qualitative erfassungvon vegetations änd erungen – Einbeispielausdem Süd sahel Malis, Die Erde, 125: 35-56.

Lagabrielle E. (2003) : Télédetection des changements et SIG – Application à l'évolution des modes d'occupation des sols à la Réunion entre 1989 et 2002, mastère SILAT, AgroParisTech, Sup'Agro, projet TEMOS.

Lajoie, G. et Hagen-Zanker, A. (2007) : La simulation de l'é talement urbain à la Ré union. apport de l'automate cellulaire pour la prospective territoriale ., Cybergeo: European Journal of Geography [En ligne], Syst.mes, Mod G ostatistiques,

Lalande N. Cernesson F. Decherf A. Tournoud M. G. (2012) : Evaluation de l'influence de l'occupation du sol sur la qualité des cours d'eau en utilisant le cadre DPSIR : Application sur le bassin de la Saône, IS, RIVERS, 3 p.

Lamachère J. M. (1994) : Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zone sahélienne et soudanienne (Burkina-Faso). Effet sur les ruissellements. Xème journée hydrologique, ORSTOM, Montpellier, pp. 91-103.

Lambert R. (1973) : Recherches hydrologiques sur le Sud-ouest du Bassin de la Garonne. *Doctorat d'Etat*, Toulouse, 457 p.

Lambin E. F. Geist H. J. Lepers E. (2003): Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. Annual Review of Environmental Resources, 28: 205-241.

Lambin E. Baulies X. Bockstael N. Fischer G. Krug T. Leemans R. Moran E. F. Rindfuss R. R. Skole D. Turner II B. L.Vogel C. (1999) : Land-Use and Land-Cover change: implementationstrategy, IGBP Report n° 48/IHDP Report N°.10, IGBP.

Lane L. J. (1982): Distributed model for smallsemi-aridwatersheds. J. Hydraulic Eng., ASCE, 108 (HY10): 1114.1131.

Lane L. J. (1983): Chapter 19: Transmission Losses. In Soil Conservation Service. National engineering handbook, section 4: hydrology. U.S. Government Printing

Office, Washington, D.C.

Langlois P. (2001) : le modèle SpaCell. Base de données du Groupe Modèles du GDR Libergéo, pp. 111-125

Lawin E. (2007) : Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute la haute vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin ; PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) et Université d'Abomey-Calavi, 211p.

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

Le Lay M. (2002) : Caractérisation hydrologique et simulation numérique des écoulements sur le bassin versant de la haute vallée de l'Ouémé (Benin). Rapport de DEA/MMGE, Université Joseph Fourrier, 40 pages + Annexes.

Le Lay M. (2006) : Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydroclimatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin ; PhD thesis, LTHE/UJF/INPG, Grenoble (France), 251pThèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, LTHE, UMR 5564, CNRS-INPG-IRD-UJF, 251 p.

Leduc C. Favreau G. et Schroeter P. (2001): Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. J hydrol, 243: 43-54.

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, p. 503-506.

Lefèbvre R. (2003) : Ecoulement dans les milieux poreux saturés et les aquifères. In Ecoule ment multiphasique en milieux poreux. Module de cours, Université Laval, Canada, 44 p.

Legates D.R. et G.J. Mc Cabe, (1999): Evaluating the use of 'goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research 35, p. 233 -241.

Leroux L. (2012) : Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS- Cas d'étude du communal de Djougou, rapport HydroScience Montpellier, ANR ESCAPE, 62 p.

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

Lindqvist S. et Tengberg A. (1994): New evidence of desertification from case studies in

Linsoussi A. C. (2000) : Evaluation des risques climatiques en matière de gestion des ressources en eau. Contribution à la caractérisation événementielle des régimes ouest-africains et de leur fluctuation. Thèse d'ingénieur agronome, FSA/UAC. 59 p.

Loireau M. (1998) : Espaces – Ressources – Usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. Thèse Université Montpellier III – Paul Valery 411 p.

Loup J. (1974) : Les eaux terrestres. Masson, Paris, 171 p.

Lu D. Mausel P. Batistella M. and Moran E. (2004): "Comparison of Land-Cover Classification Methods in the Brazilian Amazon Basin". Photogrammetric Engineering et Remote Sensing. Vol. 70, n° 6, pp. 723-731.

Lubès H. Masson J.M. Servat E. Paturel J.E. Kouame B. 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.

MAEP (2001) : Déclaration de la Politique de développement Rural au Bénin, 47 p.

Mahamane A. (2007) : Analyse diachronique de l'occupation des terres et caractéristiques de la végétation dans la commune de Gabi (région de Maradi, Niger) pp.296-304.

Mahé G. (2005) : Tendances et discontinuité dans les séries de pluie regionales en Afrique de l'Ouest et Centrale: 1951-1989. Journal des Sciences Hydrologiques, 42(2) : 211-226.

Mahé G. (1992) : Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse de doctorat, université Paris XI ORSAY, Paris, 384 p.

Mahé 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-pub. 274. Cape Town - South Africa. 69-76.

Mahé G. et Olivry J.C. (1995) : Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 a 1989. Sécheresse, 6(1) : 109-

Mahé G. Leduc C. AmaniI A. Paturel J.E. Girad S. Servat E. Dezetter A. (2003) : Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. In : Hydrology of the Mediterranean and semi-arid regions (Servat E., Najem W., Leduc C., Ahmed S., Sci. Eds). Proceedings of the International Conference, Montpellier, France, 1 - 4 avril 2003. IAHS Publication n° 278, 215-222.

Mahé G. L'Hote Y. Olivry J.C. Wotling G. (2001): Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa, 1951–1989. Hydrol. Sci. J. 46 2, pp. 211–226.

Mahé G. Olivry J.C. Desouassi R. Orange D. Bamba F. et Servat E. (2000) : Relation Eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali, C.R. Acad. Sci., Sciences de la Terre et des Planètes, 330, 689-692.

Mainguet M. Dumay F. Ouldelhacen M. L. et Maefoudh A. (2001) : «Diagnostic parla télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne :période d'amorce de la désertification en Mauritanie saharo- sahélienne», Télédétection,2:129-136.

Malo A. R. et Nicholson .E. (1990) : A study of the rain fall and vegetation dynamics in the African Sahel using the Normalized Difference Vegetation Index.JournalofAridEnvironments,19:1-24.

Mama V.J. (2002): An integrated approach for land-use/cover change analysis in a central region of Benin Republic. PhD Thesis, Geography, University of Lagos, Lagos, 221 p.

Mama V.J. et J. Oloukoi (2010): Modelling land use and land cover change in a central region of the Republic of Benin, using a Markov Model, Environtropica, 5-7, pp. 72 – 88.

Manandhar R. Odeh I. Ancev T. (2009): Improving the Accuracy of Land Use and Land Cover Classification of Landsat Data Using Post-Classification Enhancement. Remote Sens. 1(3) 330-344.

Mas J. F. (1999): Monitoring land-cover changes: A comparison of change detection techniques. Int. J. Remote Sens. 20(1) 139-152.

Mas J. F. Kolb M. Houet T. Paegelow M. Olmedo M. (2011) : Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. RIG – 21/2011.

Matheron G. (1971) :. The theory of regionalised variables and their applications. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique, fasc. 5, Centre de géostatistique,Fontainebleau, 212 p

McKay M. D. Beckman R. J. et Conover W. J. (1979) : A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics 21, p. 239 – 245.

MECCAGPDPE-PNUD, (2000) : Dynamique démographique, question agraire, et urbanisation au Bénin. Etudes Nationales de Perspectives à long terme. NLTPS-BENIN 2025. Ministère d'Etat Chargé la Coordination de l'Action Gouvernementale, du Plan, du Développement et de la Promotion de l'Emploi (MECCAGPDPE), et le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), 147p. + Annexes

Mémento de l'Agronome (1980) : Ministère de la Coopération; République Française, 1600p.

Métadier M. (2006) : Bilan hydrologique du bassin de la Donga (zone soudanienne centre-Bénin) et d'un de ses sous-bassins par modélisation (Topamma). Etude du réalisme, Rapport de Master Recherche Eau et Environnement, ENSAM (Sup-Agro)/IRD/UM II, Montpellier (France), 89 p.

Meylan P. et Musy A. (1998) : Etude des processus hydrologiques par traçage environnemental. Hydrologie fréquentielle, cours polycopié, EPFL seminarcantemir uaicro doc PGSDC No 19-20 p 107 pdf.

Milich L. et Weiss E. (2000) a.: Gacndvi interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. International Journal of Remote Sensing, 21:235-260.

Milich L. et Weiss E. (2000) b.: GACNDVI images: relationship torain falland potential evaporation in the graz in glands of the Gourma (northern Sahel) and in the croplands of the Niger-Nigeria border (southern Sahel). International Journal of Remote Sensing, 21:261-280.

Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Binger, R. D. Harmel, and T. Veith. (2007) : Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASABE 50(3): 885-900.

Morris M. D. (1991): Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. Technometrics, 33(2), pp. 161-174.

Moser S.C. (1996) :A Partial Instructional Module on Global and Regional Land Use/Cover Change: Assessing the Data and Searching for General Relationships. Geojournal 39(3) : 241-283.

Mulindabigwi V. et Janssens, M. J. J. (2003) : Land Use, Farming Systems and Carbon Sequestration in Oueme Catchment in Benin. University Kassel, Tropentag, Kassel/Germany.

Mulindabigwi V. Janssens M. J. J. (2002) : Influence des systèmes d'utilisation du terroir sur la dynamique de la matière organique et sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans la haute vallée de l'Ouémé/Bénin. Actes du symposium sur ''la gestion efficiente des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouémé. Cotonou, Bénin pp. 49.

Musy A. Maglaine V. (1992) : Hydrologie générale. Cours polycopié, section génie rural, environnement, mensuration, EPFL, Lausanne.

N'djafa-Ouaga H. et Courel M. F. (2000) : Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitale pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux : cas de la sous-préfecture de Mandélia dans le département de Hadjer Lamisau Tchad. In «La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives», Dubois, J. M. M., Caloz, R. et Gagnon, P. (eds.), AUPELF-UREF, 177-185.

Nash J. E. et Sutcliffe J. V. (1970): River flow fore casting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. Journal of Hydrology 10, pp. 282-290.

Neitsch S.L. (2002): Soil and Water AssessmentTool, User'smanual. Published by Texas Water Resources Institute, Texas; 412p.

Nelson, R. G., J. C. AscoughII, and M. R. Langemeier. (2005): Environmental and economicanalysis of switchgrass production for water qualityimprovement in northeast Kansas. J. Environ. Mgmt. 79(4): 336-347.

Nicholson S. E.C. J. Tucker et Ba M. B. (1998): Desertication, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. Bulletin of the American Meteorological Society 79, pp. 815-829.

Nicholson S. E. (2000, 2001): The nature of rainfall variability over Africa on time-scales of decades to Millenia. Global and Planetary Change, 26, 137–158.

Nicholson S. E. (1986) : The spatial cohérence of african rainfall anomalies, interhemispheric téléconnexions. Journal ofClimate and appplied Meteo. 25, pp. 1365-1381.

Nicholson S. E. (1998): Interannual and interdecadal climate variability of rainfall over African continent during the last two centuries. In Water Resources Variability in Africaduring the XXthcentury (ed. by E. Servat, D. Hughes, J. M. Fritsch et M. Hulme), Abidjan, Côte d'Ivoire, 107-116.

Nicholson, Davenport et Malo (1990): The quasi-periodic behaviour of rainfall variability in Africa and relationship to the southern Oscillation. Arch. Met. Geop. And Bio. Ser. 34, pp 311-348.

Noumi N. V. Zapfack L. et Sonke B. (2011) : Ecological behaviour and biogeography of endemic species of the genus Piper L. in Africa: A case of the Guineo-Congolean region African Journal of Plant Science, 5(4) : 248-263..

OBEMINES (1989): Notice explicative de la G p□ol carte

Oettli P. (2008) : Précipitations et relief en Afrique orientale et australe: Modélisations statistiques et géostatistiques. Thèse de Doctorat a l'Université de Bourgogne, Centre de Recherches de Climatologie. France, 272 p +Annexes.

Ogouwalé E. (2006) : Changements climatiques dans le Bénin méridional et central. Indications, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire. Thèse de Doctorat nouveau régime, EDP/FLASH, 302 p.

Ogouwalé R. (2013) : Changements climatiques, dynamiques des états de surface et prospectives sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua. Thèse de Doctorat. Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace, 204p.

Olivry J. C. (1993) : De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. Journées *Hydrologiques, Centenaire Maurice* Pardé, Grenoble.

Olivry J-C. (1993) : Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale. In *l'eau, la terre et les hommes,* hommage à René Fécaux Ed. Presses Universitaires de Nancy, pp. 181-190.

Oloukoi J. (2006) : Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin. In contemporary publishing international, 6 (4), pp 305-323

Oloukoi J. (2011) : Utilité de la télédétection et des systèmes d'information géographique a / dans l'étude de la dynamique spatiale de l'occupation des terres au centre du bénin. Thèse présentée pour obtenir le Diplôme de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, 305 p.

Oloukoi J. (2013) : Scénario socio-économique et écologique des changements de l'occupation des terres au Bénin », Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 13 Numéro 1 | avril 2013, mis en ligne le 16 avril 2013, consulté le 02 février 2014. URL : http://vertigo.revues.org/13267 ; DOI : 10.4000/vertigo.13267

Oloukoi J. et Mama V.J. (2009) : Analyse de la dynamique agraire des agro écosystèmes de bas-fonds du Centre Bénin, Agronomie Africaine, 21 (2), pp: 117-128.

OMM. (1992) : Vocabulaire Météorologique International 2è édition Genève-Suisse n° 182 page 527.

ONU. (2005) : Objectifs du Millénaire pour le développement. New York, 48 p.

Orekan V. (2007) : Implementation of the local land-use and land-cover change model CLUE-s for Central Benin by using socio-economic and remote sensing data. PhD Thesis, University of Bonn, 204 p.

Orthmann B. (2005) : Vegetation ecology of a woodland-savanna mosaic in central Benin (West Africa): Ecosystem analysis with a focus on the impact of selective logging Dissertation, University of Rostock, 148 p

Ouédraogo M. (2001) : Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse, Université de Monpellier II, 257p.

Ouessar M, Bruggeman A, Abdelli F, Mohtar RH, Gabriels D, Cornelis WM. (2009) : Modelling water–harvestingsystems in the aridsouth of Tunisiausing SWAT. Hydrology and Earth System Science 13: 2003–2021.

Overmars K. Verburg P. Veldkamp T. (2007): Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model,

Land Use Policy, vol. 24, p. 584-599.

Ozenda P. (1982) : Les végétaux dans la biosphère. Doin, Paris. 431 pp.

PAMF. (2002) : Plan simple de gestion de la forêt classée de Wari-Maro. MAEP-DFRN-PAMF. Cotonou, Bénin. 63 pages + annexes.

Pare L. et Tallet B. (1999) : D'un espace ouvert à une space saturé : Dynamique foncière et démographique dans le département de Kouka (Burkina Faso). Espace, Populations, Sociétés, 37:83-92.

Paturel J. E. Servat E. Kouame B. Travaglio M. (1998) : Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'ouest et centrale. In Sud Sc. et Techno. N° 2, Ouagadougou.

Paturel J.E. Servat E. Kouame B. Lubes H. Masson J.M. Boyer J.F. Travaglio M. et Marieu M. (1996) : Procédures d'identification de " rupture " dans des séries chronologiques - modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 99 - 110.

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, p. 1-31.

Pelissier P. (1962) : Les pays du Bas-Ouémé : Région témoin du Dahomey Méridional, Cahier d'Outre-Mer ; Paris, Bordeaux, 171 p.

Pérard J. Boko M. Bokonon-Ganta E. B. (1991) : Contraintes climatiques et croyances en Afrique Tropicale : Essai d'ethno climatologie, actes du 3ème Colloque AIC, Lannion, 163–171.

Perard J. et Bokonon E. B. (1993) : Variabilité pluvieuse et mutations socio-économiques dans le Haut Borgou (Nord-Bénin). In Publication de l'Association Internationale de Climatologie. Lannion, 163-171.

Petit M. (1990): Géographie physique tropicale. Approche aux études du milieu. Morphogenèse - paysages. KARTALA, ACCT, Paris. 351 p.

Pettitt A.N.A. (1979): "Non parametric approach to the change point problem". Applied. Statistics, vol. 28, n° 2, p. 126-135.

Peugeot C., Le Lay M., Depraetere C., Le Barbe L., Seguis L., Galle S., Afouda S., Arjounin M., Boubkraoui S., Bouchez J-M., Jacquin F., Malinur F., Ouani T., Thevenot N. Et Zannou A., 2005. Hydrological functioning and meso-scale water budget assessment on the Upper Oueme Basin (Benin), HSM, LTHE, DGH/DRE/SH, 1ère Conférence Internationale AMMA, DAKAR Novembre-Décembre 2005.

Philippon N. (2002) : Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l'Ouest et de l'Est : méthodes, diagnostics (1968-1998) et applications (2000-2001). Thèse de Doctorat Université de Bourgogne, CRC–CNRS UMR5080, 241 p + Annexes.

Philippon N. Jarlan l. Martiny N. Camberlin P. Mougin E. (2007) : Characterization of the interannual and intraseasonal variability of West African vegetation between 1982 and 2002 by means of NOAA AVHRR NDVI data. J. Climate 20: 1202-1218.

Philippon N. Martiny N. Camberlin P. Mougin E. (2007) : Forecasting the vegetation photosynthetic activity over the Sahel: a Model Output Statistics approach. International Journal of Climatology. In press.

Poccard I Richard Y. (1996) : Sensibilité du NDVI aux variations pluviométriques en Afrique tropicale, AIC, Vol 9, pp. 41-48

Pofagi K. M. et A. Tonouewa (2001) : Renversement de la Tendance à la dégradation des terres et des eaux dans le bassin Béninois du Fleuve Niger. PNUD, septembre 2001.

Pontius Jr.R.G et Millones (2011): Death to Kappa : buth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessement International Journal of Remote sensing 32 (15), 4407-4429

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.

Pouchin T. Debrie A. Bourcier A. (2000) : L'observation de la végétation de l'Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale, l'apport de l'indice de la végétation normalisé. Science et changements planétaires/Sécheresse, vol 13, Numéro 3, pp. 187-194.

Puyravaud J. P. (2003) : Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. Forest Ecology and Management, 177, 1–3, pp. 593–596.

Renaud J. (2004) : Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) : Vers une modélisation des transferts de Phosphore, INRA, 75 p.

Riad S. (2003) : Typologie Et Analyse Hydrologique Des Eaux Superficielles A Partir De Quelques Bassins Versants Représentatifs Du Maroc .Thèse en cotutelle Université Des Sciences Et Technologies De Lille et Université Ibnou Zohr D'agadir, 158p.

Richard Y. Poccard L. (1998) : A statistical study of NDVI sensibility to seasonal and interannual raibfall variation in Southen Africa.INT, J. Remote, Sensing, Vol 15, pp. 2907-2920

Rindfuss R. R, Entwisle B. Walsh S. J. An L. Badenoch N. Brownn D. G. Deadman Evans T. P. Fox J. Geoghegan J. Gutmann M. Kelly M. Linderman M., Liu J., Malanson G. P., Mena C. F., Messina J. P., Moran Emilio F. Parker Dawn C. Parton W. Prasartkul P. Robinson Derek T. Sawangdee Y. Vanwey L. K. and Verburg P. H. (2008) : Land use change: complexity and comparisons. Journal of Land Use Science, 3:1, 1-10.

Roche M. (1963) :. Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars 430 pages.

Roger W. and Guy E. (2000) : Modelling land use change with linked cellular automata and socio-economic models : a tool for exploring the impact of climate change on the island of St Lucia, in Spatial Information for Land Use Management Eds M J Hill, R J Aspinall (Gordon and Breach, Amsterdam) pp 189-204.

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.

Rossi, J.P., P. Lavelle, and J. E. Tondoh. (1990): Statistical tool for soil biology X. Geostatistical analysis, European Journal of Soil Biology 31 (4), 173-181.

Rossiter D. G. (2004) : Technical note: Statistical methods for accuracy assessment of classifed thematic maps. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC): Enschede, The Netherlands, p. 46.

Rousse J. W. Haas R. H. Schell J. A. et Deering D. W. (1973) : Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, In ERTS symposium, NASA,SP-351,Washington DC,vol.1,309-317.

Savadogo M. (2003) : Réhabilitation de la capacité productive des terroirs sur la partie nord du Plateau Central entre 1980-2000 : Conservation de l'Eau et des Sols et changement au niveau des zones aménagées et non-aménagées. Rapport de travail n°12.

Schlaepfer R. (2002) : Analyse de la dynamique du paysage. Laboratoire de gestion des écosystèmes (GECOS), École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, 11 p.

Schlaepfer R. (2003) : Cours Ecologie du Paysage : une introduction, 53 p.

Schreckenberg K. (1996): Forests fields and markets: a study of indigenoustree products in the woody savannas of Bassi la region Benin. Phd Thesis University of London, 326 p.

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

Séguis L. Cappelaere B. Milési G. Peugeot C. Massuel S. et Favreau G. (2004) : Simu-lated impacts of climate change and land-clearing on run from a small Sahelian catchment. Hydrological Processes 18, pp. 34013413.

Séguis L. Cappelaere B. Peugeot C. Leduc C. et Milesi G. (2003) : Influence de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin versant sahélien.

In: Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides.

Servat E. Paturel J. E. Kouamé B. Travaglio, M. Ouédraogo M. Hoyer J.F. Lubès-Niel, H. Fritsch J.M., Masson, J.M., Marieu, B. (1998) : Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In. Water Resources Variability in Africa during the XX th century, IAHS Publications, n° 252, p. 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. 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, vol. 12, n° 2, p. 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. Toko I. (2007) : "Les phénomènes d'érosion et d'affaissement naturels des sols (Dongas) et leur impact sur la régénération végétale dans le Parc National du W''. In. Fournier A, Sinsin B. & Mensah A.G. Quelles aires protégées pour l'Afrique de l'Ouest? Actes du Séminaire International sur l'aménagement et la gestion des aires protégées d'Afrique de l'Ouest. Ed. IRD, ISBN 978 2 7099 1634 9; ISSN 0767 2896.

Sinsin B. (1993) : Phytosociologie, écologie, valeur pastorale, production et capacité de charge des pâturages naturels du périmètre Nikki-Kalalé au Nord du Bénin. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 390 p

Sintondji L. (2005) : Modelling the rainfall-runoff process in the Upper Ouémé catchment (Terou in Bénin Republic) in a context of global change: extrapolation from the local to the regional scale. Dissertation, University of Bonn: 205 p

Sintondji L. Vissin E. Dossou-Yovo E. et Agbossou E. (2012) : Impacts des changements climatiques et de la dynamique du couvert végétal sur les ressources en eau dans le bassin de l'Okpara a l'exutoire de kaboua a l'horizon 2025 Rev. Spe. Jour. Sci. FLASH, Vol 2. Num 3. Août, 2012 123-137

Soares-Filho B. S. Pennachin C. L. Cerqueira G. (2002): INAMICA –A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier‖, Ecological Modelling, 154, (3), p. 217-235.

Souley Yero Kadidiatou (2008) : L'évolution de l'occupation des sols à l'échelle des bassins versants de Wankama et Tondji Kiboro : quelles conséquences pour les débits et l'évapotranspiration réelle (ETR). Mémoire de DEA à la FLSH/Univ ABDOU MOUMOUNI de Niamey. 89P.

Sounon Bouko B. Sinsin B. et Goura Soulé B. (2007) : Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes au Bénin. Tropicultura, 25(4): 221-227

Sparfel L. (2012) : Evaluation des changements d'occupation des sols en zone côtière :

utilisation de la synergie SIG / télédétection.

Stellmes M. Udelhoven T. Röder A. Sonnenschein R. and Hill J. (2010) :"Dryland observation at local and regional scale -- Comparison of Landsat TM/ETM+ and NOAA AVHRR time series". Remote Sensing of Environment. Vol.114, n°10, pp. 2111-2125.

Sultan B. et 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), 1-10.

Sutcliffe V.J., Piper B.S. (1986) : Bilan hydrologique en Guinée et au Togo - Bénin. In hydrol. Continent. Vol I, n° 1, pp. 51 - 61.

Symeonakis E. et Drake N. (2004): Monitoring desertification and land degradation oversub- Saharan Africa. International Journal of Remote Sensing, 25:573-592.

Tapsoba D. (1997) : Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest africains et de leur récent changement. Thèse de doctorat, Université Paris XI (ORSAY), 300p.

Tenté B. (2000) : Dynamique actuelle de l'affectation des terres dans le massif de l'Atacora : Secteur Perma-Toucountouna, Mémoire de DEA, EDP, UNB, 83 p.

Tenté B.A. (2005): Recherche sur les facteurs de la diversité floristique des versants du massif de l'Atacora : secteur Perma- Toucountouna (Bénin). Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, 252 p.

Toko I. (2008) : Etude de la variabilité spatiale de la biomasse herbacée, de la phénologie et de la structure de la végétation le long des toposéquences du bassin supérieur du fleuve Ouémé au Bénin. Thèse de Doctorat Unique de Géographie. UAC/ FLASH/DGAT, 241p + Annexes

Tomson H.R. (1985): Hydroelectric resource studies in Togo and Benin. Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 1,78. 1403-1420.

Torrens P. et O'Sullivan D. (2001) : « Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? », Environment and Planning B 28 163-168.

Tossa A. (2005) : Changements climatiques et dynamique hydrologique au Bénin. Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC.78p.

Totin V. S. H. (2005) : Tendances hydroclimatiques et scénarios de gestion des ressources en eau sur les plateaux du sud-bénin. Mémoire de DEA, UAC/FLASH/EDP, 83 p.

Totin V. S. H. (2009) : Variabilité hydroclimatique et disponibilité en eau de surface dans le bassin béninois de la Volta. Rapport de recherche de IFS, Cotonou, Bénin, 85 p.

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, 283p.

Totin V. S. H. Boko M. Ogouwalé E. (2007) : Dynamique de la mousson ouest africaine, régime hydrologique et gestion de l'eau dans le Bassin Supérieur de l'Ouémé, In Climat et Développement pp 46-56.

Totté M. (1996) : Systèmes agraires, problématique de l'intensification agricole et télédétection. Exemples au Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Catholique de Louvain, Belgique 349p.

Townshend J. Justice C. Gurney C. McManus J. (1992) : The impact of mis registration on change detection. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30(5) 1054-1060.

Tucker C. J (2005. An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data. Int. J. Remote Sens. 26: 4485-4498.

Tucker J. C. and Sellers P. J. (1986) : Satellite remote sensing of primary production. Inter. J. Remote Sensing, 7, 1395-1416.

Tucker J. C. C.L. Vanpraet M. J. Sharman and G. Van Ittersum (1986) : Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. Remote Sensing of Environment, vol. 17, p. 233-249.

Turner II B.L., Skole D., Sanderson S., Günter F., Fresco L. and Leemans R. (1995) : Land-Use and Land-cover change: Science/Research Plan. IGBP report N° 35, HDP Report N° 7, 132p

Valentin C. et D'Herbes J. M. (1999) : Niger tiger bushasanatural harvesting system. Catena, 37 : 231-256.

Veldkamp A. et Fresco L. (1996) : CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use changes cenarios in Costa Rica. Ecological Modelling, 91 : 231-248.

Verburg P. H. De Koning G. H., Kok K. Veldkamp A. et Bouma J. (1999) : Aspatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change base du ponactual land use, Ecologicalmodelling, 116:45-61.

Verburg, P. H. (2000) : Exploring the spatial and temporal dynamics of land use with special reference to china. Thesis Wageningen University, The Netherlands, 143 p.

Verburg, P. H. and Overmars.K. P. (2009) : The CLUE model is a dynamic, spatially explicit, land use and land cover change model. Arialof Regional Science 42 (1) :57-77.

Verburg, P. H. Soepboer W. Veldkamp A. Limpiada R. Espaldon V. Sharifah Mastura S. A. (2002): Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the

CLUE-S Model‖, Environmental Management, Vol. 30, n° 3, p. 391-405.

Vissin E. W. (1998) : Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Sota. Mémoire de maîtrise, FLASH/ UNB, 80 p. + annexes.

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. (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. + annexe.

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 AIC, Cathage 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, Lomé. pp. 75-92.

Vodounnon A. J. (2008) : Contribution à l'étude de la caractérisation hydropluviométrique du bassin de l'Ouémé avec le modèle GR2M. Mémoire de Maîtrise de Géographie. UAC/FLASH/DGAT, 83 p.

Wesselink A. J. Orange D. Feizoure C. T. et Randriamiarisoa (1995) : Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin versant de type tropical humide : l'Oubangui (République Centrafricaine). In «L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement ». IAHS Publ, n° 238, pp. 179- 194.

White F. (1983): The vegetation of Africa. A descriptive memory to accompany the Unesco/Aetfat/Unso vegetation map of Africa. UNESCO Natural Ressources Research 20:356 p.

Willmott C. J. (1981): On the validation of models. Physical Geography 1, S. 184 – 194.

Wischmeier W. H. Johnson C. B. et B. V. Cross (1971): A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation 26, pp.189-193.

Xu J. (2001): The causes of land-use and land-cover change: movingbeyond the myths. Global Environmental Change, 11: 261-269.

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.

Yacouba H. Da D. E. C. Yonkeu S. Zombre P. et Soule M. (2002) : Caractérisation du ruissellement et de l'érosion hydrique dans le bassin supérieur du Nakanbé (Burkina Faso). In: 5ème Conférence Inter-Régionale sur l'environnement et l'Eau - Envirowater 2002. Ouagadougou. 318-325.

Yao T. B. (2005) : Climat, mutation socio-économique et paysage en Côte d'Ivoire. *Mémoire de synthèse des activités de recherches. Uni. des Sc. et Tech. de Lille, 226 p.*

Zannou A. B. (2006) : Détermination des termes du bilan hydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur (ORE - AMMA - CATCH). Approche annuelle et mensuelle avec calcul d'incertitudes associées. Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement, Université de Montpellier II/ AMMA/ IRD/ HSM/ DH. 82 p + annexes.

Liste des figures

Figure 1: Localisation du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou dans lazone agroclimatique du Bénin 15
Figure 2: Cadre conceptuel de la recherche 25
Figure 3: Stations climatologiques installées dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 40
Figure 4: Méthodologie de la cartographie d'occupation des terres sous ArcGIS.....56
Figure 5: Liste des états d'occupation des terres sur le territoire de la Martinique.....71
Figure 6: Relation entre états d'occupation des terres définis par les 8 règles de transition sous SpaCelle 73
Figure 8: Organigramme méthodologique de calcul du NDVI mensuel 78
Figure 9: Extraction de NDVI du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 79
Figure 10: Technique d'extraction de l'écoulement mensuel des types de formations végétales80
Figure 11: Fonctionnement schématique de SWAT 93
Figure 12: Situation du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.....102
Figure 13: Hydrogéologies du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.....104
Figure 14: Vue en 3D du Modèle Numérique de Terrain du bassin versant.....105
Figure 15: Grandes unités pédologiques du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou107
Figure 16: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 109
Figure 17: Profil structural de la végétation dans le secteur de Wèwè-Ouémé 112
Figure 18: Profil structural de la végétation du secteur de Bori-Alpouro.....114
Figure 19: Diagramme climatique de Franquin à la station de Parakou (1965-2010) 113
Figure 23: Occupation des terres en 1990.....128
Figure 24: Distribution des différentes unités d'occupation des terres en 1990 (en pourcentage de la surface totale) 129
Figure 27: Occupation des terres en 2010.....134
Figure 28: Distribution des différentes unités d'occupation des terres en 2010 (en pourcentage de la surface totale) 135
Figure 29: Etat de changement de l'occupation des terres entre 1990 et 2000.....138
Figure 30: Etat de changement de l'occupation des terres entre 2000 et 2010.....140
Figure 31: Etat de changement de l'occupation des terres entre 1990 et 2010.....142
Figure 32: Exemple détaillé de la situation simulée avec la situation réelle en 2013.....144
Figure 33: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "stabilité environnementale" à l'horizon 2020 144
Figure 34: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "stabilité environnementale" à l'horizon 2030 144
Figure 35: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "tendance vers la catastrophe" à l'horizon 2020.....146
Figure 36: Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "tendance vers la catastrophe" à l'horizon 2030.....146
Figure 37: Variation spatiale des champs de pluie annuelle moyenne (1965 à 2010) sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou 153
Figure 38: Schéma de circulation en surface en avril et septembre 155
Figure 39: Champs de pluie moyens mensuels (1965-2010) dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou 158
Figure 40: Rupture de stationnarité dans l'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....160
Figure 41: Variation des pluies moyennes mensuelles par sous périodes sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....162

Figure 43: Evolution mensuelle de l'écoulement sur les sous périodes 1965-1987 et 1988-2010 à Bétérou 164
Figure 44: Corrélation écoulement /pluie dans le bassinversant du complexe de 1965 à 2010 165
Figure 45: Bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....167
en % de 1965 à 2010 167
Figure 46: Variation interannuelle du coefficient de tarissement dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou.....170
Figure 47: Pluie et écoulement dans le bassin versant entre 1982 et 2010 172
Figure 50: Pluie et NDVI dans le bassin pour la sous période 1982-1987 175
Figure 51: Ecoulement et NDVI dans le bassin pour la sous période 1982-1987 175
Figure 52: Pluie et NDVI dans le bassin pour la sous période 1988-2010 175
Figure 53: Ecoulement et NDVI dans le bassin pour la sous période 1988-2010 175
Figure 54: Corrélation des stations sur les axes 1 et 2 178
Figure 55: NDVI annuel moyen (1982-2010) à l'échelle du bassin versant 181
Figure 56: Précipitation annuelle moyenne (1982-2010) à l'échelle du bassin versant 181
Figure 57: Corrélations entre cumul de pluie et NDVI (1982-2010).....183
Figure 58: Evolution mensuelle de NDVI et de l'écoulement dans le bassin versant (2001-2010).....187
Figure 59: Projection des variables sur un plan à deux dimensions.....189
Figure 60: Cycles mensuel entre écoulement et NDVI des formations végétales dans le bassin versant (1982-2010) 190
Figure 61: Comparaison de CR et Ks dans la première (a) et deuxième (b) couche de sol.....192
Figure 62: Sous-bassins versant définis par le modèle SWAT 194
Figure 63: Corrélation des débits observés et simulés au pas de temps mensuel àl'exutoire de Bétérou pour la période de calibration (droite de régression).....196
Figure 64: Evolution des débits observés et simulés au pas de temps mensuel à l'exutoire de Bétérou pour la période de validation (2005 – 2010).....198
Figure 65: Corrélation entre débits observés et débits simulés au pas de temps mensuel à l'exutoire de Bétérou pour la période de Validation 198
Figure 66: Proportion des espaces agricoles et ceux de savanes après la distribution des HRUs200
Figure 67: Evolution de l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....203
Figure 68: Evolution de la perte moyenne annuelle de terre par sous-bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 204

Liste des photos

Photo 1: Entretien individuel à Sonnoumon dans la Commune N'Dali 53
Photo 2: Focus groupe à Patargo dans la Commune de Djougou 53
Photo 3: Bloc de cuirasses à Wèwè 111
Photo 4:*Bombax costatum* sur roche affleurante (granite).....111
Photo 5: Champ d'igname à Patargo (Commune de Djougou).....121
Photo 6: Champ de coton à Bori (Commune de N'Dali).....121
Photo 7 : Terrain défriché en prélude à la culture d'igname à Ina (Commune de Bembèrèkè) 122
Photo 8 : Buttes géantes destinées à la cultures d'igname à Bakou (Commune de Djougou ...122
Photo 9: Champ de coton à Bétérou (Commune de Tchaourou) 123
Photo 10: Champ de Sorgho en épiaison dans un campement peulh à Bétérou (Commune de Tchaourou) 123
Photo 11: Troupeau de bœufs en pâturage à Wari-Maro (Commune de Tchaourou).....124
Photo 12: Etang piscicole comme moyen utilisé pour pêcher dans Kharoun à Commune de Copargo 125

Liste de planches

Planche 1: Images satellitaires exploitées 37
Planche 2 : Secteur d'étude extrait des images satellitaires en infrarouge fausses couleurs ramenés en image vraies couleurs par la combinaison 4, 3, 2 dans Erdas Imagine 58

Liste des tableaux

Tableau I: Caractéristiques des données satellitaires utilisées 38
Tableau II : Caractéristiques du capteur MODIS 41
Tableau III: Descriptif du produit MODIS (MOD13Q1 v5) 42
Tableau IV: Répartition de l'échantillon par localités sélectionnées 52
Tableau V: Détails des classes de l'occupation des terres du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 59
Tableau VI: Distribution du nombre total de pixels des zones d'entrainement par image et par sous-classe d'occupation 60
Tableau VIII: Caractéristiques de quelques outils de modélisation 66
Tableau X : Stations climatiques utilisées 96
Tableau XI: Matrice de transition des unités de l'occupation des terres de 1990 à 2000 136
Tableau XII: Matrice de transition des unités d'occupation des terres de 2000 à 2010 139
Tableau XIV: Matrice de confusion (en pourcentage) entre l'occupation des terres issue de la simulation et la situation réelle pour 2013 145
Tableau XV: Projection de la superficie (en ha et en %) des unités de l'occupation des terres aux horizons 2020 et 2030 selon le scénario "stabilité environnementale" 145
Tableau XVI: Projection de la superficie (en ha et en %) des unités de l'occupation des terres aux horizons 2020 et 2030 selon le scénario " tendance vers la catastrophe " 147
Tableau XVII: Corrélation entre les différents termes du bilan hydrologique à Bétérou 169
Tableau XVIII: Valeurs propres, pourcentages et pourcentages cumulés 177
Tableau XIX: Corrélation médiane pluie – NDVI en fonction du type d'occupation du sol et des cumuls de pluie 184
Tableau XX: Corrélation NDVI-écoulement en fonction des types de couvert végétal 188
Tableau XXI: Propriétés physiques des différents types de sols 191
Tableau XXII: Scénarii de discrétisation retenus 194
Les paramètres du modèle ont été calés manuellement. Le tableau XXIII indique les ordres de grandeur des différentes modifications qui ont été apportées. 195
Tableau XXIII: Paramètres ajustés lors du calage hydrologique de SWAT 195
Tableau XXIV: Coefficients d'évaluation du modèle 196
Tableau XXV: Composantes du bilan annuel (2000-2005) 197
Tableau XXVI: Coefficient d'appréciation du modèle (Validation) 199
Tableau XXVII: Composantes du bilan (2005 - 2010) 199
Tableau XXVIII: Proportions de variations, de certaines composantes du bilan hydrologique sous les influences des scénarii d'occupation des sols par rapport à la période de référence (2000-2005). 201

Liste des annexes

Annexe 1 : Publications

Articles publiés à l'extérieur du Bénin dans des revues à comité de lecture

2014 : Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oueme à l'exutoire de Bétérou (Bénin)

Arsène AKOGNONGBE, **Djafarou ABDOULAYE**, Expédit W. VISSIN et Michel BOKO

2013 : dynamique urbaine et aménagement de la ville de Dassa-Zoumè au Bénin (Afrique de l'Ouest) : facteurs et problèmes. J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), 2013, Série B, 15(3) : 93-100
GONZALLO Germain et **ABDOULAYE Djafarou**

2013 : Caractérisation interannuelle et saisonnière du régime pluviométrique de 1965 à 2010 dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Savè au Bénin (Afrique de l'Ouest)

ASSABA M., **ABDOULAYE D.,** VISSIN E. W., HOUSSOU C. S.

2012 : Variabilité hydro-pluviométrique et dynamique du couvert végétal dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou (Bénin, Afrique de l'ouest) 25ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble 2012, pp 39-43
Djafarou ABDOULAYE, Martin ASSABA, Expédit Wilfried VISSIN, François Cohovi TCHIBOZO et Michel BOKO

2010 : Occupation des terres et dynamique du couvert végétal. *Livre scientifique*. Sinsin B & Kampmann D (eds). 2010, Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome I : Bénin. Cotonou & Frankfurt/Main, pp. 154 – 166, ISBN 978-3-9813933-0-9, hardcover/ISBN 978-3 9813933-3-0.

Vincent OREKAN, Brice TENTE, Cossi J. HOUNDAGBA et **Djafarou ABDOULAYE**

Articles publiés sur le plan national dans des revues à comité de lecture

2013 : Influence de la dynamique de l'indice de végétationnormalisée (NDVI) sur les termes du bilan hydrologique dans le bassin versant du fleuve Ouémé a l'exutoire de savè au Benin (Afrique de l'Ouest). Revue Scientifique du Centre Béninois de la Recherche Scientifique et Technique. Les Cahiers du CBRST, n° 004, décembre 2013,

pp. 93-107, ISSN 1840-703X

Martin H. ASSABA, **Djafarou ABDOULAYE**, Expédit W. VISSIN ; Christophe S. HOUSSOU

2012 : Dynamique d'un paysage périurbain d'Abomey-Calavi au Bénin Mélanges MAC, Mélanges d'Hommage au Professeur Alfred Comlan MONDJANAGNI, DGAT, Bénin, pp. 73-85, ISBN 978-99919-867-2-2
ABDOULAYE Djafarou, TCHIBOZO François et Martin ASSABA

2012 : Impacts des activités agro-pastorales sur le couvert végétal dans les périphéries

Du Parc national W dans les arrondissements de Founougo et Soroko

D. ABDOULAYE, M. ASSABA, A. G. SAMBA, et B. A. TENTE

2012: Impacts environnementaux de l'utilisation des pneus comme engin de pêche dans

la commune de So-Ava Revue Scientifique du Centre Béninois de la Recherche

Scientifique et Technique. Les Cahiers du CBRST, n° 01, juillet 2012,

pp. 238-256, ISSN 1840-703X (en collaboration)

Martin H. ASSABA, **Djafarou ABDOULAYE**, Expédit W. VISSIN

Communications présentées à des réunions scientifiques (colloques, séminaires, etc.)

2013 Dynamique prospective des écosystèmes forestiers classés au Bénin: quelles perspectives pour une utilisation durable. Communication présentée à la conférence mondiale géospatiale de Global Spatial Data Infrastructure (GSDI 14) et AfricaGIS 2013 du 4 au 8 novembre 2013 sur le thème "Spatial Enablement in Support of Economic Development and Poverty Reduction", Addis Abeba, Ethiopie, 27 p., URL : http://www.gsdi.org/gsdiconf/gsdi14/papers/239.pdf
Orékan V., **Abdoulaye D**., Houndagba C. J**.** et Sinsin B.

2011 Evolution de la couverture végétale au Bénin au cours des cinquante dernières années. Actes du colloque national – Cotonou, 2-5 février 2011, 703-716 p.
Brice TENTE, **D. ABDOULAYE**, Marcel A. BAGLO, Cossi Jean Houndagba**,** Eustache E. BOKONON-GANTA

Annexe 2 : Règle de transition du modèle SpaCelle

Règle	Traduction en langage courant
Ag>Ag=PV (Ag ; 5 ; 0,7 ; 1)	L'agglomération reste sous forme d'agglomération si le voisinage (500 m) comporte une forte densité (70 %) d'agglomération
Chj>Ag=PV(Ag ; 3 ; 0,4 ;1)*EV(Rte ; 3)	Le champ et jachère (terre agricole) devient de l'agglomération lorsque le voisinage proche (300m) est composé à plus de 40 % d'agglomération et qu'il existe une voie d'accès (route) dans un rayon de 300m
Chj>Saa=PV(Saa ; 2 ; 0,5 ; 1)*ZV(Ag ; 2)	Le champ et jachère devient savane arborée et arbustive lorsque le voisinage proche (200m) est composé de 50 % savane arborée et arbustive et qu'il n'existe pas d'agglomération dans les 200m
Saa>Chj=PV(Chj ; 2 ; 0,3 ; 0,5)*ZV(Ag ; 1,5)	La savane arborée et arbustive devient le champ et jachère lorsque le voisinage proche (200m) est composé de 30 % au moins de champ et jachère et qu'il existe de l'agglomération à 150m
Saa>FcSb=ZV(FcSb ; 1 ; 0,5 ; 2)*EV(Chj+Ag ; 15 ; 0,25 ; 1)	La savane arborée et arbustive devient forêt claire et savane boisée lorsqu'il existe au proche (100m) 50 % au moins de forêt claire et savane boisée et que le voisinage (1,5km) est composé de champ et jachère ou d'agglomération
FcSb>Fdsd=ZV(Saa ; 30)*EV(Chj+Ag ; 15)	La forêt claire et savane boisée peut devenir une forêt dense semi-décidu s'il n'y a pas de savane arborée et arbustive et s'il y a des champs et jachère ou des agglomérations dense proche (à moins de 1,5km)
FcSb>Saa=PV(Chj ; 1 ; 5)*EV(Ag ; 2)	La forêt claire et savane boisée peut devenir savane arborée et arbustive si le voisinage de100m comporte des champs et jachère ou s'il y a d'agglomération à 200m.
Fdsd>FcSb=PV(Chj ; 2)*PV(Ag ; 2)	La forêt dense semi-décidue peut devenir forêt claire et savane boisée s'il existe dans le proche voisinage (2 km) un champ et jachère et une agglomération

Source :Adapté de Langlois, 2001

Annexe 3 : Matrice de corrélation des données de pluie

Variables	**Bassila**	**Bembéréké**	**Birni**	**Djougou**	**Ina**	**Kouandé**	**Okpara**	**Parakou**	**Patargo**	**Pénéssoulou**	**Tchaourou**	**Bétérou**
Bassila	**1**	0,390	0,453	0,701	0,434	0,325	0,390	0,447	0,543	0,778	0,535	-0,205
Bembéréké	0,390	**1**	0,484	0,494	0,589	0,588	0,635	0,590	0,621	0,383	0,624	-0,121
Birni	0,453	0,484	**1**	0,631	0,483	0,492	0,615	0,563	0,597	0,493	0,453	-0,042
Djougou	**0,701**	0,494	**0,631**	**1**	0,496	0,484	0,576	0,637	0,732	0,609	0,576	-0,001
Ina	0,434	0,589	0,483	0,496	**1**	0,586	0,660	0,653	0,610	0,495	0,510	-0,091
Kouandé	0,325	0,588	0,492	0,484	0,586	**1**	0,571	0,516	0,538	0,344	0,579	-0,024
Okpara	0,390	**0,635**	**0,615**	0,576	**0,660**	0,571	**1**	0,701	0,656	0,474	0,531	-0,110
Parakou	0,447	0,590	0,563	**0,637**	**0,653**	0,516	**0,701**	**1**	0,624	0,433	0,582	-0,001
Patargo	0,543	**0,621**	0,597	**0,732**	**0,610**	0,538	**0,656**	**0,624**	**1**	0,572	0,628	0,052
Pénéssoulou	**0,778**	0,383	0,493	**0,609**	0,495	0,344	0,474	0,433	0,572	**1**	0,489	-0,164
Tchaourou	0,535	**0,624**	0,453	0,576	0,510	0,579	0,531	0,582	**0,628**	0,489	**1**	-0,106
Bétérou	-0,205	-0,121	-0,042	-0,001	-0,091	-0,024	-0,110	-0,001	0,052	-0,164	-0,106	**1**

En gras les valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha = 0,05 (test bilatéral)

Annexe 4 : Questionnaires

24. Evoluons-nous vers des années de plus en plus sèches ou de plus en plus humides?
○ Année sèche ○ Année humide

25. Cela a-t-elle des conséquences sur la végétation?
○ Oui ○ Non

26. La présence de la végétation favorise t-elle l'écoulement?
○ Oui ○ Non

27. Pensez-vous qu'il y a plus d'eau maintenant que dans le passé ?
○ Oui ○ Non

28. L'homme est-il responsable de cette présence inhabituelle d'eau?
○ Oui ○ Non

29. Si oui comment?
☐ Deforestation ☐ Autres ☐ Agriculture

L'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur le bilan hydrologique du sous bassin

30. Quelles terres exploitez-vous pour la production agricole (basfond….)?
☐ Bas-fond ☐ Terre ferme ☐ Autres

31. Combien d'hectares de nouvelles terres défrichez-vous par an ou à quelle fréquence?

32. Quelle superficie mettez-vous en jachère par an et pourquoi ?

33. Assistez-vous à des phénomènes de dégradation et d'érosion dans vos champs ?
○ Oui ○ Non

34. Quelle période de l'année?
○ Saison Pluvieuse ○ Saison seche ○ Permanence

35. Depuis quand avez-vous constatez cette dégradation suivie de la perte des terres?

36. La régression de la végétation peut-elle avoir des répercutions sur les eaux?
○ Oui ○ Non

37. Justifiez votre point de vue
☐ Disparution de la végétation
☐ Végétation élément indispensable de la pluie
☐ Rareté de la pluie

38. Avez-vous constaté des modifications au niveau des saisons ?
○ Oui ○ Non

39. Si oui comment cela se manifeste-t-il ?
☐ Retard des pluies
☐ Réduction de la saison pluvieuse
☐ Prolongement de la saison sèche

40. Selon vous à quoi cela est-il dû?
☐ L'activité humaine ☐ Déforestation
☐ Non respect des dieux ☐ Autre

41. Quels sont les méfaits de ces changements sur les ressources naturelles (eau, végétation, terre) ?
☐ Insuffisance des pluies ☐ Disparution d'espèces
☐ Baisse de rendement ☐ Pas de méfait
☐ Appauvrissement

42. Quels sont les mois les plus humides de l'année ?
☐ Avril ☐ Mai ☐ Juin ☐ Juiellet
☐ Août ☐ Septembre

43. Quels sont les mois les plus secs de l'année ?
☐ Octobre ☐ Novembre ☐ Decembre ☐ Janvier
☐ Février ☐ Mars ☐ Avril ☐ Mai
☐ Juin ☐ Juiellet

44. Quelles sont les années de sécheresse exceptionnelle enregistrée ?

45. Quelles sont les années d'inondation exceptionnelle enregistrée ?

46. Quels sont les méfaits de ces changements sur la production?
☐ Destruction des champs
☐ Baisse de rendement
☐ Exode rurale
☐ Tarissement des cours d'eau

47. Que faites vous pour vous adapter à ces changements ?
☐ Plantation des arbres
☐ Mettre d'engrais à la disposition des paysans
☐ Reoganiser l'administration forestière
☐ Jachère
☐ Cérémonie rituelle
☐ Exode rurale

48. Selon vous que peut-on faire d'autre pour y remédier?
☐ Plantation des arbres
☐ Mettre d'engrais à la disposition des paysans
☐ Reoganiser l'administration forestière
☐ Jachère
☐ Arrêter les coupe abusif des arbres

49. Arrive-t-il des moments où vous êtes obligés de provoquer la pluie en cas de sècheresse prolongée ?
○ Oui ○ Non

50. Si oui comment ?

51. Quelles solutions envisagez-vous pour limiter les effets néfastes des actions humaines sur les ressources en eau ?

Groupe Cible : PECHEURS

1. Date ☐☐/☐☐/☐☐☐☐

2. Nom et prénoms

_____

_____

3. Arrondissement

○ Bétérou ○ Ouénou ○ Bariénou ○ Ina

4. localité

○ Bétérou ○ Zongo ○ Djangouro gare
○ Affon ○ Guessou sud

GROUPE N°1

5. X ☐☐☐☐☐☐☐☐☐

6. Y ☐☐☐☐☐☐☐☐☐

Objectif 1 : Déterminer les facteurs de la dynamique des états de surface dans le sous bassin du fleuve Ouémé à Bétérou

7. Depuis combien d'années habitez-vous cette localité ?

○ 10 ○ 15 ○ 20 ○ 25
○ 35 ○ 40 ○ 45 ○ 57
○ 65 ○ Naissace

8. Depuis combien d'années et où pratiquez-vous cette activité de pêche?

○ 17 ○ 18 ○ 20 ○ 35 ○ 40 ○ Naissance

9. Quel est le cours d'eau qui traverse cette localité ?

○ AFFON

10. Ce cours d'eau est-il permanent ?

○ Oui ○ Non

11. Pourquoi ?

○ Baisse des poches d'eau ○ Rareté des pluies.
○ Existance de l'eau

12. Quelles sont les techniques utilisées pour la pêche ?

☐ Filet pêcheur ☐ Hameçon ☐ Pirogues
☐ pêchons ☐ cage à poisson. ☐ cage à herbe

13. Quels sont les usages faits de cette eau ?

☐ Boisson ☐ ménage ☐ Autres précisez

14. La qualité de l'eau connaît-elle une dégradation?

○ Oui ○ Non

15. Si oui quelles sont les causes de cette dégradation ?

☐ Comblement du cours ☐ Proximité des champs
☐ Piétinement par les boeufs ☐ Autres à préciser
☐ Pesticide

16. La végétation aux alentours a-t-elle été toujours pareille ?

○ Oui ○ Non

17. Comment était le paysage autrefois ?

○ Plus dense ○ Existance de gros poissons
○ Autres à préciser ○ Bien

18. Pourquoi a-t-il changé selon vous ?

☐ Exploitation forestière ☐ Elévage
☐ Techniques nouvelles ☐ Agriculture
☐ Deforestation

19. La réduction progressive des formations végétales est-elle bien ?

○ Oui ○ Non

20. si non, précisez les raisons

☐ Rareté de certains essences végétales ou halieulitiques
☐ Tarissement des cours d'eau
☐ Sous information
☐ Manque de végétation
☐ Comblement des cours d'eau
☐ Manque de cages

21. Que faites-vous pour freiner cette disparition?

☐ Rien ☐ Barrage pour abrever les boeufs.
☐ Reboisement ☐ sensibilisation

Objectif 2 : Etudier l'impact de la dégradation du couvert végétal sur l'écoulement

22. Utilisez-vous des pesticides pour la pêche ?

○ Oui ○ Non

23. Si oui, les quels ?

○ Preservation futur
○ Faible production halieutique
○ nuisible pour les poisson et la consomation.
○ Non préservation

24. Si non, pourquoi?

○ Nuisible pour la pêche
○ Dangereux pour les poissons et la consomation
○ Gendarmerie
○ Preservation futur

25. Enregistrez-vous des dégats dus à l'utilisation des pesticides par les agriculteurs?

○ Oui ○ Non

26. Si Oui que faites-vous?

○ la gendarmerie ○ Autorités locales

27. Quelles sont les espèces halieutiques en disparition dans le cours d'eau?
- ○ Néant
- ○ Doumi,Maimassa,donwa
- ○ Doumi,Maimassa,donwa,gahri
- ○ Blogon

28. Quelle est la cause de leur disparition?
- ☐ Surpêche ☐ Produits toxiques ☐ Néant
- ☐ Elevage ☐ Comblement

IV.L'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur le bilan hydrologique du sous bassin

29. Quels sont les mois les plus humides de l'année?
- ☐ Août, ☐ septembre ☐ Juillet ☐ Octobre

30. Quels sont les mois les plus secs de l'année?
- ☐ Février ☐ Mars ☐ Janvier ☐ Octobre
- ☐ Novembre ☐ Avril ☐ Mai

31. Quelles sont les années de secheresse exceptionnelle enregistrée?
- ☐ 2013 ☐ 2013 et 2012 ☐ 1984 ☐ 2010 ☐ 1989

32. Quelles sont les années d'inondation exceptionnelle enregistrée?
- ○ 2010,2011 ○ 2010 ○ 2011 et 2012 ○ 2012

33. Que faites vous pour vous adapter à ces changements?
- ○ Immigration
- ○ Pratique des activités saisonière
- ○ Néant
- ○ Faire avec le volume existant
- ○ Reboisement

34. Quelles solutions envisagez-vous pour limiter les effets néfastes des actions humaines sur les ressources en eau?
- ☐ Création de muni barrages
- ☐ Interdition de pratiques néfastes
- ☐ Néant
- ☐ Etat
- ☐ sensibilisation
- ☐ Reboisement
- ☐ Reforme de l'exploitation forestière
- ☐ Pisciculture

Groupe Cible : ELEVEURS

Octobre 2013 - Thèse doctorale

IDENTIFICATION

1. Date:

2. Nom et prénoms

3. Arrondissement

4. localité (Village)

5. Coordonnées géographiques : X ☐☐☐☐☐☐☐☐☐

6. Coordonnées géographiques :Y ☐☐☐☐☐☐☐☐☐

Objectif 1 : Déterminer les facteurs de la dynamique des états de surface dans le sous bassin du fleuve Ouémé à Bétérou

7. Etes-vous de ce village ?
- ○ Oui ○ Non

8. Si non d'où venez-vous ?

9. Depuis combien d'années habitez-vous cette localité ?

14. Quels sont les types de fourrage préférés des animaux pendant la saisons sèche?

15. Quels sont les types de fourrage préférés des animaux Pendant la saisons pluvieuse?

16. Où parquez-vous vos animaux ?

17. Pourquoi ?

18. Faites-vous de la transhumance ?
- ○ Oui ○ Non

19. Si oui à quelle période de l'année ?

20. Quelles sont les raisons de vos déplacements ?
- ☐ Recherche de pâturage ☐ Recherche de points d'eau
- ☐ Recherche de sécurité ☐ Autres Précisez

21. Comment appréciez-vous l'état actuel de la végétation dans votre localité ?
- ○ Bon ○ Mauvais

22. si mauvais, précisez les raisons

10. Depuis combien d'années pratiquez-vous cette activité d'éleveur?

11. Quelle est la taille (nombre de tête d'animaux) de votre cheptel ?

12. Le pâturage naturel seul vous suffit-il pour l'alimentation de vos bêtes?

○ oui ○ Non

13. Si non que utilisez-vous d'autres ?

23. Que faites-vous pour freiner cette disparition ?

24. Quel est le cours d'eau qui traverse cette localité?

25. Ce cours d'eau est-il permanent ?

○ Oui ○ Non

26. Pourquoi

Objectif 2 : Etudier l'impact de la dégradation du couvert végétal sur l'écoulement

27. Avez-vous constaté des modifications au niveau des saisons ?

○ Oui ○ Non

28. Si oui comment cela se manifeste-t-il ?

☐ Retard des pluies
☐ Réduction de la saison pluvieuse
☐ Prolongement de la saison sèche

29. Selon vous à quoi cela est-il dû ?

30. Quels sont les méfaits de ces changements sur vos troupeaux ?

31. Quelles sont les modes d'alimentation du bétail en temps d'inondation?

32. Quelles sont les modes d'alimentation du bétail en temps de sécheresse?

33. Comment gérez-vous l'effectif du cheptel en temps d'inondation ?

34. Comment gérez-vous l'effectif du cheptel en temps de secheresse?

L'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur le bilan hydrologique du sous bassin

35. Quels sont les mois les plus humides de l'année ?

36. Quels sont les mois les plus sèc l'année ?

37. Quelles sont les années de sécheresse exceptionnelle enregistrée ?

38. Quelles sont les années d'inondation exceptionnelle enregistrée ?

39. La régression de la végétation peut-elle avoir des répercutions sur les eaux ?

○ Oui ○ Non

40. Justifiez votre point de vue

41. Quelles solutions envisagez-vous pour limiter les effets néfastes des actions humaines sur les ressources en eau ?

Guide d'entretien

Octobre 2013 - Thèse doctorale

Influence de la dynamique de l'occupation du sol sur l'écoulement dans le bassin de l'ouèmé à l'exutoire de bétérou

Identification

1. Nom et Prénom

2. Fonction

- ○ Agriculteur
- ○ Cultivateur
- ○ Eleveur
- ○ Conseiller Local
- ○ Conseiller Communal
- ○ Délégué

3. Ancienneté dans la localité

4. Localité

- ○ Gourelili
- ○ Tchoutchou
- ○ Bori
- ○ Issokayele
- ○ Ouè-Ouè 1
- ○ Woberou
- ○ Teourou Monon
- ○ Bobo
- ○ Guessou Sud
- ○ Bariénou
- ○ dédenegou
- ○ Gaouga
- ○ Ouenou

5. Ethnie

○ Peulh ○ Bariba ○ Lokpa ○ Yome

6. Depuis combien d'années habitez-vous cette localité ?

7. Quel est le cours d'eau qui traverse cette localité ?

- ☐ Kobi
- ☐ Kassakprere
- ☐ Yemaro
- ☐ Ouè-ouè
- ☐ Somourè
- ☐ Nanan
- ☐ Affon
- ☐ Ayayé
- ☐ Moffo
- ☐ Babaré
- ☐ Bolou
- ☐ Afiho
- ☐ Donga
- ☐ Patargo
- ☐ Kotokou
- ☐ Koussounou
- ☐ Tawè

8. Ce cours d'eau est-il permanent ?

○ Oui ○ Non

9. Pourquoi

10. Selon vous quelles sont les activités ou facteurs qui contribuent à détruire la végétation (donner un score à chaque activité)

- ☐ Agriculture
- ☐ Exploitation forestière
- ☐ Carbonisation
- ☐ Elevage
- ☐ Laxismes
- ☐ Chasse

11. Score (5=Impact moyen, 8=Impacte élevé) Agriculture

○ 5=Impact moyen ○ 8=Impacte élevé

12. Score (5=Impact moyen, 8=Impacte élevé) Exploitation forestière

○ 5=Impact moyen ○ 8=Impacte élevé)

13. Score (5=Impact moyen, 8=Impacte élevé) Carbonisation

○ 5=Impact moyen ○ 8=Impacte élevé

14. Score (5=Impact moyen, 8=Impacte élevé) Elevage

○ 5=Impact moyen ○ 8=Impacte élevé

15. Score (5=Impact moyen, 8=Impacte élevé) Chasse

○ 5=Impact moyen ○ 8=Impacte élevé

16. Score (5=Impact moyen, 8=Impacte élevé) Laxismes

○ 5=Impact moyen ○ 8=Impacte élevé

17. Quels sont les impacts des activités humaines (pêches, agricultures….) sur les cours d'eau ?

- ☐ Comblement du lit
- ☐ dégradation de la qualité de l'eau
- ☐ disparition de certaines espèces halieutiques
- ☐ Autres Précisez

18. Y-a-t-il selon vous des espèces végétales qui disparaissent dans votre localité ?

19. Quelle est la cause de leur disparition ou rareté ?

20. Quels sont les mois les plus humides de l'année ?

- ☐ Mai
- ☐ Juin
- ☐ Juiellet
- ☐ Août
- ☐ Septembre
- ☐ Avril

21. Quels sont les mois les plus secs de l'année ?

- ☐ Octobre
- ☐ Novembre
- ☐ Décembre
- ☐ Janvier
- ☐ Février
- ☐ Mars
- ☐ Avril
- ☐ Mai
- ☐ Juin
- ☐ Juillet

22. Quelles sont les années de sécheresse exceptionnelle enregistrée ?

23. Quelles sont les années d'inondation exceptionnelle enregistrée ?

24. Avez-vous constaté des modifications au niveau des saisons ?

○ Oui ○ Non

25. Si oui comment cela se manifeste-t-il ?

- ☐ Retard des pluies
- ☐ Réduction de la saison pluvieuse
- ☐ Prolongement de la saison sèche

26. Selon vous à quoi cela est-il dû et que peut-on faire ?

27. Que peut-on faire pour y remédier ?

28. Arrive-t-il des moments où vous êtes obligé de provoquer la pluie en cas de sècheresse prolongée?

Tables des matières

Sommaire **3**
Dédicace **5**
Sigles et abréviations **6**
Remerciements **8**
Résumé **10**
Abstract **11**
Introduction **12**
CHAPITRE I : CADRE THEORIQUE ET CONCEPTUEL 14
1.1. Milieu d'étude 14
1.2. Problématique 16
1.3. Objectifs de l'étude 19
1.4. Hypothèses de travail 20
1.5. Clarification des concepts 20
1.6. Revue de littérature 26
1.6.1. Dynamique de l'occupation des terres 26
1.6.2. Approches d'analyse de la dynamique de l'occupation desterres 29
1.6.3. Méthodes de simulation des écoulements 32
1.6.4. Effets de l'occupation des terres sur l'écoulement 33
CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE RECHERCHE 36
2.1. Recherche documentaire 36
2.2. Acquisition des données 36
2.2.1. Données planimétriques 36
2.2.2. Données pluviométriques et hydrologiques 38
2.2.3. Données de végétation fournie par MODIS-NDVI 40
2.2.4. Données socioéconomiques 42
2.2.5. Critique et reconstitution des données pluviométriques et hydrologiques manquantes 43
2.3. Travaux de terrain 50
2.3.1. Echantillonnage 50
2.3.2. Outils et techniques de collecte des données 52
2.4. Méthodes de traitement des données 54
2.4.1. Outils de traitement des données 54
2.4.2. Traitement des images satellitaires 55
2.4.3. Prétraitements 56
2.4.3.1. Importation et combinaison des bandes 56
2.4.3.2. Amélioration visuelle des images 57
2.4.3.3. Corrections géométriques 57

2.4.3.5. Extraction de la zone d'étude : création du masque 58
2.4.4. Classification d'images 58
2.4.5. Détection de changements 62
2.4.6. Matrice de transition 63
2.4.7. Méthode d'étude de la dynamique prospective des unités d'occupation des terres 63
2.4.7.1. Choix d'un modèle de simulation de l'occupation des terres 64
2.4.7.2. Justification du choix du modèle SpaCelle, avantages et limites 66
2.4.7.3. Généralités sur le modèle SpaCelle 67
2.4.7.4. Modèle de base et sa validation 74
2.4.7.5. Scénarios de la dynamique d'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 76
2.4.8. Méthode de traitement de données NDVI MODIS 77
2.4.9. Détermination de l'écoulement des types d'occupation des terres 80
2.4.10. Traitement des données hydropluviométriques 81
2.4.11. Traitement des données socio-économiques 91
2.4.11.1. Taux de réponse par cause de dégradation du couvert végétal 91
2.4.11.2. Relation entre les causes de dégradation et les différents groupes socioprofessionnels 91
2.4.12. Description de SWAT et justification de son choix 91
2.4.12.1. Principes 92
2.4.12.2. Simulation et calibration du modèle 96
CHAPITRE III : FONDEMENTS BIOPHYSIQUES DE LA DYNAMIQUE 101
DE L'OCCUPATION DES TERRES 101
3.1. Caractéristiques biogéographiques 101
3.1.1. Caractéristiquesgéographiques 101
3.1.2. Aspects hydrogéologiques du bassinversant 103
3.1.3. Aspects topographiques du bassinversant 105
3.1.4. Composantes pédologiques du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire deBétérou 106
3.1.5. Aspects hydrographiques du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire deBétérou 108
3.1.6. Types de végétationet structure morphologiquedans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou 110
3.1.6.1. Types de végétation 110
3.1.6.2. Structure morphologique dans le bassinversant 111
3.1.7. Traits climatiquesdu bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire deBétérou 113
3.1.7.1. Bilan climatique 113

3.1.7.2. Bilan hydrique 115
3.1.7.3. Températures, insolation et vent.....116
3.1.7.4. Insolation 116
3.1.7.5. Vent 117
3.2. Caractéristiques socioéconomiques.....117
3.2.1. Traits humains et économiques.....117
3.2.2. Caractéristiques économiques.....120
3.2.2.1. Agriculture.....120
3.2.2.3. Elevage bovin 123
CHAPITRE IV : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU.....127
4.1. Analyse de la dynamique de l'occupation des terres en 1990, 2000 et 2010.....127
4.1.1. Etat de l'occupation des terres en 1990.....127
4.1.2. Etat de l'occupation des terres en 2000.....130
4.1.3. Etat de l'occupation des terres en 2010.....133
4.1.3. Dynamique de l'occupation des terres entre 1990 et 2000 136
4.1.4. Dynamique de l'occupation des terres entre 2000 et 2010 138
4.1.5. Dynamique des unités de l'occupation des terres entre 1990 et 2010 140
4.2. Projections de l'occupation des terres dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 143
4.2.1. Comparaison des dynamiques réelle et simulée de l'occupation des terres entre 2000 et 2013.....143
4.2.2. Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario "stabilité environnementale" 145
4.2.2. Dynamique de l'occupation des terres pour le scénario « tendance vers la catastrophe » 145
4.3. Discussion 148
4.3.1. Fonctionnement du modèle 148
4.3.2. Production des cartes prédictives 148
CHAPITRE V : VARIABILITE PLUVIOMETRIQUEET HYDROLOGIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU 152
5.1. Etude de la variabilité pluviométrique dans le bassin versant 152
5.1.1. Champ moyen annuel de précipitations à Bétérou.....152
5.1.2. Répartition spatio-temporelle des précipitations moyennes mensuelles à Bétérou156
5.1.3. Ruptures de stationnarité : variation et tendances pluviométriques.....159
5.2. Evolution interannuelle de l'écoulement de surface dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou 162

5.2.4. Relations précipitations/débits dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou 165
5.3. Variation des termes du bilan hydrologique et corrélations entre ces différents termes à Bétérou 166
5.4. Variation du coefficient de tarissement à Bétérou 170
5.5. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI par sous période dans le bassin versant 172
5.5.1. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI sur la période 1982-2010 172
5.5.2. Evolution comparée de la pluie et de NDVI sur la période 1982-2010 173
5.5. 3. Evolution comparée de l'écoulement et de NDVI sur la période 1982-2010 174
5.5.1.1. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI sur la sous période 1982-1987 174
5.5.1.2. Evolution comparée de la pluie et de l'écoulement avec les NDVI sur la sous période 1988-2010 175
5.5.1.3. Discussion.....176
5.5.3. Détermination des régions homogènes dans le bassin versant.....177
CHAPITRE VI : INCIDENCES DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES SUR L'ECOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME A L'EXUTOIRE DE BETEROU 180
6.1. Evolutions spatiales du NDVI et cumuls annuels moyens de pluie.....180
6.2. Relations entre Pluie-NDVI et écoulement-NDVI.....182
6.2.1. Relation interannuelle entre cumul de pluie et NDVI.....182
6.3. Effets de la dynamique de l'occupation des terres sur la disponibilité des ressources en eau à long terme dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou 191
6.3.1. Caractéristiques physiques du sol du bassin de l'Ouémé à Bétérou 191
6.3.2. Discrétisation des sous bassins versants et des HRUs 193
6.3.3. Résultats des paramètres de calage du modèle.....195
6.3.4. Calage de la réponse hydrologique du bassin versant.....195
6.3.4.1. Comparaison entre débits simulés et débits observés.....195
6.3.4.2. Moyenne annuelle du bilan hydrologique durant la période de calage 196
6.3.5. Validation du modèle 197
6.3.5.1. Comparaison entre débits simulés et débits observés.....197
6.3.5.2. Moyenne annuelle du bilan hydrologique durant la validation 199
6.3.6. Impacts des scenarii d'occupation des terres sur les termes du bilan hydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....199
6.3.4.4. Production de sédiments dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou à l'horizon 2022.....203
Conclusion générale 207
Bibliographie.....210

Liste des photos.....**238**
Liste de planches.....**239**
Liste des tableaux.....**239**
Liste des annexes.....**240**
Annexe 1 : Publications.....240
Annexe 2 : Règle de transition du modèle SpaCelle.....242
Annexe 3 : Matrice de corrélation des données de pluie.....243
Annexe 4 : Questionnaires.....244
Tables des matières.....**249**