Université d'Abomey-Calavi (UAC)

Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines

-

Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espace, Cultures et Développement »

****

Thèse de Doctorat Unique

Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Option : Gestion de l'Environnement

Spécialité : Cartographie et Modélisation environnementale

TRAJECTOIRES DES CHANGEMENTS DANS L'OCCUPATION DU SOL : DETERMINANTS ET SIMULATION. CAS DU BASSIN VERSANT DE L'ALIBORI (BENIN, AFRIQUE DE L'OUEST)

Par :

Gildas Junior BOKO

Soutenue publiquement, le ..... devant le Jury composé de :

Président : Pr. Brice Auguste SINSIN, *Université d'Abomey-Calavi, Bénin*
Directeur de Thèse : Pr Michel BOKO, *Université d'Abomey-Calavi, Bénin*
Rapporteur : Pr. Adjima THIOMBIANO, *Université de Ouagadougou*
Rapporteur : Pr. Jean-Marie DIPAMA, *Université de Ouagadougou*
: Pr. Tanga Pierre ZOUNGRANA, Université de Ouagadougou
Examinateur : Pr. Euloge K. AGBOSSOU, *Université d'Abomey-Calavi*
Examinateur : Pr. Brice A. TENTE, *Université d'Abomey-Calavi*
Examinateur : Pr. Madjidou OUMOROU, *Université d'Abomey-Calavi*

Année Académique : 2012 - 2013

All models are wrong, but some models are useful.

– G. Box, (1979)

Sommaire

SOMMAIRE **3**

SIGLES ET ACRONYMES **5**

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS **7**

RESUME **11**

ABSTRACT **13**

CHAPITRE 1 : CADRE THEORIQUE DE L'ETUDE **15**

1. JUSTIFICATION DE L'ETUDE 15
2. HYPOTHESES DE TRAVAIL 21
3. OBJECTIFS DE L'ETUDE 22
4. DEFINITION DE CONCEPTS CLES 22
5. POINT DES CONNAISSANCES 29

CHAPITRE 2 : LE CADRE D'ETUDE : DESCRIPTION PHYSIQUE ET HUMAINE DU BASSIN-VERSANT DE L'ALIBORI **39**

1. LOCALISATION ET SITUATION ADMINISTRATIVE 39
2. LE CADRE PHYSIQUE 39
2. PRESENTATION DU CADRE HUMAIN 69

CONCLUSION PARTIELLE 84

CHAPITRE 3 : DONNEES MATERIEL ET METHODES **86**

1. PRESENTATION DES VARIABLES D'ETUDE 86
2. MATERIELS 89
3. METHODE DE COLLECTE DES DONNEES 95
4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES CLIMATIQUES 100
5. TRAITEMENT DES DONNEES CARTOGRAPHIQUES 103
6. PRESENTATION DU MODELE CLUE 118

CONCLUSION PARTIELLE 138

CHAPITRE 4 : OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI : DYNAMIQUE ET FACTEURS DETERMINANTS **140**

1. ETAT DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI 140
2. DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN-VERSANT DE L'ALIBORI 144
3. DETERMINANTS DE L'OCCUPATION DU SOL ET DE SA DYNAMIQUE 146
4. DISCUSSION 164

CONCLUSION PARTIELLE 168

CHAPITRE 5 : VARIABILITE CLIMATIQUE, FACTEUR DE DYNAMIQUE DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI **169**

1. EVOLUTION ET TENDANCES THERMOMETRIQUES 169
2. TENDANCES PLUVIOMETRIQUES DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI 179
3. EVOLUTION DU BILAN CLIMATIQUE 188
4. DISCUSSION DES RÉSULTATS 190

CONCLUSION PARTIELLE 192

CHAPITRE 6 : TRAJECTOIRES POTENTIELLES DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN-VERSANT DE L'ALIBORI **194**

1.- PARAMETRES UTILISES 194
2.- RESULTATS DE LA REGRESSION LOGISTIQUE 196
3.- VALIDATION DU MODELE 199
4.- SCENARIO DE SIMULATION 202
5.- RESULTATS DE LA SIMULATION 204
6.- LIMITES ET DISCUSSION DES RESULTATS 208

CONCLUSION PARTIELLE 213

CONCLUSION GENERALE **214**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **219**
LISTE DES FIGURES **235**
LISTE DES PHOTOS **236**
LISTE DES TABLEAUX **237**
ANNEXES **238**
TABLE DES MATIERES **259**

Sigles et Acronymes

ACP : Analyse en Composante Principale
AIC : Association Interprofessionnelle du Coton
ASCII : American Standard Code for Information Interchange
ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
ASTER : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection
CECPA : Centre Communal pour la Promotion Agricole
CERPA : Centre Régional pour la Promotion Agricole
CFDT : Compagnie Française pour le Développement des Fibres Textiles
CLUE : Conversion of Land-Use and its Effects
CLUE-S : Conversion of Land-Use and its Effects at Small scale
CNUED : Conférence des Nations-Unies sur l'Environnement et le Développement
CPV : Conseiller à la production végétale
ECOPAS : Ecosystèmes Protégés d'Afrique Soudano-Sahélienne
EDP : Ecole Doctorale Pluridisciplinaire
ENSO : El Niño Southern Oscillation
ESPRIT : Environmental Sustainability : Priority Education and Research in the Tropics
ETP : Evapotranspiration Potentielle
FAO : Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FIT : Front Intertropical
FLASH : Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines
GPS : Global Positioning System
GRASS : Geographic Resources Analysis Support System
IGN : Institut Géographique National
IGPB : International Geosphere-Biosphere Programme
INRAB : Institut National de Recherches Agricoles du Bénin
INSAE : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
JEA : Jet d'Est Africain
JTE : Jet Tropical d'Est
LACEEDE : Laboratoire Pierre Pagney : Climats, Eau, Ecosystèmes et Développement
LULCC : Land-Use and Land-Cover Change

MAEP : Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
METI : Ministry of Economy, Trade and Industry
MNE : Modèle Numérique d'Elévation
MNT : Modèle Numérique de Terrain
NASA : National Aeronautics and Space Administration
NDVI : Normalised Difference Vegetation Index
NERICA : New Rice for Africa
PADPPA : Programme d'Appui au Développement Participatif de la Pêche Artisanale
PASW : Predictive Analytics Software
PUASA : Programme d'Urgence d'Appui à la Sécurité Alimentaire
RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation
ROC : Relative Operating Characteristics
SATEC : Société d'Assistance Technique et de Coopération
SIG : Système d'Information Géographique
SODICOT : Société Des Industries du Coton
SONAPRA : Société Nationale pour la Promotion Agricole
SPSS : Statistical Package for the Social Sciences
TAI : Taux d'Accroissement Intercensitaire
UAC : Université d'Abomey-Calavi
USGS : United States Geological Survey
ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

Avant-propos et remerciements

Occupation du sol, dynamique de l'occupation du sol, LULCC (Land-Use and Land-Cover Change : voilà des expressions que je n'aurai jamais crues feraient un jour partie de mon attirail scientifique au point de devenir un domaine de spécialisation. Je me souviens encore, il y a une quinzaine d'années, farfouillant dans les documents traitant de l'environnement : articles, mémoires, actes de colloques et ces cinq lettres qui revenaient sans cesse. Et même en quatrième année de géographie, les camarades qui s'intéressaient à cette thématique parlaient un langage qui pour moi sortait de l'ordinaire. Et pourtant ! Ma passion pour l'informatique allait m'y amener par les chemins les plus imprévisibles. Là encore, tout est parti d'un autre acronyme. Trois lettres : SIG (Système d'Information Géographique). Un monde découvert et maîtrisé d'abord en autodidacte, puis à travers des stages. Les SIG me feront découvrir la modélisation environnementale, mais aussi la télédétection et ses techniques ainsi que le monde du traitement de l'image. Ce qui m'amènera naturellement aux cartes d'occupation du sol qui constituent le résultat final d'un traitement d'image.

Au-delà de l'espoir de contribuer à l'évolution de la science, cette thèse portant sur les ***trajectoires des changements dans l'occupation du sol : déterminants et simulation dans le bassin de l'Alibori*** se veut être l'aboutissement de l'union de deux centres d'intérêts : l'informatique et la géographie. Deux domaines épistémologiquement divergents, mais qui ont fusionné depuis plus de vingt-cinq ans pour donner naissance à la géomatique.

Ce travail réalisé dans le cadre du projet ESPRIT EDULINK. Il s'agit d'un projet visant une gestion durable de l'environnement dans les écosystèmes arides des milieux soudano-sahéliens, avec un accent particulier sur la recherche et l'éducation. Il est financé par l'Union Européenne. Ce projet est coordonné par l'Université de Groningen (Pays-Bas) et a pour principaux partenaires :

- l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin) à travers le Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement durable (CIFRED) ;
- l'Université de Ouagadougou (Burkina-Faso) à travers le Centre d'Etude pour la Promotion et l'Aménagement et la Protection de l'Environnement (CEPAPE) ;

- l'Université de Dschang (Cameroun) grâce à la collaboration du Centre for Environment and Development Studies in Cameroon (CEDC) ;
- et l'Université de Leiden (Pays-Bas) via l' Insitute of Environmental Sciences (CML).

Le projet vise entre autres à renforcer une intégration académique entre les trois universités africaines qui en font partie, tout en renforçant les capacités de leurs membres. D'un point de vue plus pratique, le projet vise à identifier les pratiques non-durables en matière d'utilisation des terres afin de faire des recommandations aux différents acteurs. Les résultats seront publiés sous la forme de thèses et d'articles. La présente thèse est donc un des outputs du projet ESPRIT EDULINK.

Ce travail n'aurait sûrement pas pu être menée à bien sans le support direct ou indirect de plusieurs personnes. Qu'il me soit permis de remercier ici :

- le professeur Michel BOKO en tant que coordinateur national du projet ESPRIT EDULINK, mais aussi en tant que directeur de thèse ; le présent travail n'aurait pu aboutir sans ses nombreuses recommandations et sa patience ;
- les autres membres du personnel du projet ESPRIT EDULINK au Bénin ; il s'agit des Docteurs Expédit VISSIN, Ernest AMOUSSOU et Sidonie HEDIBLE pour leur insigne contribution à ce travail à travers un suivi quasi-mensuel et un encadrement scientifique rigoureux ; et Mme Eugénie KEKE, secrétaire du projet pour sa disponibilité permanente ;
- les autres étudiants au sein du projet : Justine VODOUNOU, Maurice AHOUANSOU, Askandarirou GOUNOU, Théodore ADJAKPA et en particulier à Edouard IDIETI, pour tout ce que nous avons partagé durant toute cette période.

D'autres personnes ont contribué aussi à leur manière à ce que cette thèse aboutisse. La liste serait trop longue si je devais les citer toutes ici. Je voudrais cependant avoir une pensée spéciale pour :

- tous les membres du Laboratoire Pierre Pagney de l'Université d'Abomey-Calavi, les professeurs Christophe HOUSSOU, Constant HOUNDENOU, Fulgence AFOUDA, Placide CLEDJO, Euloge OGOUWALE, Ibouraïma

YABI, les Docteurs Gervais ETENE, Léocadie ODOULAMI, Henri TOTIN ainsi que tous les doctorants au sein dudit laboratoire ;

- à Maman-Sani ISSA, expert en évaluation environnementale et chercheur à l'Université d'Abomey-Calavi ;
- aux professeurs Jean C. HOUNDAGBA et Brice TENTE, pour avoir guidé mes premiers pas dans la recherche et dans le domaine des SIG ;
- mes devanciers dans l'utilisation du modèle CLUE, le Docteur Vincent O. A. OREKAN, du Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale de l'Université d'Abomey-Calavi, et le Docteur Eric FOTSING de l'Université de Dschang (Cameroun) pour avoir mis leur expérience et leur expertise à ma disposition ;
- Patrice BOKO, pour son aide et sa disponibilité permanente et Brigitte BOKO pour son soutien de tous les moments ;
- Joselyne GODONOU BIO, pour les journées passées à débattre des différents aspects de cette thèse et pour son inestimable apport à la réalisation de ce travail.

Les travaux de terrain n'auraient pas pu aboutir sans l'apport et la bonne volonté de toutes les personnes qui ont bien voulu nous aider malgré leurs préoccupations quotidiennes. C'est le lieu de remercier Marguerite DAFIA TAMOU, Seydou DIARRA et Mora OUOROU, tous conseillers en production végétale respectivement à Niaro, Sékéré et Guessébani ; Siki TAMOU, secrétaire général de l'Association des Producteurs de Guessébani. Je pense aussi à mes différents guides, Soumanou à Ouassa-Kika et Tamou à Yarra, aux autorités locales qui ne nous ont pas monnayé leur aide et nous ont offert gîte et couverts : les délégués de Ningoussourou, de Ouassa-Kika, de Kargui et de Yambérou, le chef d'arrondissement de Tobré. Mes remerciements vont également à l'endroit de toutes les populations des différentes zones parcourues.

Une pensée spéciale pour les « jolies mignonnes » Elvire, Laurenda, Safiath, Stéphanie, Carmélie et les «jolis mignons » Jérémie, Alex Mirianaud et Frank. Enfin, un merci très spécial à ces trois femmes qui comptent le plus dans ma vie et ont contribué à faire de moi ce que je suis aujourd'hui : Gisèle DAKPOGAN, Georgette AGBEGNINOU et Ahmdatou MOUSSA-BAA. Si je vous ai mises en dernier ce n'est pas par oubli ni rattrapage. C'est parce qu'il n'y aura jamais assez de mots pour vous

remercier.

Que ceux que je n’ai pas mentionnés ici n’en prenne pas ombrage : il ne s’agit pas d’un oubli.

Résumé

Le présent travail vise à appréhender les trajectoires probables de l'occupation des terres et ses déterminants dans le bassin-versant de l'Alibori. Ce dernier est localisé au Nord du Bénin et est le siège de la culture cotonnière.

Les données utilisées pour atteindre cet objectif sont de plusieurs types. Il y a les images satellitaires de 1973, 1990 et 2008 d'une résolution de 28,5 m, un modèle numérique de terrain d'une résolution de 30 m, et les données climatiques. Ces dernières comprennent les hauteurs de pluie, les températures minimales et maximales et l'évapotranspiration potentielle, toutes couvrant la période de 1965 à 2004. Des travaux de terrain ont également été menés.

Le travail est organisé autour de trois grands axes.

Le premier axe est consacré à la dynamique de l'occupation du sol et ses différents facteurs. Les cartes d'occupation du sol réalisées à partir des images satellites montrent un recul marqué des formations végétales naturelles au profit de l'accroissement des superficies des champs et des jachères. Les déterminants de cette dynamique sont d'ordre direct ou indirect et sont essentiellement d'origine humaine.

Le second axe porte sur la variabilité climatique dans le secteur d'étude. Elle est basée sur les données de cinq stations dont quatre pluviométriques (Banikoara, Bembèrèkè, Kérou et Malanville) et une synoptique (Kandi). Les résultats montrent que sur l'ensemble du bassin, les tendances thermiques et pluviométriques sont à la hausse. A l'échelle stationnaire, il est à noter quelques disparités. Les stations de Kandi et Kérou décrivent une tendance pluviométrique à la baisse alors que toutes les autres connaissent une légère reprise. C'est la décennie 1995-2004 qui marque l'avènement de cette reprise sur ces stations même si statistiquement, elle reste à confirmer.

Le dernier axe porte sur la projection de l'occupation des terres dans le bassin-versant de l'Alibori en utilisant le modèle CLUE-S. Les cartes d'occupation du sol réalisées antérieurement, les facteurs identifiés et spatialisables, et d'autres paramètres comme l'itération, l'élasticité, les modèles de régression, la matrice de conversion ont été intégrés au logiciel du modèle afin de simuler l'évolution de l'occupation du sol de 2009 à 2050 en se basant sur un scenario optimiste de conservation des aires protégées. Les résultats montrent une accélération de la

tendance à la déforestation et d'extension des aires agricoles. Ces résultats confirment aussi que le modèle est efficace pour la prédiction de l'occupation du sol et peut être considéré comme outil d'aide à la prise de décision.

Mots– clefs : Bénin, Alibori, modèle CLUE, occupation du sol, variabilité climatique

Abstract

This thesis aims at identifying the way land-use and land-cover change occurs and its main factors in the Alibori catchment in Northern Bénin.

Different types of data and methods have been used to complete this goal. Among them are data from remote sensing with 28.5m resolution, a digital elevation model with 30m resolution and climate data. The latter comprises rainfall, temperature and evapotranspiration data, all ranging from 1965 to 2004. Additional field works have also been completed.

This work revolves around three main axes.

The first one is centered on land use and land cover change and its determinants. Remote sensing data from 1973, 1990 and 2008 and adequate methodology have been used to elaborate land use maps. Those maps show that forest cover is rapidly decreasing in the area, while croplands and other anthropic formations are rapidly increasing. The main drivers of this dynamic are either direct or indirect causes, but most of them are human-induced.

Climate variability has been the main focus of the second axe. Data were gathered from five stations among which four collect rainfall data (Banikoara, Bembèrèkè, Kérou and Malanville), while one (Kandi) is a synoptic station. Results show that rainfall patterns and thermal trends are rising in the entire watershed, although some discrepancies can be noted on the local scale. Kandi and Kérou stations displayed a decrease in the rainfall patterns while all the others indicate an increase. The increase in rainfall patterns is mostly obvious for the 1995-2004 decade. However, it is too soon to announce that the drought that started in the seventies has ended. Deepen statistical analysis on the long run are required.

The final axe is devoted to prediction of land use and land cover change in the Alibori watershed using the CLUE-S model. Land use maps realized beforehand, the various determinants, especially those that can be mapped and other parameters like iteration, elasticity, conversion matrix, logistic regression models have been taken into account as variables in the software used to run the model. The simulation started in 2009 and ended in 2050, based on an optimistic scenario according to which, protected areas will remain safe from human reach. Results show an increase

in deforestation trends and in agricultural area expansion. The results confirm that the CLUE-S model is efficient in predicting land use and land cover change and can be used as a good decision support tool.

Keywords: Benin, Alibori, CLUE model, predicting land cover, climate pattern.

Chapitre 1 : Cadre théorique de l'étude

Ce chapitre présentera le cadre théorique de l'étude, constitué de la problématique, des hypothèses de travail et les objectifs visés. La clarification de différents concepts-clefs ainsi qu'une revue de littérature, permettant de mieux situer le sujet y sont aussi présentées.

1. Justification de l'étude

Durant des siècles, les Hommes ont altéré la surface terrestre pour leur alimentation, à travers les activités agricoles. Près d'un tiers de cette surface est composée de surfaces cultivées et de pâturages. Plus de la moitié des surfaces cultivées ont été défrichées au cours du siècle précédent (Houghton, 1994). Au cours des dernières décennies, la conversion des savanes et forêts en champs et pâturages s'est considérablement accrue en milieu tropical (Houghton, 1994 ; Williams, 1994).

Les changements dans l'occupation et l'utilisation du sol jouent un rôle clé dans les changements environnementaux globaux. Ils contribuent de façon significative aux interactions terre-atmosphère et aux pertes de biodiversité. Ces changements constituent un facteur majeur dans le développement durable et les réponses humaines aux changements globaux. Enfin, ils sont primordiaux dans la modélisation intégrée et l'évaluation des problèmes environnementaux en général. Ces rôles divers ont été reconnus dans bon nombre de publications, conférences, symposiums et ateliers internationaux dédiés au sujet au cours des précédentes décennies ainsi que dans l'Agenda 21 des Nations-Unies (Turner et *al.*, 1995). Boserup (1965 et 1981) les décrit comme des processus évoluant avec le temps, du moins intensif vers le plus intensif, du fait de la croissance de population.

La recherche dans le domaine de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation des terres a pris une place importante dans l'analyse des processus et problèmes environnementaux tels que l'urbanisation incontrôlée, la détérioration qualitative de l'environnement, l'extension des zones agricoles dans des secteurs comprenant des écosystèmes fragiles (zones humides, par exemple) ou protégés. Les changements dans l'occupation et l'utilisation du sol, en tant qu'un des moteurs du changement environnemental global doivent être une thématique centrale du développement

durable (Meyer et Turner, 1994, Lambin et *al.*, 2000). Une connaissance approfondie des processus de cette dynamique devient donc indispensable.

De nos jours, l'accent est mis sur une transition de la collecte et l'utilisation statique de données sur les changements dans l'occupation du sol et leur représentation sous forme de cartes, vers une modélisation environnementale plus dynamique en vue de comprendre le passé, surveiller la situation actuelle et projeter les potentielles modifications futures (Lambin et *al.*, 2003).

La communauté scientifique a appelé à une étude substantive des changements d'utilisation des terres pendant la conférence de Stockholm en 1972 sur l'environnement humain, et encore vingt ans après, à la Conférence de Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED) en 1992. Au même moment, l'International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) et l'International Human Dimension Programme (IHDP) ont créé un groupe de travail pour mettre en place un agenda de travail et favoriser les recherches sur cette thématique.

Au cours des deux siècles précédents, les impacts des activités humaines sur l'environnement ont pris énormément d'ampleur, modifiant des paysages entiers pour finalement agir sur les processus à l'échelle de la planète comme le cycle hydrologique ou le climat (de Sherbinin, 2002). A très peu d'exceptions près, ce sont les Hommes et non plus les actions naturelles qui causent ces modifications et sont responsables de leur amplitude et de leur sévérité. Considérons les problèmes environnementaux comme la désertification, l'eutrophisation, l'acidification, les changements climatiques, l'augmentation du niveau de la mer, l'augmentation des gaz à effet de serre, les pertes de biodiversité. Dans tous ces problèmes et bien d'autres moins visibles, les changements dans l'occupation et l'utilisation du sol, causés par les activités humaines y sont impliqués à une échelle plus ou moins importante (Briassoulis, 2000). Un de ces problèmes est la diminution des forêts tropicales humides. Bien que les impacts finaux potentiels de ce phénomène ne sont pas encore connus, ses conséquences actuelles ne sont que trop visibles dans beaucoup de pays tropicaux. Il s'agit entre autres de l'érosion, le comblement des cours d'eau, les perturbations des cycles hydrologiques, les processus de savanisation, etc. L'Organisation des Nations-Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation estime entre 120 000 et 170 000 km² par an (l'équivalent des superficies cumulées du Bénin

et du Togo), les conversions des forêts en d'autres formes d'occupation ou d'utilisation à l'échelle de la Terre. (Skole, 1994 ; Geist et Lambin, 2001). Les impacts de ces différents problèmes environnementaux sont assez importants aussi bien à court qu'à long terme. La sécurité alimentaire, la vulnérabilité humaine, la santé et la sécurité sont en jeu à court terme, tandis que, c'est toute la viabilité du système-Terre qui est menacée à long terme. Sans une bonne compréhension des processus dynamiques en amont des changements dans l'occupation/ l'utilisation du sol, une compréhension de ces changements serait impossible (Lambin et *al.* 1999).

Les changements environnementaux globaux forment un système interactif et complexe reliant les actions humaines à l'occupation/l'utilisation du sol, aux rétroactions environnementales et leurs impacts et aux réponses humaines à ces impacts. Une complication additionnelle de ce système est le fait que ces relations interviennent à différentes échelles spatiales et temporelles (Turner et *al.*, 1995).

Le principe-clef nécessaire pour comprendre la dynamique de l'occupation du sol est de reconnaître le rôle de chaque acteur dans les modifications enregistrées, à travers leurs choix en matière de technologie ou de ressources à exploiter. Une hypothèse conciliante qui réunit les théories sociales et écologiques, et qui constitue une importante raison de poursuivre une modélisation intégrée de la dynamique de l'occupation du sol, est que les hommes réagiraient à des facteurs liés à l'environnement physique et au contexte socioculturel et économique. La recherche en matière de dynamique de l'occupation du sol doit donc être axée sur l'analyse des relations entre l'utilisation du sol et les variables socioéconomique et biophysiques qui agissent comme les causes des changements dans l'utilisation du sol (Turner et *al.*, 1993, Turner et *al.* 1995, Lambin et *al.* 2001). Ces causes sont généralement subdivisées en deux catégories. On distingue les causes qui affectent directement l'occupation/l'utilisation du sol telle que l'industrie du bois ou la construction des routes (permettant l'accès à des endroits auparavant inaccessibles). Les causes sous-jacentes sont les forces « fondamentales » à la base des causes directes. On y retrouve les facteurs démographiques, économiques, technologiques, institutionnels et culturels (Geist et Lambin, 2002). Dans la plupart des cas, un éventail plus large de facteurs est inclus dans les causes sous-jacentes, tels que la densité de population, la pluviométrie, l'aptitude culturale des sols et l'accessibilité. Une autre distinction peut être faite entre les facteurs susceptibles de changer avec le temps, comme la densité

ou les conditions d'accès aux marchés, et les facteurs relativement stables avec le temps mais avec des différences spatiales notables tels que le contexte culturel (Verburg et *al.*, 2003).

La télédétection, intégrée avec les systèmes d'information géographique (SIG), fournit un outil efficace pour l'analyse des changements d'occupation et d'utilisation des sols à un niveau régional, voire local. La technologie géospatiale qui combine les technologies de télédétection et de SIG détient le potentiel pour l'évaluation de ces changements et même une localisation de leurs potentiels impacts.

En effet, les problèmes liés à l'utilisation de résolution grossière et la nécessité de couverture répétée pour l'étude de la dynamique de l'occupation du sol, requièrent l'utilisation de la télédétection pour l'obtention des données appropriées. Les mesures par les techniques de télédétection des signatures spectrales fournissent des informations sur la couleur, la température, le taux d'humidité, la composition organique et inorganique ainsi que les propriétés spatiales telles que la superficie, la géométrie (taille, forme et texture) et la position. Plusieurs capteurs existent (MODIS, Landsat, Spot, etc.) pour le suivi, la quantification et la projection de l'occupation du sol à diverses résolutions.

La télédétection est utilisée dans la recherche sur la dynamique de l'occupation du sol à travers trois différents types d'analyses : (i) l'évaluation spatiale à travers la classification et la cartographie thématique, (ii) les évaluations de productivité à travers les indices de végétation, et (iii) l'étude des processus à travers les informations dérivées de l'imagerie satellitaire. L'évaluation sur un plan spatial de la dynamique de l'occupation du sol requiert des inventaires répétitifs de la couverture végétale globale. Afin de comprendre les conséquences d'une modification de la couverture végétale et/ou d'une intensification de l'utilisation, des données précises doivent être introduites dans des modèles réalistes. L'efficacité de ces modèles est accrue en utilisant des données issues de l'imagerie satellitaire.

Ces données jouent un rôle très important dans la planification et la gestion des ressources naturelles en fournissant une meilleure perception des changements dans l'occupation du sol et des tendances multi-temporelles (Loveland et *al.*, 2002 ; Treitz et Rogan, 2004)

Depuis les années 1990, la demande sociale en outils d'aide à la décision et de modélisation capables d'assister différentes tâches de gestion environnementale (notamment la prévention de risques) et d'aménagement des territoires s'est fortement accrue.

Les modèles relatifs à l'occupation du sol constituent un univers varié en termes d'objectif, de niveau d'agrégation, de dynamiques, de théorie initiale, de spécification, de données requises et d'application au monde réel. Des modèles descriptifs, prédictifs et d'évaluation d'impacts des changements de l'occupation du sol ont été conçus pour zones urbaines ou agricoles, des régions, des pays ou même du globe. Le niveau d'agrégation fonctionnelle et spatiale de ces régions varie principalement selon leurs objectifs.

Les modèles de changements de l'occupation du sol sont des outils utiles pour (i) explorer les divers mécanismes par lesquels ces changements interviennent et les variables sociales, économiques et spatiales qui en sont à la base (Batty et Longley, 1994, de Koning et *al.*, 1999), (ii) projeter les potentiels futurs impacts environnementaux et économiques desdits changements et (iii) évaluer l'influence des politiques alternatives et des régimes de gestion sur l'occupation du sol et les modèles de développement.

Bien que la plupart des causes des changements dans l'occupation/ l'utilisation du sol soient maintenant connues, les modèles conceptuels décrivant leur imbrication évoluent de plus en plus rapidement. Les modèles simplistes alliant causes sociales et impacts environnementaux ont évolué en des versions plus sophistiquées qui incluent des probables causes environnementales, impacts sociaux exerçant de fortes réactions l'une sur l'autre (Turner et Meyer, 1994).

Un des défis actuels de la recherche en géomatique est celui de la modélisation prospective de données géographiques à haute résolution. Des méthodes géostatistiques éprouvées pour l'interpolation et l'extrapolation spatiales existent depuis plusieurs décennies et sont implémentées dans nombre de logiciels géomatiques commercialisés. Par contre, des outils de modélisation temporelle et d'aide à la décision ne furent implémentés dans les SIG que récemment et doivent être considérés plutôt comme des algorithmes expérimentaux intéressants que des techniques opérationnelles (Paegelow et *al.*, 2004).

D'après Verburg (2000), les modèles de dynamique d'occupation des terres exigent assez d'informations sur la relation entre l'occupation des terres et les facteurs socioéconomiques et biophysiques. Les techniques de modélisation diffèrent en 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. Pour le dernier cas, le modèle CLUE (Conversion of Land Use and its Effects), un modèle consacré à la dynamique de l'occupation des terres, utilisé au Costa Rica pour simuler les changements, est une référence (Veldkamp and Fresco, 1996).

Le Bénin perd environ 100 000 hectares de sa végétation naturelle chaque année du fait des défrichements pour l'agriculture. La FAO a estimé à environ 70 000 hectares les pertes en couverture forestière entre 1990 et 2000 (Orékan, 2008). Soit une perte annuelle d'environ 2,3% de la couverture forestière totale (FAO, 2000).

Le bassin-versant de l'Alibori est une zone semi-aride où se juxtaposent les aires protégées et le bassin cotonnier. Il est le siège d'un « conflit » permanent entre la sauvegarde de l'environnement et les intérêts économiques de la population (ECOPAS, 2005). L'agriculture itinérante, l'élevage et les autres formes d'exploitation des ressources naturelles contribuent à une modification perpétuelle des écosystèmes de la région tout en menaçant les aires protégées avoisinantes. De plus, avec les péjorations pluviométriques des décennies précédentes, de nouvelles formes d'exploitation, ou des stratégies de mitigation peuvent apparaître avec des impacts aussi bien négatifs que positifs sur les écosystèmes du milieu (Houndénou et *al.* 2002 et 2002, Vissin, 2007).

Le choix de ce bassin a été déterminé par plusieurs facteurs, à savoir :

- Le cadre dans lequel s'inscrit cette étude ; différentes thématiques ont été élaborées dans le cadre du projet Esprit EDULINK, visant à couvrir tout le septentrion du Bénin en utilisant une approche par bassin-versant. L'étude des impacts des changements climatiques sur la biodiversité dans les bassins de la Sota, de la Mékrou et la détermination des hydro-écorégions et leurs déterminants dans le bassin de la Pendjari sont les autres travaux réalisés dans le cadre du projet susmentionné.

- L'absence de travaux de recherche à l'échelle du bassin ; en effet il n'existe pas de travaux couvrant spécifiquement le bassin-versant de l'Alibori. La plupart des travaux recensés ont été réalisés à l'échelle administrative (communes ou arrondissement) ou parfois des forêts classées (Alibori Supérieur, parc W, etc.) existant dans le milieu (Akindele, 2000 par exemple). D'autres études (Kissèzounon, 1978, Bio Bigou, 1987, Agli, 1995, Vissin, 2007, Boko G., 2009, etc.) prennent en compte ce secteur dans leur zone d'étude en travaillant sur le bassin béninois du Niger.

La présente recherche s'intéresse aux potentielles trajectoires de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori au nord du Bénin. Autrement dit, quelle est la tendance actuelle de l'occupation du sol dans ce milieu ? Quels facteurs sont à la base de cette tendance ? La variabilité climatique constitue-t-elle un déterminant spécifique à la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin-versant ?

Au vu de ces constats, plusieurs préoccupations viennent à l'esprit.

- Quel est l'état de l'occupation du sol en réponse aux différentes pressions auxquelles sont soumis les écosystèmes ?
- Les péjorations pluviométriques ont-elles un effet spécifique direct ou indirect sur cette dynamique ?
- Les changements observés dans l'occupation et l'utilisation du sol dans ce milieu peuvent-ils permettre sur le long terme une préservation de la biodiversité ?

2. Hypothèses de travail

Afin d'apporter des réponses aux questions soulevées par la problématique, les hypothèses suivantes sont été formulées :

- l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori est soumis à une dynamique caractérisée par la régression des formations végétales naturelles au dépens des formations d'origine anthropique ;
- au nombre des déterminants à la base de cette dynamique, la variabilité climatique joue un rôle clef ;
- il est possible de connaître l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori en utilisant le modèle CLUE-S.

3. Objectifs de l'étude

L'objectif général de cette étude est d'analyser les évolutions potentielles de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori en se basant sur un certain nombre de facteurs déterminants.

Plus spécifiquement, ce travail vise à :

- décrire la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori ainsi que les facteurs à la base de cette dynamique ;
- étudier la variabilité climatique du bassin-versant de l'Alibori,
- simuler l'évolution de l'occupation du sol dans la zone d'étude en utilisant le modèle CLUE-S

4. Définition de concepts clés

Afin de faciliter la compréhension du travail, il s'avère nécessaire d'expliciter certains concepts et mots-clefs.

Bassin-versant :
La notion de bassin-versant peut être considérée selon deux approches : l'approche hydrologique et l'approche topographique. Toutefois, les deux approches se rejoignent sur une même définition. Est appelée bassin-versant d'un cours d'eau *la surface délimitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce cours d'eau* (Baud et *al.*, 2008). Cette surface comporte :

- un exutoire qui est le point le plus en aval du réseau hydrographique par lequel passent toutes les eaux de ruissellement drainées par le bassin
- une ligne de crête définie par la ligne de partage des eaux ; elle constitue la limite topographiques des bassins-versants adjacents.

En fonction du type de réseau hydrographique, il existe trois types de bassin-versant (figure 1) :

- chêne: la ramification est bien développée avec un espacement régulier des confluences (cas de l'Amazone en Amérique du Sud, ou de l'Ouémé au Bénin);
- peuplier: le bassin-versant nettement plus long que large, présente de

nombreux affluents parallèles (cas de l'Alibori);

• pin: le bassin se caractérise par une concentration des confluences dans le secteur amont d'où sort un tronc qui ne reçoit plus d'affluents importants (cas du Nil).

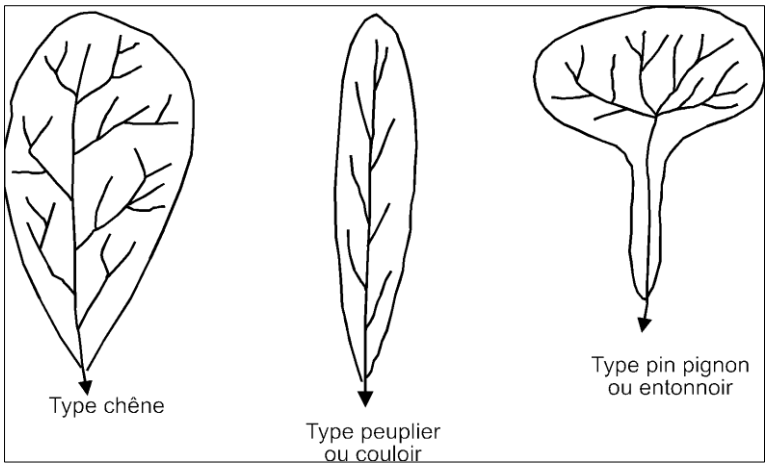


Figure 1 : Différents types de bassin-versant

Le bassin-versant tel que défini, correspond à l'approche topographique. Cette approche implique une imperméabilité du sol à l'intérieur de chaque bassin-versant, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Cette délimitation topographique devient donc insuffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines. Le bassin-versant (hydrologique) est alors différent du bassin-versant délimité strictement par la topographie. Il est appelé dans ce cas *bassin-versant réel* (Fritsch, 1995).

Les bassins-versants ne sont pas écologiquement fragmentant. Les formations végétales ne sont donc pas fonction de leurs limites. De plus travailler à l'échelle d'un bassin-versant présente l'avantage de se passer des limites administratives, invisibles sur le terrain et qui n'ont pas d'effet sur les phénomènes naturels. Inversement, les limites du bassin-versant ne sont pas visibles non plus sur le terrain, et les populations n'en tiennent pas compte dans l'exploitation des ressources naturelles.

Occupation du sol / Utilisation du sol :

Il n'est pas courant de vouloir définir simultanément deux concepts a priori différents en un seul exercice. Mais dans le contexte actuel, ce choix s'impose de par la

complexité des deux termes, la difficulté à leur trouver une définition propre et celle inhérente au fait que ces deux concepts sont parfois utilisés indifféremment dans la littérature francophone. Dans la littérature anglophone il existe une distinction très claire entre *land use* (utilisation du sol) et *land cover* (occupation du sol). Malgré cette distinction, Jansen (2006) 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). La notion d'occupation du sol se réfère à *la couverture physique et biologique du sol, incluant l'eau, la végétation, les espaces nus et les structures artificielles* (Encyclopédie de la Terre, http://www.eoearth.org). 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-jacente de cette surface*. En d'autres mots, il s'agit de *l'état physique de la surface de la Terre* sous la forme de montagne, ou forêts (Meyer, 1995). Meyer et Turner (1994) ajoutent qu'il comprend par exemple la quantité et le type de végétation, d'eau et autres matériaux terrestres. Moser (1996) précise qu'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.

Le concept de « l'utilisation du sol » possède différentes significations selon les disciplines et implique de ce fait un certain nombre de paramètres pour la plupart non identifiés. Mais cela n'empêche pas ces différentes significations d'être toutes valables. L'Encyclopédie de la Terre (op. cit.) précise qu'il s'agit d'un terme plus complexe. En sciences naturelles, il est défini en termes de *syndromes des actions humaines telles que l'agriculture, la foresterie et les constructions qui altèrent les processus à la surface du sol, y compris la biogéochimie, l'hydrologie et la biodiversité*. Pour les spécialistes de l'aménagement et des sciences sociales, le concept a un sens plus large et comprend les contextes et objectifs socioéconomiques dans et pour lesquels l'espace est utilisé (ou non), tels que agriculture de rente versus agriculture de subsistance, espace public ou privé, etc. Cette définition rejoint celle de Turner et *al.* (1995) selon qui l'utilisation du sol comprend *la manière dont les éléments biophysiques du sol sont manipulés et l'intention soutenant cette*

manipulation, c'est-à-dire le but dans lequel le sol est utilisé. Abondant dans le même sens, Meyer (1995) affirme que l'utilisation du sol est *la manière et l'objectif selon lesquels les êtres humains utilisent la terre et ses ressources*. Skole (1994) va plus loin en ajoutant que l'utilisation du sol est *l'usage humain d'une forme d'occupation du sol, les moyens par lesquels l'activité humaine s'approprie les résultats d'une production primaire nette, déterminée par des facteurs socioéconomiques complexes*. Pour Jansen (2006), l'utilisation du sol désigne *le type d'activité humaine ayant lieu à la surface ou proche de la surface du sol*. Enfin, pour la FAO (1995) l'utilisation du sol concerne *la fonction ou le but dans lequel le sol est utilisée par la population humaine locale et peut être définie comme les activités humaines directement liées à la terre via l'utilisation de ses ressources ou ayant un impact sur cette dernière*.

Lambin et *al.* (1999) précise que l'utilisation du sol est déterminée par des facteurs naturels, socioéconomiques, institutionnels, culturels et légaux. Elle est limitée par les contraintes biophysiques qui incluent le climat, la topographie, les sols, le substratum géologique, le couvert végétal et la disponibilité ou non de l'eau.

Dans le cadre de ce travail, on retiendra que l'utilisation du sol est *l'usage fait d'un espace par les êtres humains dans le cadre de différentes activités déterminées par un contexte et des facteurs spécifiques*.

Le tableau I présente des exemples de types d'occupation et d'utilisation du sol.

Tableau I : Exemples d'occupation du sol et d'utilisation du sol

Occupation du sol	**Utilisation du sol**
Forêt	Forêt naturelle Production de bois Espace vert Zone de pâturage
Prairie	Espace naturel Pâturage Récréation Usages multiples
Espaces cultivés	Cultures annuelles Plantations / Cultures pérennes Tourisme / Récréation Usages multiples
Zone construite	Ville Village

	Site archéologique
	Zone industrielle
	Zone commerciale
	Transports
	Usages multiples

Source: Briassoulis, 2000

Si l'occupation du sol peut être directement observée sur le terrain ou à partir des données de télédétection, l'identification du type d'utilisation du sol requiert le recours aux méthodes des sciences sociales et naturelles (systèmes experts, interviews, etc.) pour identifier quelles activités humaines ont lieu à quels endroits, même lorsque l'occupation du sol semble être la même.

Malgré l'existence de cette distinction théorique des deux concepts, ils arrivent qu'ils soient utilisés de façon interchangeable dans la littérature (Kok, 2001).

Pour diminuer le risque de confusion, le terme « états de surface » est souvent adopté dans la documentation scientifique francophone en la matière. Dans le cadre de ce travail, le choix a été fait de ne pas utiliser ce terme puisqu'il va au-delà des concepts d'occupation et d'utilisation du sol. En effet, selon Casenave et Valentin (1989), « *Le terme état de surface désigne un système de surfaces élémentaires à un instant donné, système qui constitue un ensemble homogène au sein duquel les différentes composantes entretiennent des relations fonctionnelles quant au ruissellement et à l'infiltration* ». La notion d'état de surface comprend donc, en plus de l'occupation et l'utilisation du sol, les processus hydrologiques (ruissellement, écoulement, infiltration). Son utilisation ne serait donc pas adaptée au présent contexte, puisque les processus hydrologiques ne seront pas pris en compte ici.

Changements dans l'occupation et l'utilisation du sol :

Comme, de nos jours, la plupart des modifications affectant l'occupation du sol sont d'origine anthropique, une compréhension des changements dans l'utilisation du sol est nécessaire pour comprendre ceux affectant l'occupation du sol.

Dans l'analyse des changements dans la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol, il est nécessaire de conceptualiser la notion de changement afin de pouvoir le détecter dans la réalité. A un niveau élémentaire, les changements dans l'occupation et l'utilisation des terres désignent *les modifications (quantitatives) en termes*

d'extension spatiale (augmentation ou réduction) d'un type d'occupation ou d'utilisation du sol. Même à ce niveau, il est important de préciser que la détection et la mesure du changement dépend de l'échelle spatiale. Plus le niveau de détail est élevé, plus les changements pourront être détectés. (Briassoulis, 2000)

Jansen (2006) définit le changement dans l'occupation du sol comme *le remplacement complet d'une unité d'occupation par une autre*. Le changement dans l'utilisation quant à elle inclut *la modification d'une unité d'occupation*.

Pour Turner et *al.* (1995), les changements dans l'occupation du sol constituent la source et le puits de l'essentiel des flux d'énergie et de matériel composant la biosphère et la géosphère, y compris les émissions de gaz et le cycle de l'eau. Ils constituent le résultat des interactions entre les facteurs socioéconomiques et institutionnels et ceux environnementaux.

Dans le cas du changement dans l'occupation du sol, la littérature distingue deux types de changements : la conversion et la modification (Turner et *al.*, 1995 ; Skole, 1994). On parle de conversion, lorsqu'on passe d'une unité d'occupation à une autre. La modification quant à elle induit une altération de la structure ou de la fonction sans nécessairement un passage d'une unité d'occupation à une autre. Il peut s'agir de modification sur le plan de la productivité, la biomasse ou phénologique.

De la même manière, les changements dans l'utilisation du sol impliquent soit une conversion d'un type d'utilisation vers un autre, soit la modification d'une forme d'utilisation. Il peut s'agir de changements tels que le passage d'une réserve naturelle à un parc (le couvert végétal ne change pas, mais la fonction a changé) (Briassoulis, 2000).

La problématique des modifications dans l'occupation et l'utilisation des terres tourne autour de deux questions essentielles : quelles sont les causes de ces changements ? et quels en sont les impacts (environnementaux et socioéconomiques) ? Seule la première interrogation sera prise en compte ici.

Il existe deux classifications des facteurs à la base des changements. La première est basée sur leur origine. Selon cette classification, on distingue deux catégories : les facteurs socioéconomiques et ceux biophysiques. A noter que ces derniers ne causent pas directement de changement dans l'occupation du sol, mais peuvent influer sur les

décisions des utilisateurs. La seconde classification est de type sémantique et concerne la manière dont les différents facteurs contribuent aux changements dans l'utilisation et l'occupation du sol. On distingue alors les facteurs directs (actions humaines, essentiellement) et les facteurs indirects (facteurs n'ayant pas un effet direct, mais influant sur l'occupation et l'utilisation du sol, comme les facteurs institutionnels ou économiques). Une littérature détaillée existe dans ce domaine (Turner et *al.*, 1995, Moser, 1996, Geist et Lambin, 2002 et 2003, Verburg et *al.*, 2000, Young et *al.*, 2006, etc.).

Modèles et modélisation :

Hagett (1973) définit le modèle comme une *représentation idéalisée de la réalité afin de faire apparaître certaines de ses propriétés*. Le recours aux modèles est rendu nécessaire par la complexité de la réalité. Ils fournissent une image de la réalité simplifiée et apparemment rationnelle et sont, pour le chercheur, une source d'hypothèses de travail à mettre à l'épreuve de la réalité. Baud et *al.* (2008) complète qu'il s'agit *d'une construction transposable qui identifie les éléments le constituant et examine leurs relations et leur interdépendance*. Pour Brunet (2000), un modèle est *une structure formalisée utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations*. Il peut aussi être défini comme *représentation formelle et épurée du réel ou d'un système de relation* (Brunet, 1992). A noter que dans cette dernière définition, l'objectif final du modèle n'est pas précisé.

Ackoff (1962) cité par Hagett (1973), propose une classification des modèles en trois catégories. Du moins abstrait vers le plus abstrait, il distingue : les modèles iconiques, les modèles analogiques et les modèles symboliques. L'objectif du modèle est de permettre une meilleure structure de la pensée. Il existe quatre types de modèles (Brunet, 2000) : les modèles littéraires qui décrivent et délimitent les problèmes ; les modèles statistiques qui permettent de déterminer les liens entre les différents éléments d'un système ; les modèles mathématiques qui décrivent des relations qui peuvent être des plus simples jusqu'à une analyse systémique complexe ; les modèles conceptuels, qui favorisent la structuration de la pensée et de la reconnaissance du problème.

La représentation de la réalité par un modèle passe par plusieurs filtres, qui ont chacun leur subtilité qui doivent être prises en compte: la perception du phénomène;

sa représentation; la construction d'un modèle; l'interprétation du sens de ce modèle; la capacité du modèle à rendre compte du phénomène. Dans le cadre de ce travail, on retiendra donc qu'un modèle est *une sorte construction mentale, qui simplifie la réalité, afin de mieux comprendre certains fonctionnements, certaines logiques sous-jacentes à la réalité*.

On pourrait être tenté de définir la modélisation comme le processus qui consiste à ramener un phénomène sous la forme d'un modèle. Modéliser c'est *rechercher quelle composition de modèles rend le mieux compte d'une organisation régionale ou locale, d'une configuration de champ ou de réseau, ou d'une distribution spatiale. C'est aussi, le cas échéant, proposer quelque modèle nouveau au stock d'informations dont on dispose déjà, si besoin est, c'est-à-dire si le stock semble révéler quelque lacune* (Brunet, 2000). La modélisation est une procédure de recherche. Comme telle, elle appelle des règles de rigueur et de bon usage. La modélisation en géographie commence par deux questions inévitables et associées: où sommes-nous? qu'est-ce qui a des chances d'être en jeu ?

5. Point des connaissances

Plusieurs études ont abordé avec diverses méthodes, les différentes thématiques qui font l'objet de cette étude. L'objectif ici sera de faire le point sur ces travaux, en spécifiant la problématique, la méthodologie utilisée, et les résultats obtenus. Les principales thématiques retenues sont :

- la variabilité climatique ;
- l'occupation et l'utilisation du sol, sa dynamique et les causes de cette dynamique ;
- la modélisation de l'occupation du sol ;
- le modèle CLUE et ses variantes.

5.1. Variabilité climatique

Malgré l'existence de plusieurs paramètres climatiques, la plupart des travaux recensés qui s'intéressent au sujet sont essentiellement consacrés à la pluviométrie. Cependant, quelques travaux abordent la pluviométrie et la température. Rarement la température est prise en compte de façon isolée. Ainsi, dans le cadre du bassin

béninois du fleuve Niger, Houndénou et *al.* (2002) mettent en évidence une forte instabilité et une réduction de la saison humide sur le bassin béninois du fleuve Niger. Ils montrent aussi que les séries pluviométriques de ce bassin connaissent une baisse marquée sur la période 1960-1990 avec une recrudescence de « pluies tardives ». Dans le même secteur d'étude, Vissin (2007) en se basant sur la période 1955-1992, conclut à la même péjoration pluviométrique. A l'échelle du Bénin, Boko P. (2009) a étudié les tendances thermométriques sur la période 1965-2004. A partir des tendances, il aboutit au constat qu'il existe une augmentation des températures moyennes avec la possibilité d'un potentiel un réchauffement sur l'ensemble du pays. Ces différents travaux sont particulièrement intéressants, surtout sur le plan de l'approche méthodologique utilisée pour calculer les tendances pluviométriques et thermométriques.

A l'échelle sous-régionale, Servat et *al.* (1998) ont utilisé les données de plus de deux cents stations entre 1930 et 1980 pour montrer que la sous-région est le siège d'une fluctuation des hauteurs de pluie. Toute la zone semble marquée par une alternance de récessions et d'excédents pluviométriques. L'approche cartographique utilisée dans la présentation des résultats a été très utile dans le cadre de ce travail.

Paturel et *al.* (1995) ont cherché les ruptures de stationnarité dans les séries chronologiques portant sur le régime pluviométrique du Bénin, du Togo, du Ghana et de la Côte d'Ivoire. En utilisant des données de 1950 à 1989 couplées à des méthodes cartographiques et statistiques, ils concluent à une baisse brutale de la pluviométrie au cours des années 1970. Gautier et *al.* (1998) en utilisant les données pluviométriques de 1950 à 1989 constatent la même rupture dans le régime pluviométrique, mais la situent à partir de 1966. Ils précisent que les zones tropicale humide et subéquatoriale sont moins gravement touchées que celles soudaniennes et sahéliennes.

L'Hôte et *al.* (2002), en se basant sur un ensemble de 21 stations réparties entre le Sénégal, le Mali, la Gambie et la Mauritanie, remarquent que la récession pluviométrique constatée au cours des années 1970, continue dans toute la zone sahélienne, malgré la survenue de deux années exceptionnelles en 1994 et 1999. Ozer et *al.* (2003) affirment plutôt que la sécheresse démarrée au cours des années 1970 serait plutôt terminée, en tout cas pour ce qui concerne la zone sahélienne.

New et *al.* (2006) ont étudié les données climatiques extrêmes à l'échelle journalière pour les régions australe et occidentale de l'Afrique. Ils en ont déduit une augmentation de la pluviométrie moyenne journalière, mais statistiquement insignifiante. Pour la température moyenne diurne, les tendances régionales sont difficiles à ressortir car plusieurs stations voisines montrent des tendances opposées.

Dans cette recherche, l'étude des tendances a permis de caractériser la variabilité climatique dans la zone d'étude.

5.2. Dynamique de l'occupation du sol et facteurs à la base

Il existe peu de travaux sur la dynamique de l'occupation du sol concentrés sur le bassin-versant de l'Alibori. Mais des travaux existent sur la zone septentrionale du Bénin et couvrent parfois entièrement ou en partie le secteur d'étude.

Vissin (2007) a étudié la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin béninois du Niger à partir des images aériennes et satellites de 1979 et 1992. Ses résultats ont montré une régression de l'ensemble des formations végétales naturelles au profit des formations anthropique. Il attribue ce constat à l'augmentation de la population qui crée une pression grandissante sur les ressources naturelles. Dans le massif de l'Atacora, à l'ouest du bassin de l'Alibori, Tenté (2000) a étudié la dynamique de l'occupation des terres et a remarqué une forte dégradation des formations ligneuses. Selon lui, si cette tendance se poursuit, les conséquences seraient irréversibles et pourrait entraîner une perte inestimable de la biodiversité animale et végétale. Ces travaux constituent des références sur la dynamique de l'occupation du sol. Mais les causes de cette dynamique ne sont pas souvent étudiées en profondeur, soit parce qu'elles ne constituaient pas le but premier de la recherche (Tenté, 2000) soit parce qu'elles sont abordées de façon très superficielle (Vissin, 2007).

Hors du Bénin, d'autres chercheurs ont tenté d'établir de manière locale ou sous-régionale la dynamique de l'occupation du sol ainsi que ses facteurs.

Du point de vue de l'approche méthodologique, Mas (2003) en utilisant une approche basée sur la logique floue, des images satellites et autres données auxiliaires a essayé d'améliorer la précision des cartes d'occupation du sol réalisées par une classification supervisée. Ceci lui permet d'obtenir une précision de 79% alors qu'une simple classification n'avait donné que 67%. Cette approche présente l'avantage de pouvoir

intégrer des cartes antérieurement réalisées et d'établir des relations entre l'occupation et l'utilisation du sol avec des facteurs environnementaux spécifiques à la zone cartographiée.

Reid et *al.* (2000) ont étudié la dynamique de l'occupation du sol en réponse à des changements biologiques, climatiques et sociopolitiques au sud-ouest de l'Ethiopie. En appliquant une méthodologie basée sur l'évolution du milieu telle que vécue par les populations, les auteurs ont montré qu'il n'existe pas de causes « classiques » de la dynamique de l'occupation du sol, et qu'en fonction de l'échelle (locale, régionale nationale, continentale ou globale), certains facteurs sont plus déterminants que d'autres. Pour ces auteurs, c'est l'approche d'une modélisation à l'échelle globale qui entraine cette standardisation des facteurs. Hussien (2009) a abordé la même thématique pour le même pays en utilisant des images Landsat (MSS, TM et ETM+) et ASTER, ainsi que des enquêtes socioéconomiques. Il aboutit aussi aux constats selon lesquels, les formations denses régressent au profit des formations de savanes et celles d'origine anthropique. Les facteurs à la base de cette dynamique sont la croissance démographique, les sécheresses, la dégradation de l'environnement et les réformes agraires.

Long et *al.* (2008) ont utilisé des scènes Landsat de 1995, 2000 et 2006 pour analyser la dynamique de l'occupation du sol dans la province de Chongqing (Chine) et les dimensions politiques de ses différents facteurs. Les auteurs ont recours à une méthode basée sur une classification supervisée des images et une matrice de changement pour cartographier et analyser l'occupation du sol. Les résultats montrent une régression des terres agricoles qui sont converties en zones d'habitations. Les facteurs politiques sous-jacents (projets de constructions d'infrastructures, viabilisation,) sont à la base de ce constat.

Lambin et *al.* (2003), dans le cadre de travaux sur les changements dans l'occupation et l'utilisation des terres dans les régions tropicales, affirment que ces changements sont dus à une combinaison de facteurs synergétiques tels que la rareté des ressources, menant à une augmentation de la pression sur ces mêmes ressources, aux diverses opportunités crées par les marchés, les interventions institutionnelles externes, la perte de la capacité d'adaptation et des mutations dans l'organisation sociale. Les modifications dans les services des écosystèmes résultant des

changements dans l'occupation et l'utilisation du sol réagissent aux facteurs à la base de l'utilisation du sol. Les auteurs concluent qu'une analyse systématique des travaux réalisés à l'échelle locale sur l'utilisation du sol, menée sur une période donnée permettra de découvrir les principes généraux qui fourniront une explication et une prédiction des nouveaux changements dans l'utilisation du sol

Un collectif de vingt-six chercheurs (Lambin et *al.*, 2001) ont montré que la plupart des travaux portant sur les facteurs de l'occupation et de l'utilisation du sol se contentaient souvent de simplifications des faits. La plupart des facteurs étant devenus des « classiques » que chaque chercheur adapte à son milieu. Les auteurs vont au-delà de ces simplifications pour démontrer que les causes directes de l'occupation et de l'utilisation du sol, ont des facteurs sous-jacents beaucoup plus profonds et moins simplistes que ce que la recherche actuelle tend à prouver.

La connaissance des changements dans l'utilisation et l'occupation des sols constitue généralement une des étapes nécessaires à sa modélisation.

5.3. Modélisation de l'occupation du sol

La recherche dans le domaine de la modélisation de l'occupation du sol a souvent eu pour objectif final la projection de son évolution future dans un contexte spécifique. Plusieurs méthodes et modèles ont été élaborées avec divers degrés de complexité et des niveaux de fiabilité relative. On distingue les modèles mathématiques – qui comprennent les modèles statistiques et les modèles de probabilités – des modèles spatiaux et des modèles linéaires. L'intégration d'outils tels que les SIG et les réseaux neuraux artificiels dans ces modèles ne s'est fait que plus tard, mais leur usage s'est beaucoup répandu.

Au Bénin, Oloukoi et *al.* (2006) en utilisant une méthode basée sur les cellules automates, les matrices de transition et les matrices de probabilité ont essayé de projeter l'occupation du sol dans le département des Collines aux horizons 2010 et 2020. Ils ont constaté que les formations végétales naturelles connaissaient une nette régression au profit des champs et des jachères. Les auteurs prédisent qu'à la longue, la colonisation agricole atteindra aussi bien les zones impropres comme les bas-fonds, mais aussi celles frappées d'interdit comme les aires protégées et les forêts sacrées.

Ailleurs dans le monde, Paegelow et *al.* (2004) ont utilisé trois approches différentes (SIG, réseaux neuraux et modèle linéaire généralisé) pour modéliser l'occupation du sol dans les Pyrénées. Le but était de pouvoir comparer les résultats obtenus à l'occupation réelle du sol afin de comparer les différentes techniques de modélisation. Les auteurs obtiennent comme résultat que les modèles statistiques ont, dans le cas de leurs travaux, une meilleure capacité de prédiction. Ils font également ressortir les limites générales des trois méthodes de modélisation et proposent, non pas un choix de modèle spécifique, mais plutôt l'utilisation de plusieurs modèles sur un même site afin de faciliter la prise de décision.

Pijanowski et *al.* (2002) ont utilisé le modèle LTM (Land Transformation Model) qui est composé de réseaux neuraux artificiels couplé à un SIG, pour prévoir l'évolution de l'occupation du sol dans un milieu urbain, en l'occurrence, le bassin de Grand Traverse Bay (Michigan, Etats-Unis). Les réseaux neuraux ont servi à estimer les différentes formes d'évolution dans le milieu et à tester la capacité prédictive du modèle, tandis que les SIG ont été utiles pour les facteurs spatiaux et réaliser les différentes analyses spatiales. Comme résultats, les auteurs retiennent que la capacité de prédiction du modèle est élevée lorsqu'il est appliqué à une échelle plus grande. Une des limites de ce modèle est qu'il se base sur le principe que la plupart des variables, ainsi que les relations établies à l'aide des réseaux neuraux seront stables sur le long terme ; ce qui est rarement vérifié, surtout en milieu urbain.

Tang et *al.* (2005), ont utilisé le même modèle(LTM) couplé avec un modèle d'évaluation environnementale (L-THIA) pour prédire l'expansion urbaine et les impacts d'une pollution de sources multiples ainsi que ceux de la croissance urbaine. Les résultats montrent que l'écosystème urbain et ceux environnants connaîtront une pollution croissante du fait de l'expansion urbaine. Une augmentation de la teneur en azote est aussi probable. Les auteurs suggèrent donc que les écosystèmes soient pris en compte dans les décisions d'aménagement et les projets de planification urbaine.

En plus d'avoir les mêmes limites que les travaux de Pijanowski (2002) – puisqu'ils sont basés sur le même modèle – cette étude nécessite des données trop idéales et impossibles à obtenir du fait de l'inexistence de mesures historiques de ces variables. De plus, elle ne prend pas en compte les modifications temporelles éventuelles liées aux changements dans la prise de décision.

Les données sur les tendances de l'occupation du sol de l'USGS ont permis à Sohl et Sayler (2008) d'utiliser le modèle Forecasting Scenario (FORE-SCE) pour prédire l'évolution de l'occupation du sol pour le sud-est des Etats-Unis jusqu'en 2050. Une régression logistique a été utilisée pour établir les relations entre l'occupation du sol et les facteurs potentiels. Si le modèle s'est avéré être une approche efficace dans la projection de l'occupation du sol, l'absence de procédure de validation limite la portée des résultats. De plus, des études plus détaillées sont nécessaires pour la mise en place de scenarios plus adéquats.

Il serait illusoire de vouloir faire une revue de tous les modèles conçus pour prévoir et projeter l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol ici. Mais un focus particulier sera fait sur le modèle CLUE et ses différentes variables.

5.4. Le modèle CLUE

Veldkamp et Fresco (1996) ont conçu le modèle CLUE pour la simulation de la conversion des formes d'occupation du sol ainsi que les changements spatio-temporels qui y interviennent du fait des interactions entre les facteurs humains et biophysiques. Cette simulation est réalisée à l'échelle locale, mais en prenant en compte les besoins et processus à l'échelle régionale (ou nationale selon le contexte). Les facteurs pris en compte sont des facteurs humains comme la taille et la densité de la population, le niveau technologique régional et international, les conditions économiques et les facteurs biophysiques dont l'aptitude biophysique locale et sa variabilité, l'historique de l'occupation du sol, la répartition des infrastructures, etc. Les résultats ont prouvé une meilleure efficacité du modèle par rapport aux approches utilisées à l'époque. Mais la nécessité de calibration du modèle et l'utilisation de relations qualitatives incertaines au sein des facteurs, limitent l'aspect pratique des résultats des simulations obtenues.

Plusieurs applications du modèle ont été faites pour la Chine, le Costa Rica, l'Equateur et les Philippines (Verburg et *al.* 1999, Veldkamp et *al.* 2001, Soepboer, 2001, etc.). La nécessité de pouvoir appliquer le modèle à des espaces plus réduits et des résolutions plus fines a amené à la conception d'une autre version du modèle. Le modèle CLUE-S réalisé par Verburg et *al.* (2002) répond à cette préoccupation. Au Bénin, quelques applications du modèle ont déjà été réalisées. Judex et *al.* (2002) ont simulé l'occupation du sol dans le bassin supérieur de l'Ouémé en utilisant ce modèle.

Les facteurs considérés sont essentiellement la densité de population, l'aptitude agricole des sols, les aires protégées et des facteurs de distance. Dans les trois scenarii développés, l'expansion agricole progresse très rapidement autour des installations humaines avant d'évoluer vers les forêts. Dans le cas de la construction d'une nouvelle route, elle jouera un rôle de front pionner. Des nouvelles localités seront créées le long de cette dernière et seront suivies d'une expansion agricole rapide. En 2025, les zones agricoles auront progressé de 62% au détriment des forêts.

Orékan (2008) est parti des cartes de l'occupation du sol, établies à partir d'images Landsat, et des facteurs socioéconomiques obtenus grâce à des enquêtes au niveau des ménages et des facteurs, pour réaliser une simulation de l'évolution probable de l'occupation du sol au Centre-Bénin. Bien que plus de quatorze facteurs eussent été identifiés au départ, la plupart ne furent pas reconnus comme significatifs après l'analyse de régression. Deux principales unités d'occupation ont été retenues pour la simulation. Il s'agit des forêts et des zones agricoles. A ces deux, s'ajoutent les unités classées dans la catégorie « Autres » qui n'évoluent pas dans le temps. Deux scenarii ont été réalisés : un premier qui prévoit l'existence de couverts forestiers en 2025 et un second basé sur une aggravation des tendances et qui prévoit la disparition des forêts à l'horizon 2020. Les courbes ROC et la méthode de changement de résolution ont servi à la validation des résultats obtenus.

Zékpété (2009) a aussi utilisé le modèle CLUE-S pour simuler l'évolution de l'occupation du sol dans trois communes du Nord du Bénin. En prenant en compte huit facteurs (la pédologie, les distances au fleuve, aux routes, aux localités, aux rivières, la densité de la population, la moyenne pluviométrique et l'écart à la moyenne des précipitations) et l'occupation du sol de 2006, elle constate une diminution progressive des superficies des formations de savanes au profit des espaces cultivés.

Engelsman (2002) a simulé l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin de Sélangor en Malaisie. En se basant sur seulement deux facteurs sociaux (densité de la population et force de travail) et d'autres facteurs biophysiques, il montre qu'en l'absence d'une politique de conservation des forêts, celles-ci sont condamnées à une disparition sur l'ensemble du bassin en 2014.

Fox et *al.* (2009) ont modélisé l'évolution de l'occupation du sol pour le sud-est de l'Asie entre 2001 et 2050. Globalement, environ 9% de la végétation présente sera remplacée par des spéculations agricoles et 4% de cette modification sera due aux plantations d'hévéa. Cette culture étant très consommatrice de ressources en eau, ce qui pourrait avoir des impacts importants sur le régime hydrologique de la région pour les années à venir.

Comme son prédécesseur, le modèle CLUE-S a été aussi appliqué ailleurs dans le monde. En Afrique, Fotsing (2009) a conçu un système d'information pour l'analyse des changements dans les systèmes d'utilisation de l'espace au nord du Cameroun en utilisant CLUE-S comme un sous-module pour la simulation de l'occupation du sol. Le système d'Information ainsi conçu est dénommé SMALL Savannah et a permis de simuler l'évolution potentielle de cinq unités d'occupation : les habitations, les zones de cultures maraîchères, les zones de cultures pluviales, les zones de culture de mil repiqué et la brousse. Trois scenarii ont été mis en place dans ce cadre : le cas de la poursuite des tendances observées, un scenario d'intensification de l'agriculture et d'amélioration technologique (dit boserupien) et un scenario malthusien basé sur une aggravation des tendances observées. Les résultats obtenus ont été validés par les méthodes de changement d'échelle et des courbes ROC.

Fotsing, et *al.* (2010) ont utilisé le modèle CLUE-S pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace dans la région autour de Maroua à l'extrême Nord du Cameroun. Les données de la période 1987 – 1999 ont été utilisées pour la validation et la calibration du modèle. La simulation a été réalisée sur la période 1999 – 2010. Les principales dynamiques observées concernent le développement de la culture maraîchère et l'extension de la culture du sorgho de contre saison qui induisent une compétition plus importante et des conflits potentiels dans l'accès aux ressources. Le modèle peut donc être utilisé pour initier des concertations ou négociations entre les acteurs concernés par la gestion de l'espace.

Toutes ces différentes applications, à quelques exceptions près [(Orékan (2008) et Fotsing (2009)] utilisent la même approche méthodologique et ont de ce fait les mêmes limites. En l'absence de données antérieures, la calibration et la validation du modèle est difficile. Le choix des facteurs nécessite aussi une bonne connaissance du secteur d'étude, or dans la plupart des cas, ce choix n'est pas basé sur des travaux de

terrain, mais sur des savoirs d'experts et sur la littérature disponible.

Le présent chapitre a présenté les principaux aspects théoriques et conceptuels de l'étude. Les raisons ayant poussé au choix du sujet et du secteur d'étude ont été expliquées. Les travaux antérieurs, réalisés sur le secteur d'étude, ou qui l'englobent ainsi que les travaux ayant abordé une ou plusieurs des thématiques traitées dans cette recherche ont été aussi présentés. Les concepts-clefs ayant été aussi définis, le chapitre suivant décrira les caractéristiques physiques humains du bassin-versant de l'Alibori.

Chapitre 2 : Le cadre d'étude : description physique et humaine du bassin-versant de l'Alibori

Ce chapitre présente le milieu et les caractéristiques du secteur d'étude. Ces caractéristiques comprennent aussi bien les aspects physiques (climat, sols, végétation, faune, et topographie) que les aspects humains (peuplement, démographie et économie).

1. Localisation et situation administrative

Le bassin de l'Alibori est situé au nord-est du Bénin. Il se présente sous une forme allongée avec une orientation NNE-SSW. Il est situé entre 9 et 13° de latitude Nord et entre 2° et 3° de longitude Est. Il couvre un territoire de 13 740 km² (fig. 1).

Sur le plan administratif, il est à cheval sur trois départements à savoir le Borgou, l'Alibori et l'Atacora. Mais la majeure partie du bassin se situe dans le département de l'Alibori. Du nord au sud, les communes situées dans son emprise sont Karimama, Malanville, Banikoara, Kandi, Kérou, Gogounou, Péhunco, Sinendé et Bembèrèkè. (fig. 2).

2. Le cadre physique

Le cadre physique est composé d'éléments biophysiques qui interagissent directement ou indirectement les uns sur les autres. Il s'agit du climat, de la topographie, de l'hydrographie, de la géologie, des sols, de la flore et de la faune.

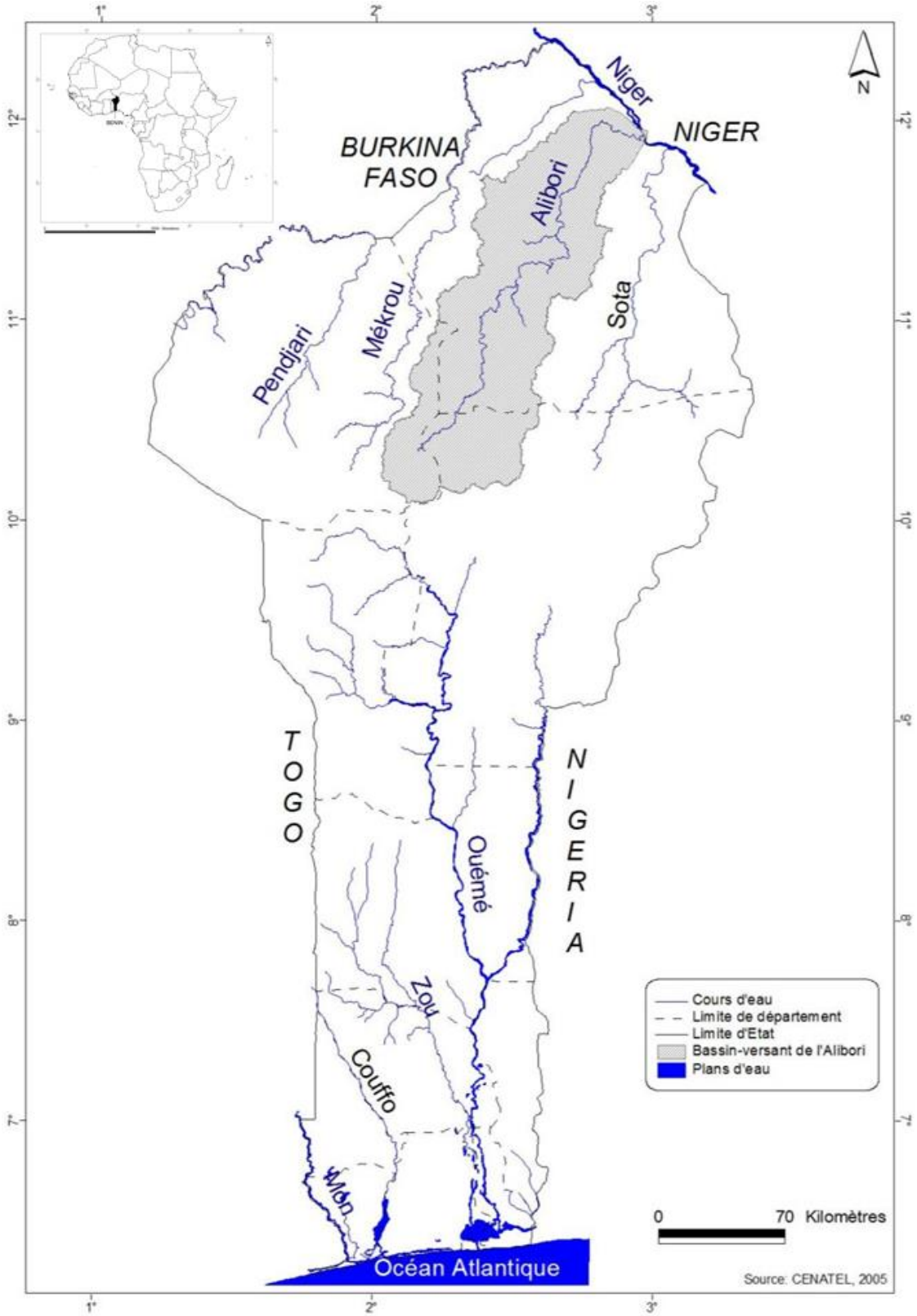


Figure 2: Localisation de la zone d'étude

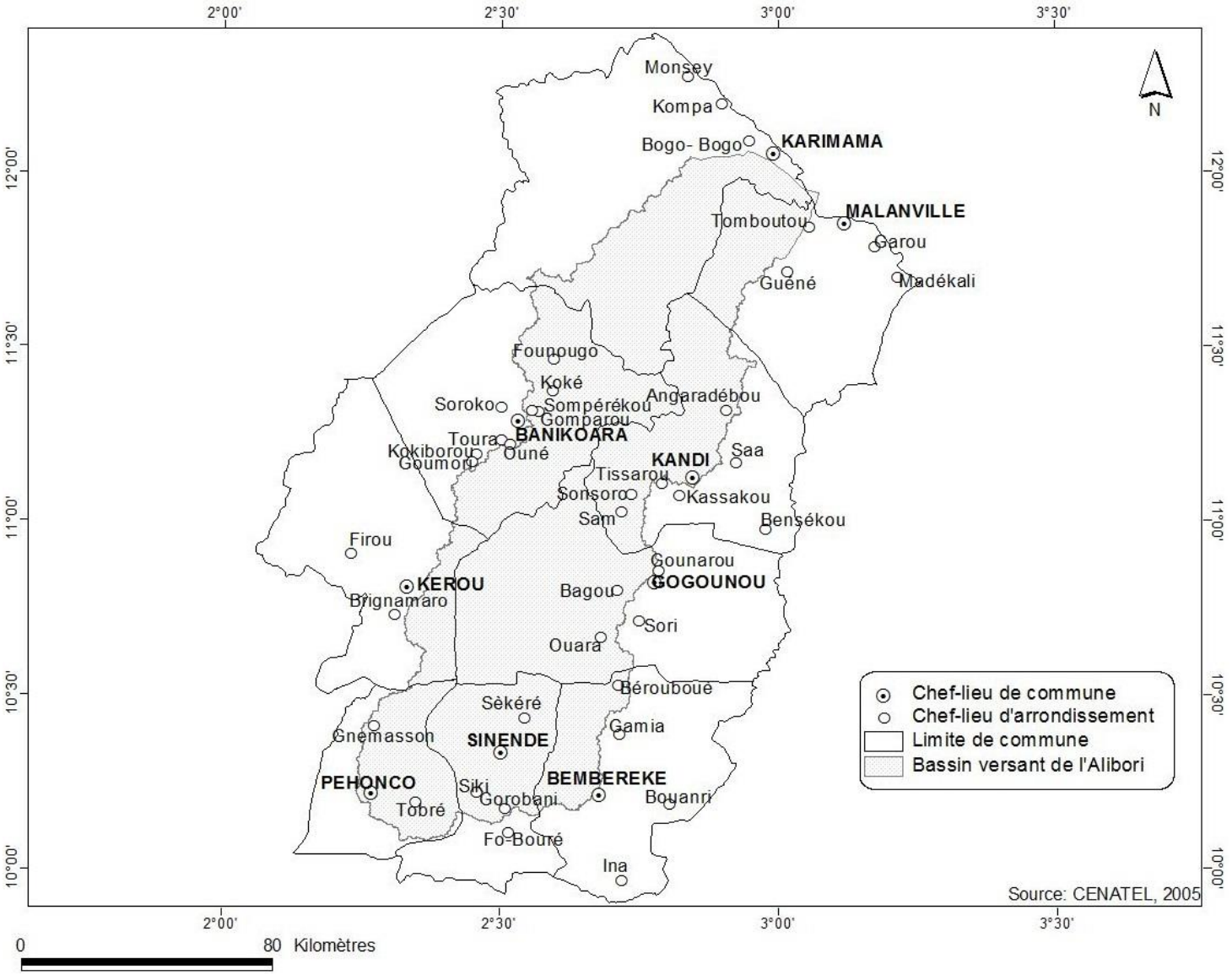


Figure 3: Situation administrative du bassin de l'Alibori

2.1. Le climat de la zone d'étude

Le climat est l'ensemble des caractéristiques de l'atmosphère et de leurs variations en un lieu donné sur une longue période (Baud et *al.*, 2008). Ces caractéristiques sont déterminés par plusieurs paramètres au nombre desquels, on peut citer les précipitations, les températures, l'humidité, les vents, l'insolation, la nébulosité, la pluviosité, etc.

Les différents processus qui affectent l'atmosphère au cours de l'année conditionnent l'ambiance climatique générale. Cette ambiance est susceptible de modifications sous l'influence des phénomènes géographiques locaux.

Trois centres d'action répartis entre les deux hémisphères régissent la circulation atmosphérique en Afrique de l'ouest (Dhonneur, 1979, Leroux, 1983, Fontaine B., 1981 et 1985, Janicot, 1990, Janicot et Fontaine, 1993 et 1990, Boko M., 1984 et 1988, Afouda, 1990, Houndénou, 1992 et 1999, etc.).

Dans l'hémisphère nord, se trouvent l'anticyclone des Açores (permanent) et l'anticyclone saisonnier du Sahara encore appelé anticyclone égypto-libyen. Dans l'hémisphère sud réside l'anticyclone de Sainte-Hélène qui est un centre d'action permanent.

Entre ces deux ensembles anticycloniques s'intercalent les basses pressions intertropicales et c'est le fonctionnement alternatif de ces centres qui module la circulation de surface en Afrique de l'ouest.

De novembre à mars, (période sèche dans la région d'étude), les anticyclones des Açores et du Sahara se soudent et se renforcent, devenant ainsi puissants. Ils donnent naissance à l'alizé de l'hémisphère boréal. Cet alizé sec et frais a un parcours continental et est chargé de poussières. La saison sèche et l'harmattan qui caractérisent l'ouest-africain et le bassin de l'Alibori durant cette période de l'année naissent de ce mécanisme.

A partir d'avril, l'anticyclone des Açores s'affaiblit tandis que celui du Sahara, du fait de l'échauffement du continent, disparaît au profit d'une dépression de surface à caractère thermique. Au même moment, l'anticyclone de Sainte-Hélène se renforce suite à l'hiver austral (qui repousse les basses pressions intertropicales vers une

position plus septentrionale). Cet alizé austral, avec un itinéraire maritime, s'enrichit d'humidité, aborde l'Afrique de l'ouest suivant la direction sud-ouest. Il prend le nom de mousson après son passage dans l'hémisphère nord.

Ces deux masses d'air, l'une sèche, l'autre humide, se rencontrent dans la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et leur plan de contact au sol est appelé front intertropical (FIT) dont la position varie au cours de l'année (figure 3).

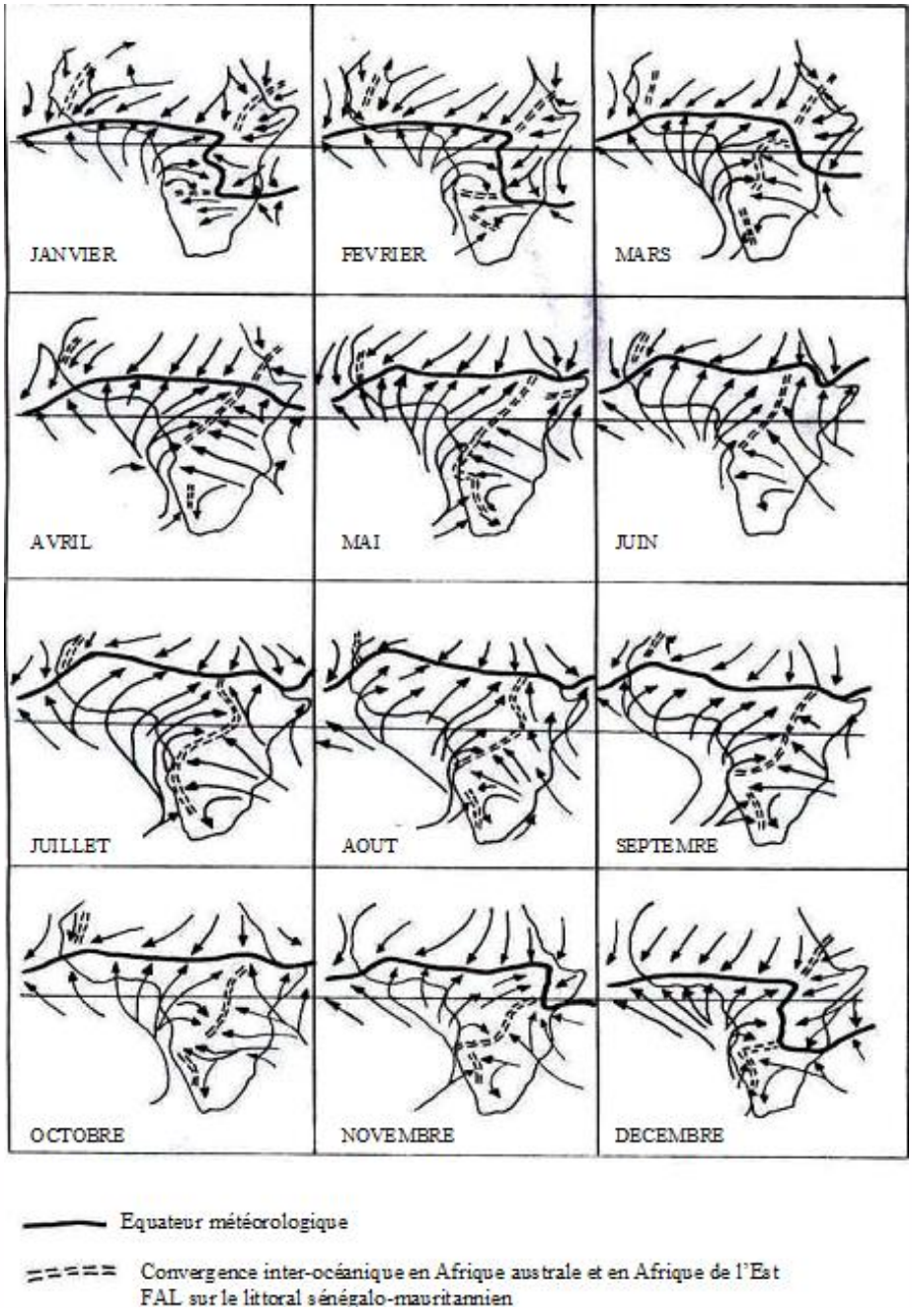


Figure 4: Mouvements du FIT en Afrique de l'Ouest

Source : Janicot, 1990

En plus de ces deux masses d'air, il existe dans les couches supérieures de la troposphère, deux jets. Il s'agit du Jet d'Est Africain (JEA) et du Jet Tropical d'Est (JTE). Même si l'origine de ces jets n'est pas encore connue avec précision, leur influence est importante sur la pluviosité au Centre du Bénin.

Selon Dhonneur (1980), le JEA naîtrait des contrastes entre la dépression continentale très marquée en surface (dépression sahélienne et relief du sud-Sahara) et une zone de hauts géopotentiels dans les couches moyennes. Les auteurs sont unanimes sur le fait que ce jet provient des contrastes zonaux et verticaux. Quant au JTE, il prendrait naissance vers le sud-est asiatique et terminerait sa trajectoire à l'ouest du 10°W au-dessus des eaux de l'océan Atlantique (Janicot, 1980, Houndénou, 1992). Le JTE atteint l'Afrique de l'ouest (entre 5 et 10°N) dans la haute troposphère en juillet-août. Ces deux courants (JEA et JTE), qui sont de trajectoire est-ouest dans les couches moyennes et supérieures de la troposphère, ont comme limite méridionale, la latitude du Centre du Bénin. Ils sont à l'origine des ''ondes d'Est'' qui prendraient naissance sur les hauts reliefs de l'Afrique orientale (Soudan et Ethiopie).

Les perturbations pluviogéniques qui surviennent au niveau de la ZCIT rythment les événements pluviométriques dans la région d'étude. Les précipitations observées sur notre domaine durant la saison pluvieuse sont de types variés. Etroitement liées à la migration saisonnière de la ZCIT, elles résultent de perturbations atmosphériques d'échelles différentes : pluies de mousson, lignes de grains ou orages isolés (Vissin, 2007)

Ce mécanisme confère au bassin de l'Alibori un climat tropical caractérisé par une saison pluvieuse et une saison sèche.

1.1.1. Le régime pluviométrique du bassin-versant de l'Alibori

La saison des pluies démarre en avril-mai et va jusqu'en octobre avec quelques variations locales (Houéto, 2008). A l'échelle du bassin, les hauteurs d'eau recueillies pendant cette période dépassent les 90% du total annuel. Sur la période 1960 – 2006, les moyennes varient entre 700 et 1200mm. Les hauteurs maximales sont enregistrées durant les mois d'août et de septembre. Trois types de pluie existent dans la zone : les lignes de grains, les pluies de mousson et les orages isolés (Vissin, 2007). Agli (1995) précise que les orages isolés constituent une particularité de la zone d'étude en ceci qu'ils sont l'expression de la convection locale favorisée par le

relief, les buttes ou les crêtes interfluves. Le même auteur ajoute que les pluies causées par les lignes de grains constituent l'apport le plus important au-delà de 10°30 de latitude Nord.

D'une manière générale, les précipitations sont irrégulières et inégalement réparties dans le temps et dans l'espace. On dénombre en moyenne 62 jours pluvieux par an (Gibigaye, 2003). La figure 5 illustre les hauteurs d'eau enregistrées pour la période 1965-2004 sur 5 stations situées à l'intérieur ou géographiquement proches du bassin de l'Alibori.

Une analyse de cette figure permet de se rendre compte que les différentes stations présentes dans le bassin appartiennent à différents secteurs climatiques. On distingue le secteur soudanien typique et le secteur soudano-sahélien.

Le secteur soudanien typique : Il s'étend du 10ème au 11ème parallèle. C'est une zone de climat tropical à deux saisons à peu près d'égale durée : une saison sèche de décembre à avril et une saison pluvieuse de mai à novembre. On note également une importance des totaux pluviométriques à l'Ouest du bassin dans la région proche de la chaîne de l'Atacora (cas de la commune de Kérou) Les pluies démarrent généralement à partir du mois de mars.

Le secteur soudano-sahélien : Il s'étend du 11ème parallèle à l'extrême Nord. C'est un secteur à deux saisons. Mais la saison sèche y est régulièrement plus longue que la saison humide (Kandi, Malanville, Banikoara, etc.).

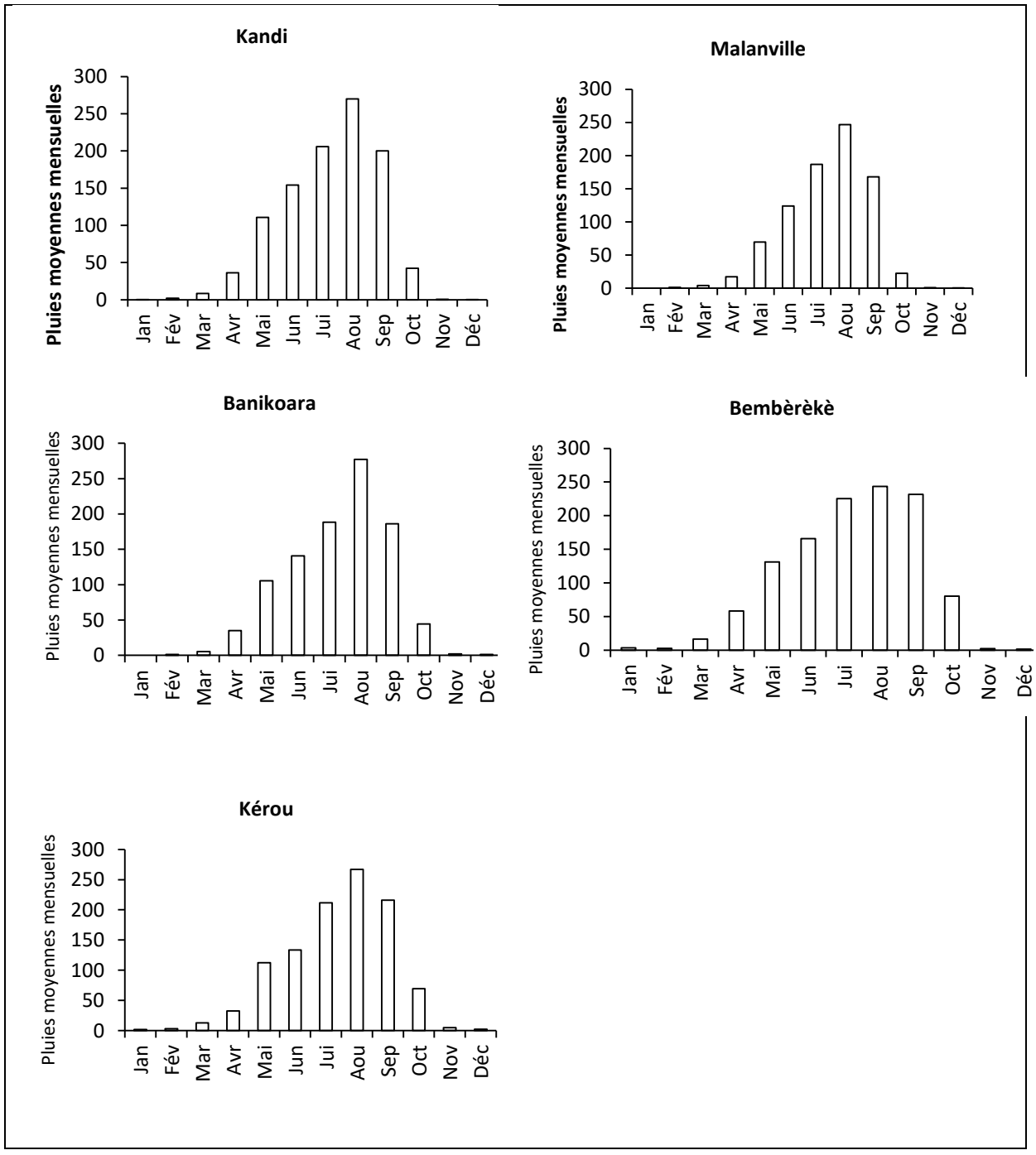


Figure 5 : Hauteurs de pluie moyennes mensuelles de 1965 à 2004

Source : Données ASECNA

La figure 6 illustre la variabilité spatiale des hauteurs de pluie dans le bassin-versant de l'Alibori. Les deux secteurs mentionnés ci-dessus y sont clairement visibles avec des hauteurs de pluie variant entre 850 et 1100mm pour la période retenue (1965-2004).

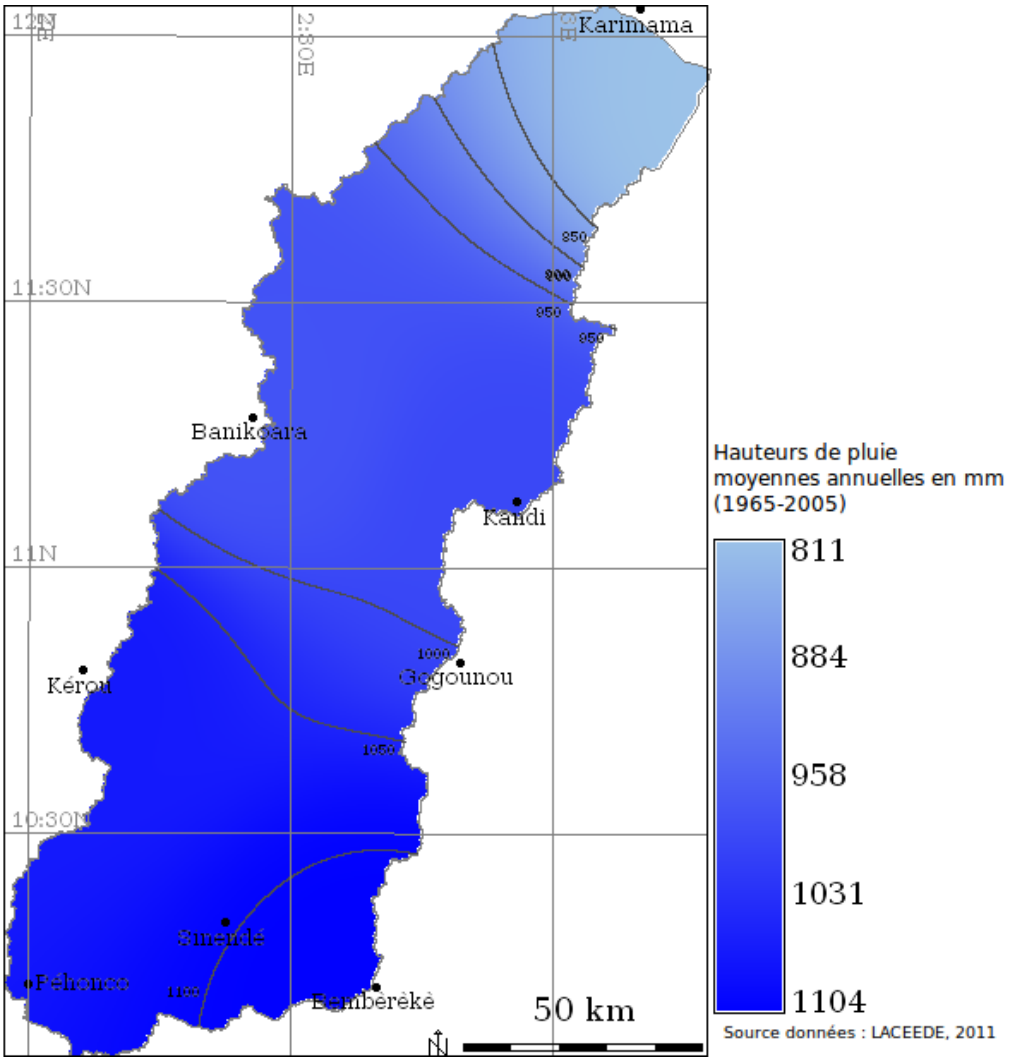


Figure 6 : Interpolation et spatialisation des hauteurs de pluie dans le bassin de l'Alibori

1.1.2. Les autres variables climatiques

1.1.2.1. La température

La température d'un milieu est essentiellement une manifestation du rayonnement et du bilan énergétique (Akindélé, 2000). Située dans le domaine tropical subsahélien, la zone d'étude se caractérise par des températures élevées. La température moyenne annuelle dans la zone d'étude est de 27,3°C à la station de Kandi située dans la partie nord du bassin. Les mois les plus froids sont ceux de décembre et de janvier tandis que les températures maximales sont relevées au cours des mois de mars et avril. On observe un gradient thermique croissant du sud vers le nord de le secteur d'étude. L'amplitude journalière peut dépasser 22°C à Kandi (Boko G., 2009)

Les amplitudes thermiques journalières de la saison sèche sont particulièrement pénibles pour les paysans et leurs activités. La figure 7 présente l'évolution mensuelle de la température à la station de Kandi sur la période 1965 -2004.

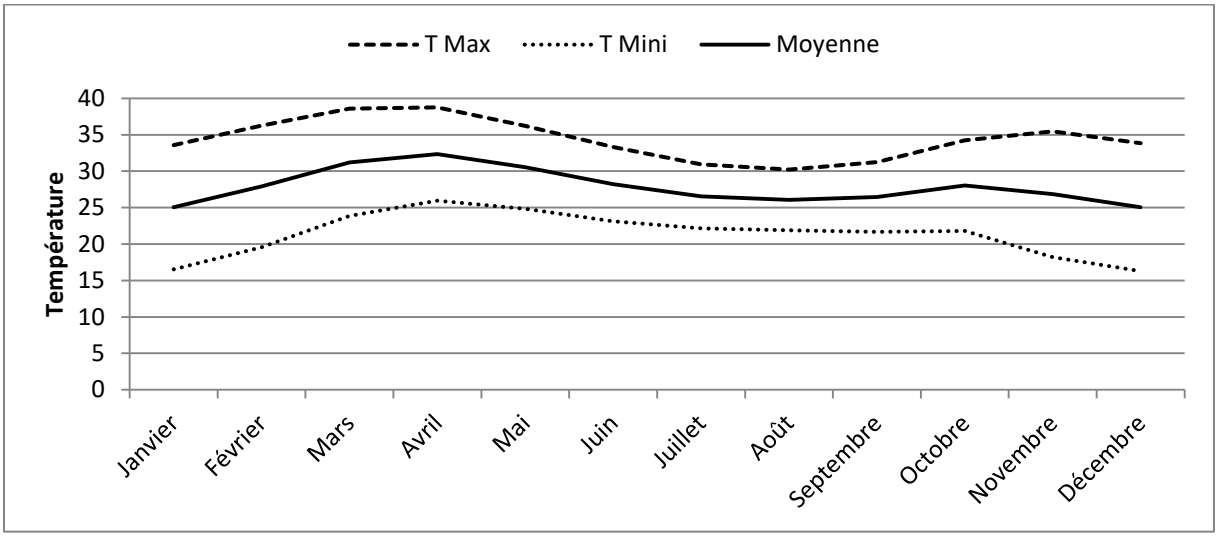


Figure 7 : Evolution mensuelle de la température à Kandi (1965 - 2004)

Source : Données ASECNA, 2008

Une lecture de cette figure permet de constater que les maxima sont observés entre mars et avril. Ces mois correspondent à la période de la grande chaleur où les activités agricoles diminuent considérablement pour se réduire essentiellement à d'autres activités. Cette période annonce l'approche du Front Intertropical (FIT). Les amplitudes thermiques élevées en période sèche (octobre à décembre) sont mises en évidence. Les températures minimales décroissent en cette période de l'année tandis que les températures maximales croissent, augmentant de ce fait l'amplitude thermique.

1.1.2.2. Les vents

La zone d'étude subit le régime de deux types de vents dominants : l'alizé maritime et l'alizé continental encore appelé harmattan. Les vents soufflent suivant une direction sud-ouest d'avril à novembre. La vitesse moyenne décroît de 3 m/s en avril à 2 m/s entre mai et octobre au cours de l'hivernage. L'alizé maritime souffle suivant une direction sud-ouest d'avril à octobre. Il s'agit de la mousson humide porteuse de pluies. L'harmattan souffle de novembre à mars. Au cours de cette période les températures relevées sont faibles et peuvent descendre jusqu'à 15°C. Il augmente le déficit de saturation de l'air et accentue davantage les conditions d'aridité de la saison

sèche (Akindele, 2000). C'est un vent froid et sec chargé d'aérosols sous forme de brouillard, du fait de son origine continentale (Gibigaye, 2003). Sa vitesse moyenne n'excède pas 2 m/s avec un maximum pouvant atteindre 12 à 14 m/s. Au cours de son déplacement, il provoque une baisse progressive de l'humidité relative et un déficit hydrique très marqué de l'ordre de 700 à 900 mm et une forte insolation de 10 à 16 heures. Pendant cette période on note une évapotranspiration pouvant atteindre 1500 mm, cause des déficits hydriques. Il est de ce fait considéré comme un facteur de dégradation écologique du fait de son pouvoir absorbant élevé. L'alizé prend ces dernières années une ampleur de plus en plus considérable dans la région à cause de l'avancée du désert (Ambassade royale des Pays-Bas, 1998).

1.1.2.3. L'évapotranspiration potentielle

L'Evapotranspiration Potentielle (ETP), en tant que phénomène climatique permet de déterminer en un lieu et pour une période donnée, un bilan théorique où les caractéristiques du sol n'interviennent pas. L'ETP de Penman utilisée dans ce document est calculée à l'échelle décadaire à partir des paramètres climatiques tels que le vent, la température, l'humidité et le rayonnement. Kandi étant la seule station synoptique du milieu, les données sur l'ETP n'existent qu'au niveau de cette station.

La figure 8 montre que la valeur maximale de l'ETP est enregistrée au cours de la troisième décade de mars. De façon générale, la période de mars-avril (qui correspond à la période dite de chaleur) est celle où les valeurs d'ETP les plus élevées sont enregistrées tandis que les minima sont enregistrés au cours de la période allant d'aout à septembre.

L'ETP moyen annuel est de 1718mm. La moyenne mensuelle annuelle est de 143mm avec de fortes variations. En mars, cette moyenne est de 180 mm alors qu'en août elle chute à 116 mm.

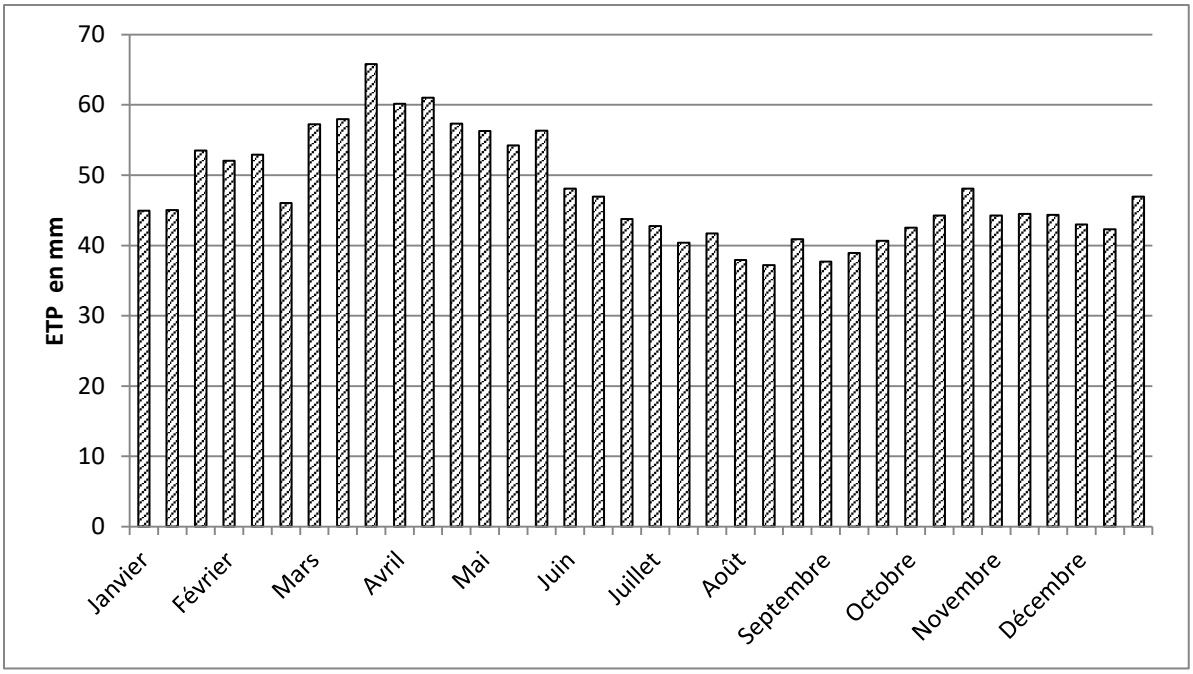


Figure 8 : Rythme moyen décadaire de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à la station de Kandi (1965-2004)

Source : Données ASECNA, 2008

1.1.2.4- Evolution des autres paramètres climatiques

Le faible maillage des stations ne permet pas d'illustrer idéalement toutes les fluctuations des paramètres climatiques de façon adéquate. Par exmple, les paramètres d'humidité relative et d'insolation ne sont disponibles qu'au niveau de la seule station de Kandi.

L'humidité relative est supérieure à 50% de mai à octobre, c'est-à-dire durant la saison humide et reste minimale en saison sèche entre janvier et février en particulier (Akindélé 2000 ; Gibigaye, 2003). Elle peut varier de 15% à 99% suivant les localités, le mois et suivant le moment de la journée. Cette variabilité est plus accentuée au mois de novembre où la chute est particulièrement prononcée à cause de l'harmattan. De décembre à mars, l'humidité relative moyenne est inférieure à 50% (Vissin, 2007).

L'insolation représente le paramètre essentiel qui intensifie le pouvoir évaporant de l'air (Sinsin, 1993). La durée annuelle de l'insolation est de 2600 heures en moyenne. A la station de Kandi, la durée moyenne de l'insolation journalière est de 8,71 h/j. La valeur maximale est enregistrée en février (9,6 h/j) tandis que la valeur minimale est relevée en août (6,5 h/j) au cours de la saison sèche (Vissin, 2007).

Les paramètres climatiques conditionnent l'hydrographie qui reste étroitement liée au relief.

1.2. Le relief et l'hydrographie

Le bassin de l'Alibori constitue une unité intégrée dans le bassin béninois du Niger. Il est constitué de deux unités topographiques : la pénéplaine cristalline et le plateau de grès de Kandi.

1.2.1. La pénéplaine granito-gneissique

Située dans la partie sud du bassin et constituée de roches cristallines, elle est caractérisée par un modelé en croupes, modestes. Sa topographie vallonnée et monotone s'incline progressivement du sud vers le nord depuis la ligne de crête où son altitude moyenne atteint 400 m jusqu'au contact du plateau de Kandi. Elle est parsemée au sud d'une multitude de collines isolées (collines de Bembéréké et de Sinendé, photo 1). La pénéplaine est raccordée au plateau de Kandi au nord et au nord-est (Boko G., 2009). Ces collines constituent le trait majeur de la topographie de la zone d'étude.



Cliché : BOKO G., 2006

Photo 1 : Vue d'une des collines de Sinendé

1.2.2. Le plateau de Kandi

Il constitue la partie septentrionale du milieu d'étude. D'une grande platitude, son altitude moyenne est de 250 mètres. Légèrement incliné vers la plaine alluviale du bassin du Niger à laquelle il se raccorde dans l'extrême nord, il est parsemé d'une

multitude de petites buttes de cuirasses ferrugineuses à très faible dénivellation (Boko G., 2009).

Ces deux unités topographiques sont parcourues par des vallées plus ou moins encaissées dans lesquelles coulent l'Alibori et son réseau d'affluents. L'altitude varie entre 137 et 544 m (figure 9).

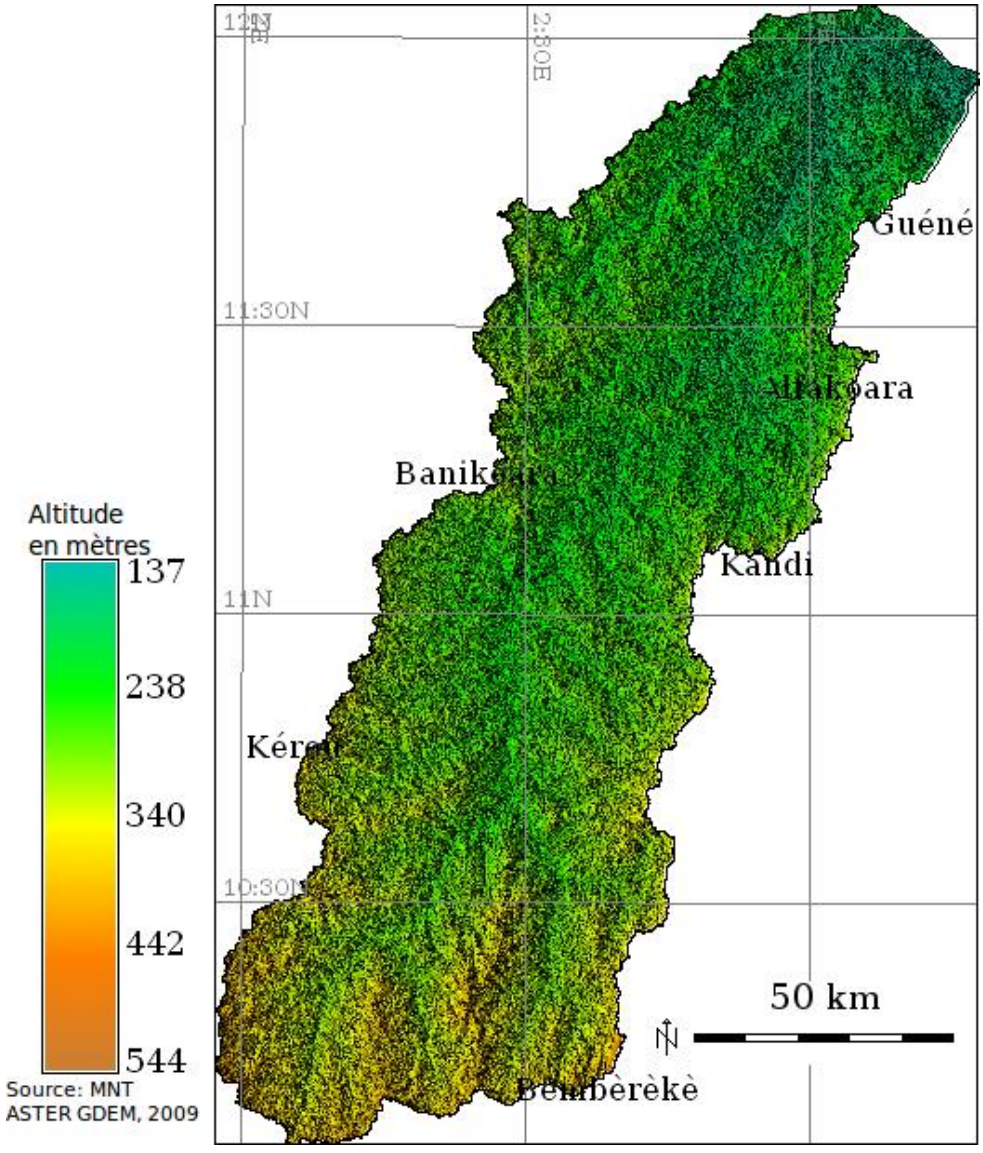


Figure 9: Hypsométrie du bassin de l'Alibori

L'Alibori, d'une longueur de 427 km, a un bassin qui s'étend sur 13 740 km². Elle naît à environ 410 m d'altitude, dans le massif granitique de Ouassa Kika sur le flanc est de la chaîne de l'Atacora, dans la commune de Péhonco au lieu-dit de *Alibori Winrou* (tête de l'Alibori en langue Baatonu). Dans son cours moyen, le lit de l'Alibori est ainsi coupé de nombreux rapides. Elle suit d'abord une direction SSW-NNE, puis

contourne le massif granitique de Sinendé pour décrire alors de nombreux coudes (Le Barbé et *al.*, 1993, Adjinacou et Onibon, 2004). Mais la pente du lit de l'Alibori est dans l'ensemble faible, de 0,5 à 0,2 m/km. L'Alibori reçoit sur sa rive droite le Souédarou, le Sarédarou et le Darou-Woka ; sur sa rive gauche, Morokou, Kparé, Kénou, Konékoga et Kpako avant de se jeter dans le Niger à Kargui (Le Barbé et *al.*, 1993 ; Bio Bigou, 1987). La plupart de ces affluents sont saisonniers (figure 10).



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 2 : Source de l'Alibori à Ouassa Kika



a ***b***

Clichés : BOKO G., 2011

Photo 3 : L'Alibori en période d'étiage au pont de Banikoara (**a**) et Tobré (**b**)

Cette photo montre le lit de l'Alibori en phase d'étiage. En ***a****, on aperçoit dans le lit des terres exondées. Sur l'image b, le niveau de l'eau en période normale est visible sur les piliers du pont.*

Le nom Alibori proviendrait de l'expression « Ya Boï » qui signifie zone giboyeuse. Pour les habitants des localités traversées par cette rivière, Alibori est une divinité pourvoyeuse de bienfaits. En effet, dans la plupart des localités qu'elle traverse, des représentations de divinités sont implantées au pied de différents arbres généralement situés sur ses berges. Ces divinités servent de protection en période de guerre ou sont sollicitées pour vaincre l'ennemi, les maladies, les malheurs, pour remporter la victoire lors d'un match de football, pour remédier aux problèmes de santé. Pour bénéficier de ses grâces, il faut lui faire des offrandes qui varient selon la requête (Danko, 2006)

L'Alibori a une histoire. A l'origine, Alibori était une jeune femme, courtisée par Mékrou et Affon (Ouémé). Elle accepte les avances d'Affon et repousse Mékrou, ce qui a pour effet de mettre ce dernier en colère. A Ouassa-Kika, on raconte qu'un berger Peuhl aurait recueilli et mélangé les eaux des deux cours d'eau. Celles du Mékrou se transformèrent en sang et celles de l'Alibori en lait. Le berger auteur du sacrilège mourut peu après. La légende ajoute qu'à l'embouchure, la Mékrou décrit une boule qui enjambe l'Alibori afin d'éviter tout contact avec elle. (Boko G., 2010, enquêtes de terrain).

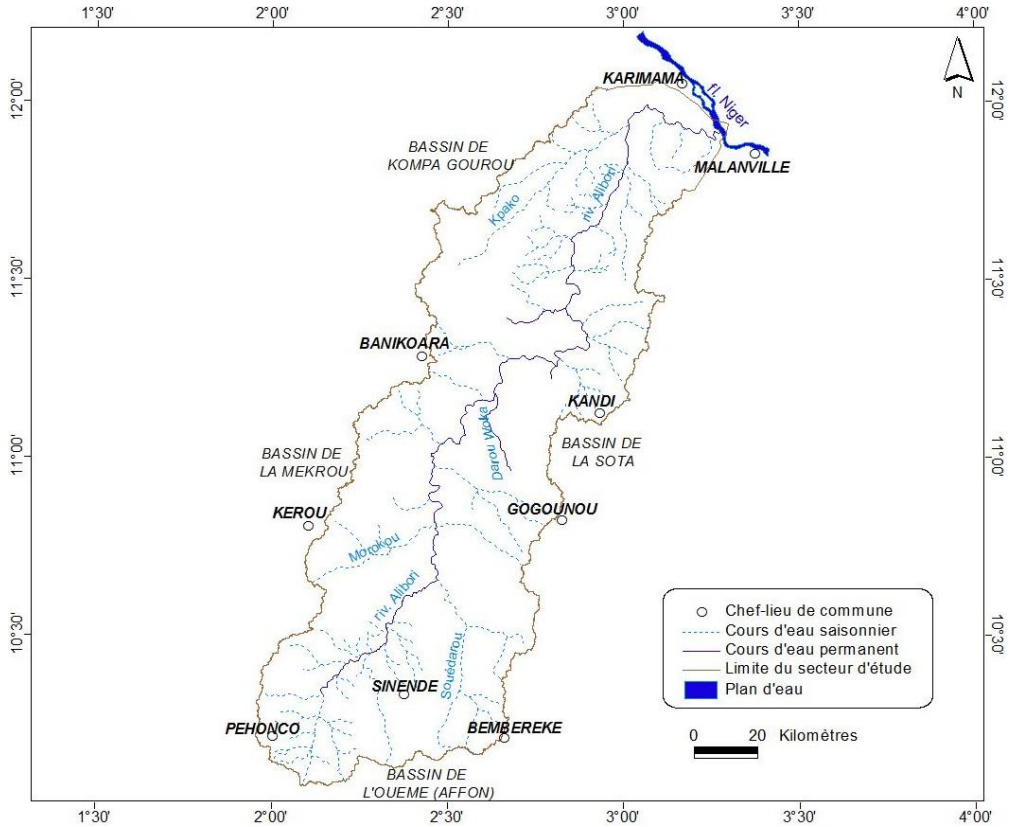


Figure 10: Hydrographie du bassin de l'Alibori

1.3. Géologie et pédologie

1.3.1. La géologie

La géologie du bassin-versant de l'Alibori est constituée par des unités appartenant au socle cristallin panafricain à l'intérieur desquelles sont partiellement conservées des séries volcano-détritiques peu ou non métamorphiques et des écailles de la couverture sédimentaire paléozoïque. Les travaux de Lessard (1964), Dubreucq (1978), Alidou (1983), Le Barbé et *al.* (1993) et les recherches effectuées par l'Office Béninois des Mines (1989 et 1995) permettent d'identifier dans le secteur d'étude les formations suivantes : le socle ancien, le Continental Terminal, les alluvions récents et d'autres unités datant du Cambrien et du Crétacé.

- ✓ **Le socle ancien**

Il désigne l'ensemble des formations très métamorphisées du Dahomeyen, de l'Atacorien et de la série de Kandé-Boukombé. C'est une formation constituée de divers groupes pétrographiques tous très métamorphiques comprenant essentiellement des migmatites et des gneiss. Ces principaux groupes sont le groupe de Pira, le groupe de Kouandé, le groupe de Kandi, le groupe de Djougou, le groupe de Sonsoro et le groupe de Dérouvarou.

- ✓ **Les formations du Cambrien**

Elles regroupent les formations datant du Protérozoïque supérieur et de celles du Protérozoïque indifférencié. Les premières comptent essentiellement les roches d'origine éruptive. Au sein de ces formations, on distingue le complexe volcano-sédimentaire de l'Alibori situé sur le socle cristallin et le complexe volcano-sédimentaire de la Kpako. Trois formations datant du Protérozoïque indifférencié ont été identifiées dans le secteur d'étude. Il s'agit du complexe mylonitique de l'Alibori, le complexe amphibolitique de Founougo et du complexe migmatitique de Kandi.

- ✓ **Le Crétacé supérieur**

Il s'agit des grès de Kandi qui constituent le plateau situé au Nord-Est du Bénin. A la base de cette série, se trouve un conglomérat de galets de quartz à ciment siliceux; on trouve ensuite une série de grès variés à stratifications entrecroisées attestant de

l'origine continentale de la formation. On les rencontre à la limite orientale de la zone d'étude.

- ✓ **Le Continental Terminal**

Ce sont des dépôts datant du Pliocène ou de l'Eocène qui sont localisés essentiellement le long du lit du Niger.

- ✓ **Les alluvions récents**

Ils occupent le lit des grands fleuves. Ceux trouvés dans le Niger sont surtout sableux tandis que ceux observés le long de l'Alibori sont des dépôts plus grossiers, sablo-conglomératiques.

La situation géologique du bassin le rend relativement imperméable. La perméabilité (k) est en effet très faible, de l'ordre de $k = 8.10^{-6}$ m/s (Azontondé, 1991).

La figure 11 présente une synthèse des différentes formations géologiques dans le bassin de l'Alibori.

1.3.2. Les sols

Les sols du bassin de l'Alibori proviennent des processus de ferruginisation et de ferralitisation. A ces deux processus qui ont lieu au début de la pédogénèse s'ajoutent des phénomènes post-formation tels que le lessivage, l'érosion et l'induration (Vissin, 2007). Deux grands types de sols résultent de ces processus : les sols peu évolués et les sols ferrugineux. On peut y ajouter les sols hydromorphes et les sols minéraux qui sont aussi présent mais dans une dimension moindre.

Cinq catégories de sol sont rencontrées dans le bassin. On distingue les sols ferrugineux, les sols minéraux bruts et lithosols, les sols peu évolués d'origine non climatique, les sols brunifiés eutrophes et vertisols et enfin les sols hydromorphes.

- ✓ ***Les sols ferrugineux***

On en rencontre de divers types dans la zone d'étude. Ils s'étendent sur les versants des rivières ou sur les zones hautes entre les collines de quartzite. Ils sont peu profonds et concrétionnés. Leur aptitude agronomique se limite aux cultures

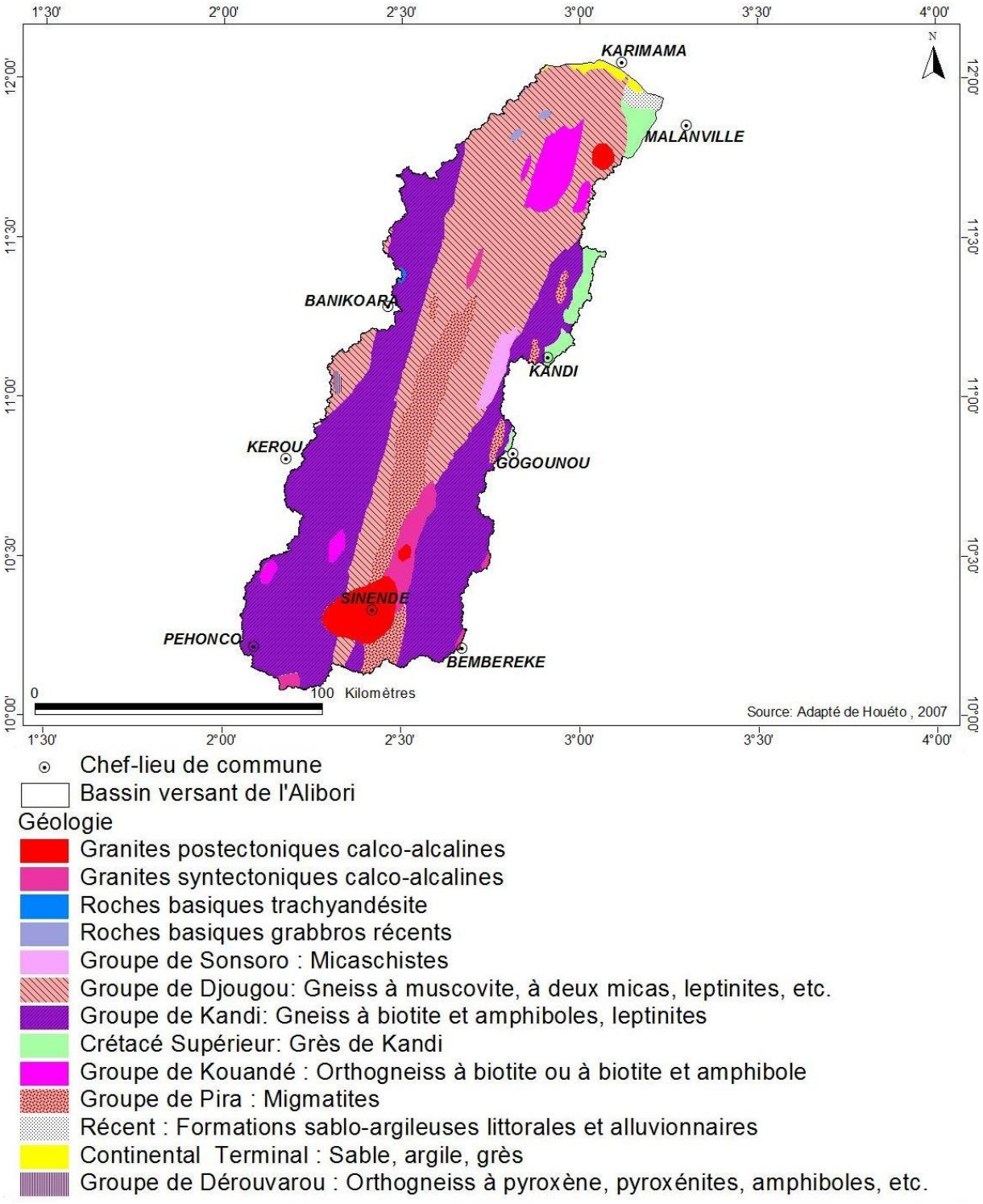


Figure 11 : Géologie du bassin-versant de l'Alibori

annuelles. Mais certains – comme ceux peu lessivés sur matériau kaolinique – sont aptes à toutes les cultures (Gibigaye, 2003). On trouve aussi les sols ferrugineux tropicaux, localisés sur le socle. Ils sont marqués par un lessivage intense et une forte altération. Ce sont des sols peu profonds, souvent concrétionnés, avec des horizons bien différenciés et une couche humifère peu épaisse. Leur faible épaisseur, sur un substratum magmatique et cristallophyllien, induit l'absence de nappe phréatique. Toutefois, des poches d'eau exploitables se situent sur les zones de broyage le long des fissures et des fractures de la roche-mère (Vissin, 2007). Suivant leur capacité de drainage, on peut les classer en trois catégories :

- les sols ferrugineux tropicaux lessivés, biens drainés sur granites leucocrates,
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés, à engorgement de profondeur,
- les sols ferrugineux tropicaux non lessivés.

✓ ***Les sols minéraux bruts et lithosols***

On les rencontressentiellement sur les roches affleurantes et les cuirasses.

✓ ***Les sols peu évolués d'origine non climatique*** d'apport alluvial et hydromorphes

Ils sont rencontrés le long des cours d'eau et dans des zones basses de la pénéplaine sur matériau limono argileux. Ce sont des sols très fertiles.

✓ ***Les sols brunifiés eutrophes et les vertisols***

Encore appelées terres noires de la vallée de l'Alibori sont des sols à argiles gonflantes et dont le profil présente une structure particulière. Ils sont favorables à l'agriculture.

✓ ***Les sols hydromorphes***

Ce sont sols à pseudogley (rencontrés dans les vallées et les bas-fonds), le plus souvent de texture sableuse à sable grossier, sont des sols grumeleux ou grumelo-polyédriques en surface. Ce sont en général des sols profonds (> 1 m) Les sols hydromorphes sont alluviaux et riches, favorables à la culture du riz. Leur évolution dépend de l'eau pluviale et de la remontée de la nappe phréatique (Le Barbé et *al.*, 1993). Selon les sites, la réserve hydrique est de l'ordre de 75 ou 100 mm à un mètre de profondeur. La figure 12 présente les différents sols du bassin-versant de l'Alibori.

Les variations en aptitude agronomique de ces sols sont bien perçues par les paysans qui arrivent à les distinguer suivant leurs propres critères au nombre desquels l'abondance de la végétation et la couleur du sol.

Les principaux indicateurs de l'abondance de végétation sont un sol couvert de hautes herbes et de gros arbres en peuplement important est un bon sol. L'espèce utilisée comme indicateur est *Isoberlinia doka*. En effet un sol marqué par la présence de cette dernière espèce est supposé être un bon sol.

Quant à la couleur, un sol fertile doit être noir jusqu'à une certaine profondeur. Ce sol noir doit être mou et profond.

Toutes ces unités pédologiques sont fragiles et vulnérables à l'érosion. L'effet mécanique de l'érosion est d'autant plus important que la surface est dépourvue d'obstacle au ruissellement. Leur mise en valeur par des matériels mécanisés modernes qui nécessitent des sols profonds peut accélérer le processus de destruction de cette couche superficielle indispensable aux plantes et à la vie en général (Gibigaye, 2003).



Clichés : BOKO G., 2006

Photo 4 : Aperçus du sol à Kandi

1.4. La végétation du bassin-versant de l'Alibori

La zone d'étude est couverte par un ensemble de formations écofloristiques variant des forêts claires aux savanes rayées de galeries forestières avec par endroits des plages complètement dénudées de toute végétation (bowé). Des formations anthropogènes que sont les champs et les jachères ont été aussi observées parfois au cœur-même des forêts classées quoique largement prépondérantes dans les espaces

agricoles limitrophes non protégés par les textes forestiers. Les principales formations végétales rencontrées sont les forêts claires et savanes boisées, les galeries forestières, les savanes arborées arbustives, les savanes à emprise agricole et autres formations fortement anthropisées, ainsi que des prairies et des fourrés (Baglo, 1992 ; Ambassade royale des Pays-Bas, 1998a et 1998b).

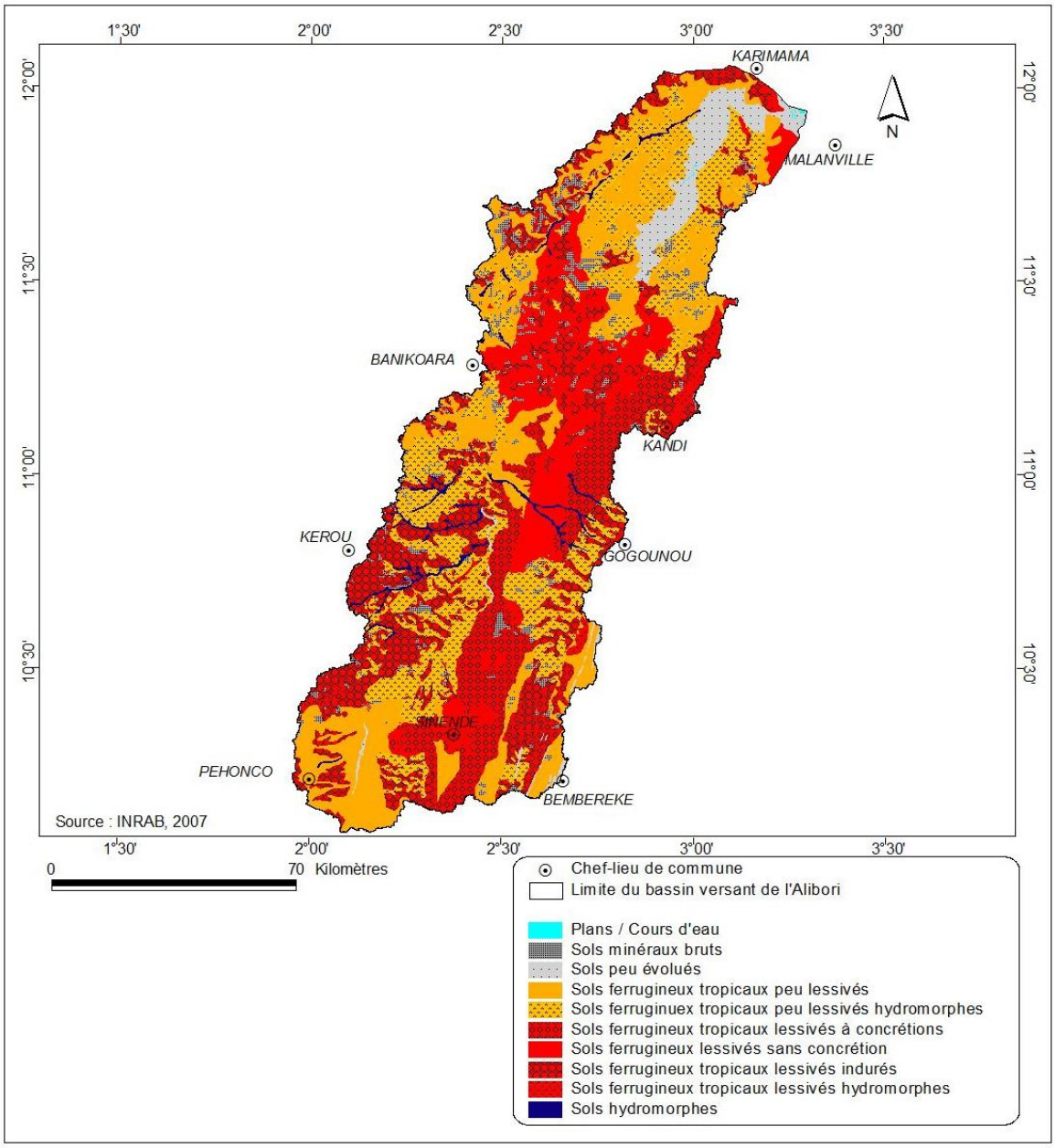


Figure 12 : Les sols présents dans le bassin-versant de l'Alibori

- ✓ **Les forêts claires et les savanes boisées**

Les forêts claires sont dominées par *Isoberlinia tomentosa* dans la majorité des cas. Les espèces compagnes sont *Bombax costatum*, *Pterocarpus erinaceus*, *Afzelia*

africana. Leur recouvrement dépasse rarement 75% ce qui favorise un éclairement diffus et la présence d'une strate graminéenne clairsemée. Les faciès les plus denses (recouvrement supérieur à 80%) de cette formation sont rencontrés dans la forêt classée de Ouénou Bénou où l'irradiation de certaines essences guinéennes (*Milicia excelsa*, *Miletia thonningii*, *Malacantha alnifolia*, etc.) lui donne l'aspect de forêt dense semi-décidue. Les forêts claires sont parcourues par des feux peu violents et dans les faciès très denses, les feux passent une saison sèche sur deux lorsque la quantité de litière le permet. Elles se maintiennent sur des sols profonds du crétacé et sur tous les sols profonds bien drainés à forte capacité de rétention d'eau

La strate ligneuse des savanes boisées est souvent composée d'un cortège floristique plus diversifié dominé par *Daniellia oliveri*, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Afzelia africana*. Les savanes boisées sont rencontrées un peu partout dans les forêts classées. La strate herbacée est dominée par de hautes graminées qui brûlent à chaque saison sèche.

- ✓ **Les savanes arborées et arbustives sur sols sableux.**

Ce sont des formations très ouvertes qui représentent la formation la plus abondante dans les forêts classées. Les espèces dominantes sont *Vitellaria paradoxa*, *Terminalia avicennioides*, *Combretum spp*, *Lannea acida*, *Hymenocardia acida*, *Pericopsis laxiflora*, *Acacia gourmaensis*, etc. Quelques grands arbres tels que *Bombax costatum* et *Pterocapus erinaceus* y sont représentés par pieds isolés. La strate herbacée est dominée par des graminées vivaces rases telles *Loxodera ledermannii* et *Andropogon schirensis*. Les feux de brousse y sont violents lorsqu'ils sont allumés tardivement dans la saison sèche. Elles sont de loin les plus répandues dans le bassin.



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 5 : Savane arbustive à Tobré

- ✓ **Les savanes arborées et arbustives sur sols gravillonnaires**

Ces formations sont assez typiques par les propriétés physiques des sols montrant une forte charge de gravillons ferrugineux. Les espèces dominantes sont: *Detarium microcarpum*, *Burkea africana, Parinari curatellaefolia, Gardenia erubescens*, *Pteleopsis suberosa, Combretum spp*, *Terminalia avicennioides*. La strate herbacée est souvent discontinue et dominée par *Loudetia flavida* et *Schizachyrium sanguineum*. Les feux de brousse y sont tout aussi violents que dans les formations précédentes.

- ✓ **Les savanes saxicoles**

Ce sont des savanes des hauteurs. Elles sont rencontrées sur les collines, les buttes et autre relief résiduel. Elles sont généralement arborées ou arbustives. Les espèces caractéristiques rencontrées sont les mêmes que celles des savanes arborées et arbustives.

- ✓ **Les galeries forestières**

Les galeries forestières sont les éléments linéaires des formations végétales qui s'étendent de part et d'autre des cours d'eau sur des largeurs variables. Il en existe encore un nombre relativement important le long de l'Alibori, et de tous ses affluents bordés par une terrasse alluviale de texture limoneuse. Elles se caractérisent par un couvert végétal dense composé d'arbres, d'arbustes et de lianes Les espèces

dominantes sont *Khaya senegalensis*, *Berlinia grandiflora*, *Diospyros mespiliformis* *Vitex doniana*, *Daniellia oliveri*, *Ficus spp*, etc. D'autres espèces ripicoles telles que *Pterocarpus santalinoides* et *Cola laurifolia* peuvent constituer en certains endroits l'essentiel du faciès. Les suffrutex dominent le sous-bois. Les feux passent facilement dans les faciès dégradés envahis de graminées.



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 6 : Galerie forestière le long de l'Alibori dans la commune de Karimama

- ✓ **La savane à emprise agricole**

Il s'agit d'une mosaïque de savanes arborées et arbustives et des fronts de cultures. Ce sont des zones nouvellement rattrapées par l'agriculture. C'est un mélange de champs, de savanes et de champs sous savanes. L'ampleur de la dégradation y est d'une faiblesse relative. Elles sont composées en plus des diverses cultures saisonnières, de *Guiera senegalensis*, *Piliostigma recticulatum*, *Parkia biglobosa*, *Adansonia digitata* et *Sclerocarya birrea*.



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 7 : Savane à emprise agricole observée à Banikoara

- ✓ **Les jachères arbustives**

Ce sont des formations post-culturales que l'on observe à l'abandon des champs après quelques années d'occupation des terres pour l'agriculture. Dans certains cas la strate arborescente est importante mais la fréquence nettement plus élevée des espèces telles que le karité (*Vitellaria paradoxa*) ou le néré (*Parkia biglobosa*) épargnées lors des défrichements, donnent à ces formations la marque de la forte emprise agricole qui y avait cours. La strate herbacée est souvent dominée par des espèces annuelles aussi, tout passage de feu même précoce après l'hivernage laisse le sol nu sans possibilité de repousse immédiate.

- ✓ **Les prairies humides**

La prairie humide est une savane inondable située en zone saisonnièrement engorgée d'eau. Elle se rencontre en îlot à proximité des cours d'eau. Les espèces caractéristiques sont : *Mytragina inermis*, *Artocarpus incisa*, *Cleistofolus patens*.

- ✓ **Les fourrés**

Ce sont des savanes constituées des petits arbres de taille inférieure à deux mètres et de la broussaille. La pénétration est difficile à cause de la densité des arbrisseaux souvent épineux. Dans la zone, les fourrés sont d'étendue réduite. Ils sont souvent dominés par *Mimosa pigra*.



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 8: Jachère à Yambérou (Banikoara)

- ✓ **Les plages dénudées**

Il existe par endroits des surfaces sans aucune végétation arborescente ou alors qui portent quelques pieds nains de *Combretum spp* ou de *Terminalia spp*. Ce sont généralement des dalles ferrugineuses affleurant ou recouvertes d'une mince couche de sol. Les graminées caractéristiques de ces sols fortement indurés sont *Aristida kerstingii* et *Loudetia togoensis*, toutes des espèces annuelles. Les feux de saison sèche y détruisent entièrement les touffes de pailles asséchées.

La zone d'étude abrite un nombre non-négligeable de domaines classés. Ces domaines peuvent être regroupés en deux catégories :

- Le complexe nord : il comprend les forêts classées situées au nord du bassin de l'Alibori. Il s'agit du parc national du W du Niger, la zone cynégétique de la Djona, et la rôneraie de Goroubi. Il s'agit d'un ensemble plutôt bien conservé, grâce à la présence du Parc W, ce dernier bénéficiant de l'appui du programme ECOPAS (Ecosystèmes Protégés d'Afrique Soudano-sahélienne). La plupart des formations végétales denses (forêts claires, savanes arborées et galeries forestières) y sont localisées. La rôneraie de Goroubi n'est encore classée que de nom. Elle est le domaine des maraîchers de Kargui (commune de

Karimama) qui profitent de sa proximité avec le lit de l'Alibori pour y mener leurs activités.



Cliché : BOKO G., 2010

Photo 9 : Plage dénudée à Fétékou (Kérou)

- Le complexe sud : seules deux domaines classés s'y retrouvent. Il s'agit des forêts classées de l'Alibori supérieur et de Ouénou Bénou. Il faut d'ailleurs préciser qu'en dehors de la rôneraie de Goroubi, la forêt classée de l'Alibori Supérieur est la seule entité entièrement située dans le bassin de l'Alibori. Le complexe sud est surtout caractérisé par une dégradation très poussée marquée par une anthropisation avancée. Des mosaïques de cultures et de jachères y sont remarquables ainsi que des sites d'exploitation de bois. Seuls les noyaux centraux de ces domaines subsistent encore et peuvent répondre à l'appellation de "forêt".

La figure 13 illustre les différents domaines classés situés dans le bassin-versant de l'Alibori. On peut y constater que près de 50% de la superficie du bassin est occupée par des domaines classés. La surface cultivable disponible y est donc limitée. On s'attend à ce que l'occupation du sol soit fonction de ces contraintes que constituent les aires classées.

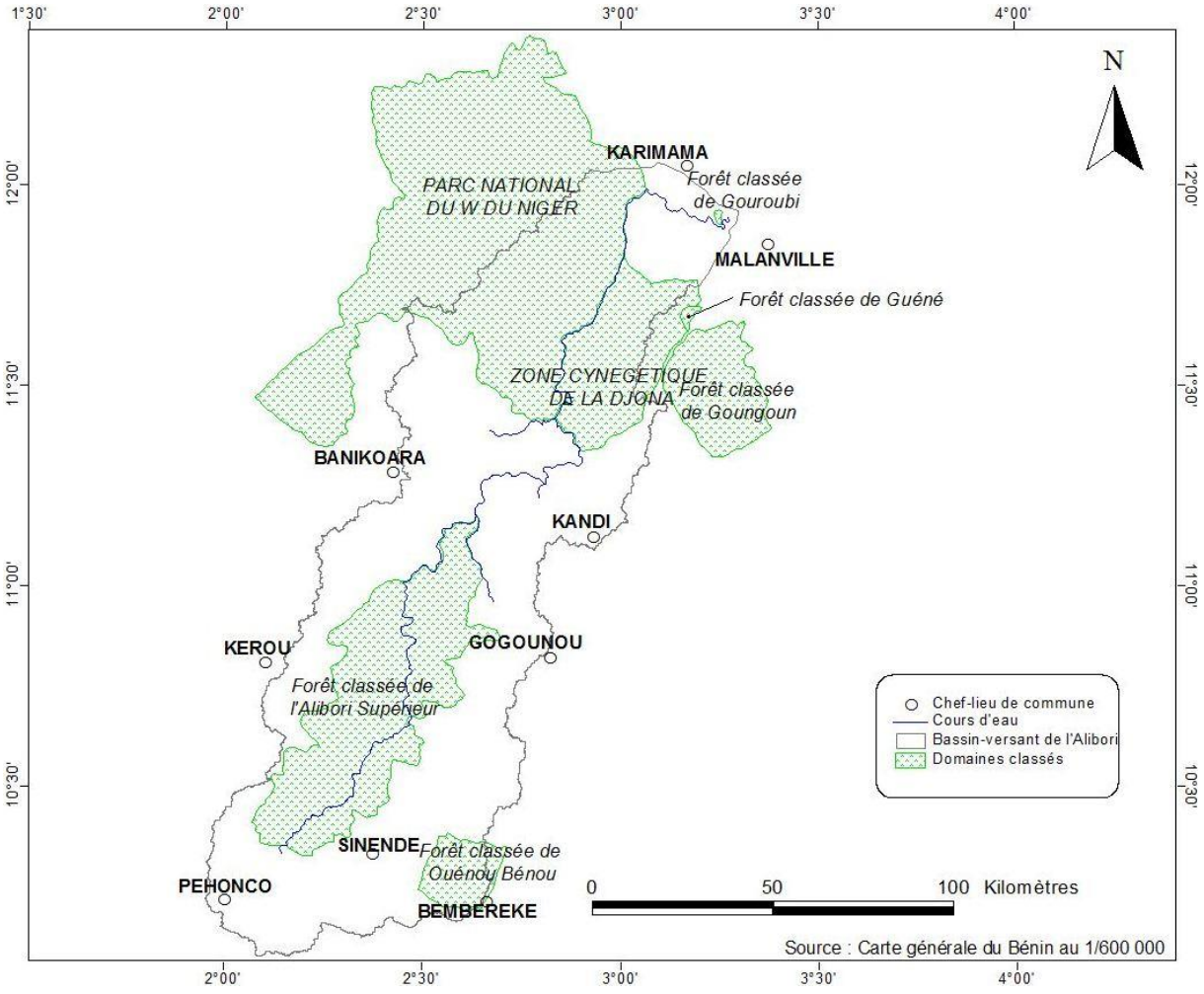


Figure 13 : Les aires protégées dans le bassin de l'Alibori

1.5. La faune

Le couvert végétal représente le milieu-cadre dans lequel vit la faune sauvage et le milieu-ressource dont il dépend. La destruction du couvert végétal provoque la disparition des espèces animales. D'une manière générale, la faune sauvage utilise diversement les différents types de formations végétales et seules quelques rares espèces sont inféodées à certains groupements végétaux tels le guib harnaché ou le vervet qui vivent dans les galeries forestières.

Les grands ongulés herbivores ou de taille moyenne que l'on peut rencontrer dans les forêts classées de l'Alibori Supérieur sont: le buffle de savane (*Syncerus caffer*), l' Hippotragus (*Hippotragus equinus*), le bubale (*Alcelaphus buselaphus*), le cobe Defassa (*Kobus defassa*), le cobe de roseaux (*Redunca redunca*), le cobe de Buffon

(*Kobus kob*) et le guib harnaché (*Tragelaphus scriptus*). Les suidés sont représentés par l'espèce des savanes sèches, le phacochère (*Phachoerus aethiopicus*). La présence d'oryctérope (*Orycteropus afer*) a été révélée par l'observation des terriers et confirmée par les chasseurs. La plupart des primates de savane que sont le babouin (*Papio anubis*), le patas (*Erythrocebus patas*), le vervet (*Cercopithecus aethiops*) sont bien représentés dans toutes ces forêts. Le cercopithèque mone (*Cercopithecus mona*) semble encore exister dans la forêt classée de l'Alibori Supérieur. Les grands carnivores tels que le lion (*Panthera Leo*), la panthère (*Panthera pardus*), l'hyène (*Crocuta crocuta*) ont disparu de ces forêts classées (Ambassade royale des Pays-Bas, 1998a, 1998b).

Parmi les grands reptiles qui sont encore présents dans ces forêts classées on peut citer le crocodile du Nil (*Crocodylus niloticus*) très répandu dans les retenues d'hydraulique pastorale notamment à l'est de la forêt classée de l'Alibori Supérieur (à Fètècou, Kérou, Péhunco), le varan d'eau (*Varanus niloticus*) et le python de seba (*Python sebae*) (Houéto, 2007). Des formes endogènes de protection et de sauvegarde de certains grands reptiles comme le crocodile existent dans la zone d'étude. En effet dans les villages de Kika et Yarra par exemple, les crocodiles sont sacrés. Des retenues d'eau leur sont consacrées. Leur prédation est interdite (Boko G., travaux de terrain, 2010.

Au nombre des grands rongeurs on peut citer le porc-épic (*Hytrix cristata*) et l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*). Pour la plupart des grandes espèces de mammifère, leur abondance est très faible et en certains endroits d'une même forêt classée, elles semblent y avoir disparu; tel serait le cas dans la partie sud de la forêt classée de l'Alibori et dans toute la forêt classée de Ouénou Bénou.

Le manque de recherche spécifique sur la faune aviaire du milieu explique la faible connaissance de sa richesse en espèces. Mais de manière générale les grandes espèces restent peu représentées. Celles dont l'existence est connue avec certitude sont le grand calao d'Abyssinie (*Bucorvus abyssinicus*), le héron cendré (*Ardea cinerea*) et les grands rapaces tels que le milan noir (*Milvus migrans*), l'épervier shikra (*Accipiter badius*), le grand-duc africain (*Bubo africanus*), etc. Les grands oiseaux des zones humides sont peu représentés à l'exception du héron cendré.

L'agriculture extensive qui est exclusivement pratiquée dans la zone d'étude est la cause principale de destruction des habitats de la faune et à ce titre, elle risque de compromettre toute possibilité de repeuplement par les espèces animales.

De toutes les catégories de menaces qui pèsent sur la faune sauvage, le braconnage est l'activité qui menace directement la survie de la faune sauvage dans les forêts classées.

Les statistiques sur le braconnage font défaut, mais le phénomène est suffisamment important, tant par le nombre de pratiquants que par ses conséquences sur l'existence même de la faune sauvage, pour que l'absence d'un étalon occulte la réalité. Toutes les populations vivant autour de ces forêts classées consomment la viande de chasse et les circuits d'écoulement quoique tenus secrets sont très animés par tous les intervenants dans cette filière.

Les signes de l'incidence du braconnage sur la faune sauvage des forêts classées sont la baisse drastique des espèces animales en ces lieux, la disparition des grandes espèces animales et la disparition des grands carnivores (lion, panthère, hyène) dans la plupart de ces forêts classées. Les populations riveraines sont elles-mêmes conscientes de cette situation lorsqu'elles font une comparaison diachronique de l'évolution du potentiel faunique dans leurs terroirs (Ambassade des Pays-Bas, 1998a).

Le milieu biophysique tel que décrit abrite diverses populations qui y mènent des activités variées.

2. Présentation du cadre humain

Le principal élément à la base de l'occupation du sol étant l'homme, une connaissance des différents groupes socioculturels présents dans la zone d'étude, leur histoire, leur répartition et leurs activités économiques s'avère nécessaire.

2.1. Contexte historique et peuplement

Les premières traces de peuplement de la zone d'étude remontent au Paléolithique. Les travaux de Davies (1956) ont permis de mettre à jour sur un site à la hauteur de l'ancien pont sur l'Alibori (entre Kandi et Banikoara), différents outils. Ces derniers

prouvent que les rives de l'Alibori ont été parcourues depuis l'Antiquité et elles ont vu par la suite se fixer des populations d'agriculteurs qui laisseront une industrie néolithique et des scories de fer. Deux sites – plus en aval du premier mentionné ci-dessus – présentant des scories de fer, des quartz microlithiques, des tessons de poterie et des boules de pierre témoignent de cette industrie néolithique. Dunglas (1952) ajoute que des populations antérieures aux Baatombu connaissaient la technique du fer.

Le bassin-versant de l'Alibori étant une entité physique naturelle, il ne tient compte d'aucun découpage humain, présent ou passé. De ce fait, les populations qui y vivent ont des origines diverses et ont connu différentes histoires. Essentiellement trois groupes socioculturels ont marqué la zone d'étude de façon historique : les Baatombu, les Dendi et les Peuhl.

2.1.2. Les Baatombu

Les sources écrites et orales révèlent qu'ils sont venus du Nigeria (Boussa) et se sont établis à Nikki vers XVe siècle où ils fondèrent le puissant royaume Baatonu après avoir chassé les autochtones supposés être les Waaba. D'autres sources leur attribuent une origine du Tchad, de l'Ethiopie, ou encore d'Egypte (Vissin, 2007). Ils descendraient d'un ancêtre appelé Kisra venu de l'est. Feuille (1919) cité par Cornevin (1981) rapporte qu'ils se seraient installés dans l'actuel nord du Bénin en trois vagues : depuis Nikki par Bori où ils ont repoussé les Yoruba et les Peuhl, pacifiquement depuis Kouandé vers Birni et depuis Wari-Maro vers Soubroukou par Penessoulou. Ce sont des conquérants cavaliers qui fondent plusieurs royaumes encadrés par une aristocratie de princes venus de l'extérieur. Ceux de Parakou viennent de Savè tandis que ceux de Nikki et de Kandi de Boussa. Le plus ancien, le royaume de Nikki, serait fondé en 1480 par Orou Massa qui prendra le nom de Sounon Séro. Les traces de ces différents royaumes subsistent encore dans toute la zone d'étude à travers de petites chefferies locales. Les Baatombu constituent aujourd'hui le groupe socioculturel plus important de la région nord du Bénin (Gibigaye, 2003).

Marty (1926) précise que *Bariba* est un terme impropre consacré par l'usage qui signifie « *infidèle* » en langue haoussa. La terminologie correcte est *Baatonu* ou *Baatombu* (forme plurielle) qui signifierait *l'homme* ou *les hommes*. Inversement, les

Baatombu ont influé pendant longtemps sur l'ethnonymie de la région du fait de l'aspect expansionniste de leurs différents royaumes. Ainsi, *Somba* (longtemps utilisé pour désigner les Betammaribè) signifie les hommes de la forêt, *Berba* les hommes de la brousse, *Yoaba*, les habitants du pays où l'on capture les esclaves et *Natimba* habitants du pays où l'on fabrique le fer.

2.1.3. Les Dendi

Ils constituent des groupes dispersés dans le nord-Bénin. Leur migration par la vallée du Niger s'est échelonnée sur plusieurs siècles. Leurs centres principaux sont dans le centre urbain de Djougou, les quartiers de Ouangara et Kilir. L'habitat principal des Dendi se trouve sur les bords du Niger dans la région d de la région de Kompa et jusqu'à Saa. Ils disent venir de la région de Gao, de Tira sur la rive gauche du Niger. Par Kompa, ils essaiment à Karimama et occupent les rives du Niger de Guéné jusqu'à Madécali. Avant la pénétration européenne ils vivaient en état de vassalisation vis-à-vis des seigneurs Baatombu (Cornevin, 1981). Essentiellement commerçants, ils se sont rapidement disséminés dans le reste de la région. Longtemps considérée comme une classe bourgeoise et lettrée, leur langue s'est imposée comme la langue véhiculaire dans les quatre départements du nord du Bénin.

On les retrouve aujourd'hui dans tout le nord-Bénin mais ils dominent surtout à Karimama, Malanville et Kandi pour ce qui concerne le bassin de l'Alibori.
Entre 1894 et 1898 ils eurent beaucoup à souffrir des expéditions guerrières d'Ahmadou – fils d'El Hadj Omar – et d'Ali Bori.

2.1.4. Les Peuhl

Il faut d'office préciser que malgré l'importance du royaume Peuhl et le dynamisme d'Ousmane Dan Fodio au XIX^{e} siècle, le Bénin n'a connu que très peu d'incursions guerrières, probablement à cause de la valeur militaire reconnue des Baatombu (Cornevin, 1981).Les Peuhl présents dans la zone d'étude sont d'origines très diverses. Les premières migrations se font sous la forme de petites infiltrations à la recherche de pâturage.

La tradition orale rapporte qu'un conquérant Peuhl nommé Yakouba, venant du pays Gourma s'installe à Bagou (dans l'actuelle commune de Gogounou), puis arrive

jusqu'aux abords de Nikki, mais il en sera chassé plus tard par les habitants de Basso qui le repousseront jusqu'au Niger (Cornevin, 1981). Les Peuhl constituent de nos jours un groupe socioculturel particulier intégré dans la société Baatombu, faisant partie de la clientèle de nobles Baatombu dont ils gardent les troupeaux. On les retrouve dans les grandes villes et les villages où ils ont leur base. Mais ils passent la majeure partie de l'année dans leurs camps avec leurs troupeaux.

A ces trois principaux groupes socioculturels on peut ajouter des groupes mineurs qui occupent le même espace. Il s'agit des Gourmantché, des Mokollé et des Zerma et les Gando.

- Les Mokollé sont venus du Nigéria et se sont d'abord installé dans la région comprise entre Guéné et Kandi. Ce sont des Yoruba d'origine et ont conservé des traces de tatouage Yoruba et parlent entre eux un dialecte (le Mokollé) proche du Yoruba alors que pour s'adresser aux autres, ils utilisent le Baatonu dont ils ont adopté les coutumes. Les Mokollé – dont le nom signifie « *je refuse la maison* » - sont venus dans la région avant les migrations Dendi.

- Les Gourmantché constituent très vraisemblablement la base du peuplement autochtone du nord-Bénin. Ils sont probablement les premiers occupants depuis l'Alibori jusqu'à Pékinga. La population gourmantché a été refoulée par les Baatombu au cours de leurs différentes conquêtes et par les Dendi lors de leurs migrations. On doit entre autres au Gourmantché, la fondation de Karimama (où ils sont d'ailleurs chefs de terre) et des villages comme Mamassi et Banikani. Dans la région de Banikoara, les éléments autochtones sont d'origine gourma. La langue qui y est parlée est d'ailleurs un Baatonu fortement empreint de Gourmantché.

- Les Gando ne sont pas, à proprement parler, un groupe socioculturel à part, même s'ils sont considérés socialement comme tel (Bio Bigou, 1987). Kissèzounon (1978) précise qu'ils sont d'origines variées mais ont en commun un statut « d'esclave ». Il s'agissait de prisonniers de guerre, à la suite de pillages, d'enfants dont la dentition commençait par la mâchoire supérieure ou dont la mère était décédée par suite de couches, les meurtriers ayant échappé à la justice locale (qui se réfugiaient chez les Peuhl, se constituant en serviteur)

ou les condamnés pour insolvabilité (ils étaient vendus aux Peuhl et le montant revenait au créancier). Ils sont utilisés pour les travaux des champs.

- Les Djerma ou Zerma sont en partie des descendants de compagnies de mercenaires venues se mettre au service de souverains locaux (Baatombu et Dendi essentiellement) à la fin du XVIII^{e} siècle. On les trouve dans les centres urbains où ils pratiquent le commerce. Ils parlent une langue (le Zerma) très proche du Dendi.

2.2. La population et la démographie

Comme mentionné supra, le bassin-versant de l'Alibori ne correspond à aucun découpage administratif. De ce fait sa population a été calculée en se basant sur les données disponibles par commune. Le secteur d'étude comptait en 2002 une population de 744 121 habitants dont 571 061 sont agricoles (INSAE 2004a, 2004b, 2004c). Un ménage compte en moyenne 8,5 personnes. Cette population a fluctué au fil des années à un rythme très varié. Au recensement de 1973, les neuf communes situées dans l'emprise du bassin totalisaient 305 981 habitants (INSAE, 1988a, 1988b). Cette population est passée à 500 581 habitants selon les résultats du recensement de 1992 (INSAE, 1994a, 1994b). Il est nécessaire de préciser que cet accroissement bien que significatif n'est pas uniquement d'origine démographique. En effet, entre les deux recensements, on a assisté d'une part à un regroupement de différents hameaux et villages en une seule agglomération, résultat d'une volonté politique. Dans les résultats du recensement de 1973, certaines localités ont été enregistrées sous le nom générique de ''village X''. Ces regroupements ont été suivi d'un redécoupage qui a vu certaines localités être rattachées à d'autres communes, augmentant de fait la population totale de ces communes (INSAE, 1988a et 1988b). Le taux d'accroissement intercensitaire (TAI) du bassin est de 4,1%, mais il varie selon les communes. Ainsi, la commune de Kandi connaît le plus faible accroissement entre 1992 et 2002. Son TAI est de 2,98%. Cette commune est passée de 73 138 habitants en 1992 à 95 206 en 2002. Le taux le plus élevé correspond à la commune de Péhonco (4,94% qui est passée de 33 833 en 1992 à 55 082 habitants en 2002. La figure 14 résume l'évolution démographique des communes du bassin sur les trois recensements.

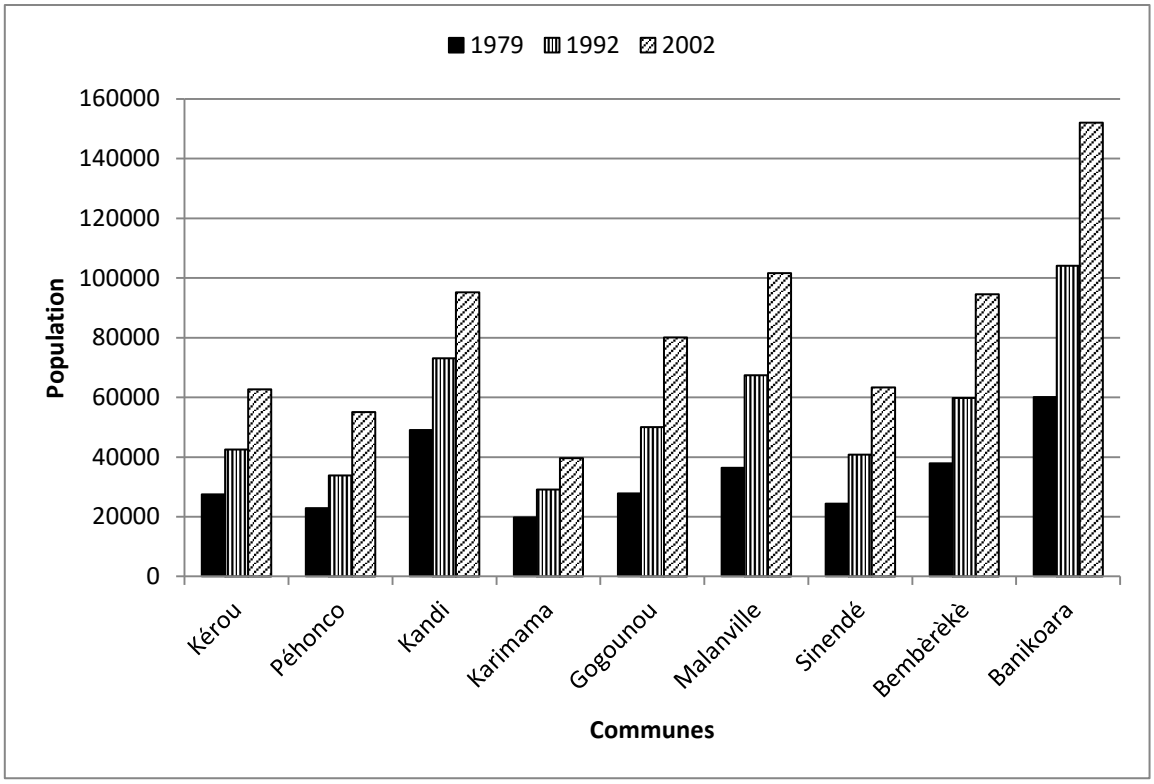


Figure 14 : Evolution intercensitaire de la population dans les communes du bassin de l'Alibori

Source : Données INSAE

A la lecture de la figure 15, il ressort que les communes de Banikoara, Malanville et Kandi sont les plus peuplées. Ces trois communes cumulent au cours des trois recensements respectivement 47,6 ; 48,8 et 46,8% de la population totale du bassin. Inversement, elles ne sont pas les plus vastes. La densité y est donc plus élevée que dans les autres communes. Dans les communes comme Banikoara dont une bonne partie est occupée par les aires protégées, la population est concentrée sur le reste de l'espace libre. Il s'ensuit une pression croissante sur les terres disponibles, dans un contexte d'agriculture extensive.

La densité dans le bassin de l'Alibori n'est pas uniforme. La moyenne pour l'ensemble du bassin est de 24,4 hbts/km². Dans la réalité elle varie énormément selon les communes. En 2002, Banikoara présentait la densité la plus élevée (34,7hbts/km²) tandis que la plus faible était celle de Karimama (6,7 hbts/km²) (figure 15).

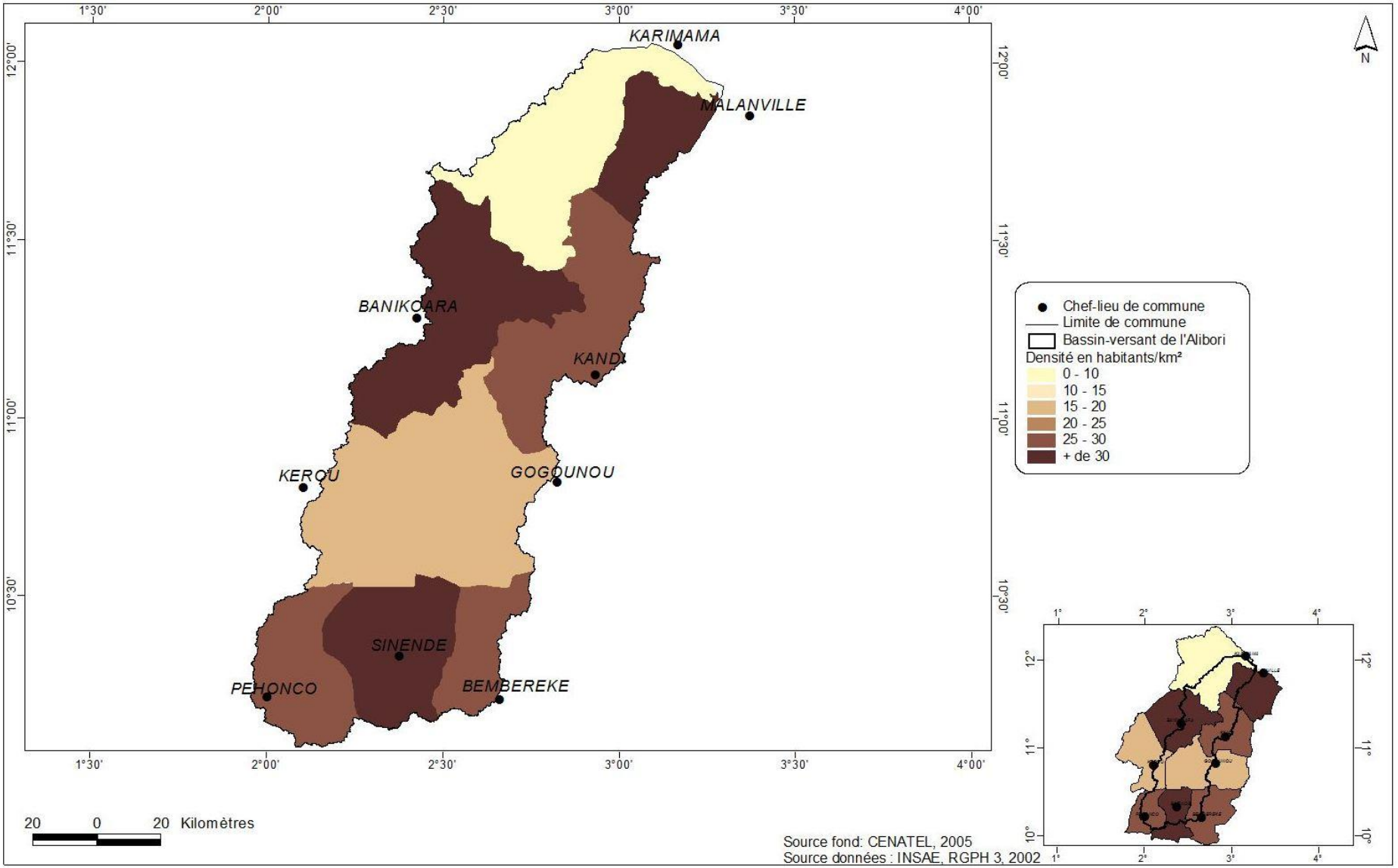


Figure 15 : Démographie du bassin-versant de l'Alibori

Quant à l'habitat, en milieu urbain, il est de type groupé. Mais dans les régions rurales, il est surtout de type semi-dispersé ou mixte. On distingue les campements peuhl qui regroupent en moyenne cinquante habitants; les fermes Gando regroupant cinquante à trois cents habitants et les villages Baatonu qui comptent en moyenne mille habitants (INSAE, 1994a).

Ces trois types d'établissements sont soudés par le service et la solidarité. Conformément aux structures socioéconomiques qui les lient, leurs champs, de grandes dimensions et presque avec des formes géométriques variées sont dispersés dans la brousse loin (entre 5 et 10 km environ) des habitations; tandis que le finage est discontinu.

Les principaux groupes socioculturels rencontrés sont les Baatombu, les Dendi et les Peuhl et leurs affiliés (Djerma et Gando). A ces trois s'ajoutent des groupes minoritaires tels que les Gourmantché, les Mokollé, les Fon et les Nago.

Le cadre d'étude étant essentiellement rural, avec un tissu urbain relativement faible, la majeure partie de la population tirent leurs revenus des activités du secteur primaire.

2.3. Activités économiques

La population du bassin-versant de l'Alibori est essentiellement active dans le secteur primaire. Les activités dominantes y sont l'agriculture et l'élevage. A ces deux s'ajoutent les activités secondaires comme la pêche, le commerce et l'artisanat ou la chasse.

2.3.1. Agriculture

L'agriculture constitue la plus importante activité économique du secteur d'étude. Elle occupe environ 76,7 % de la population active et procure plus de 80 % des revenus des ménages (Adjinacou et Onibon, 2004). L'importance de cette activité est due à des facteurs physiques, historiques, politiques et économiques (Vissin, 2007).

Les techniques culturales restent encore traditionnelles malgré les efforts d'introduction de nouvelles variétés améliorées, la généralisation de la culture attelée et l'introduction des tracteurs et motoculteurs dans les systèmes de production. De ce fait, l'accroissement de la production est lié en grande partie à l'augmentation des

superficies emblavées (Boko G., 2009). Les spéculations agricoles varient en fonction des groupes socioculturels dominants.

Dans les communes de Karimama, Malanville et le nord de Kandi à dominance Dendi, les céréales telles que le sorgho, le mil et le maïs occupent 60 à 75% des superficies emblavées. Dans les zones humides comme dans la vallée du fleuve Niger ou à l'embouchure de l'Alibori, on observe la production de pomme de terre ainsi que d'autres cultures maraîchères. La riziculture y est aussi présente. L'introduction récente du riz NERICA a favorisé la présence de cette spéculation dans des zones exondées.

Dans les communes de Banikoara, Gogounou, Kérou et le sud de Kandi, la culture du coton est prédominante. Les autres cultures pratiquées sont l'igname, le maïs, l'arachide, le sorgho et le manioc. Enfin, dans les communes de Péhonco, Sinendé et Bembèrèkè, le système cultural est dominé par les cultures vivrières comme le maïs, l'igname, le riz et le sorgho. Des superficies croissantes de coton y sont aussi observées (Ouinakohan, 2004, Agonyissa, 2004), (photo 10). La culture attelée est très développée dans la région qui compte plus de 50% des attelages du Bénin (Houéto, 2007).

Le paysage agraire étudié par Boko M. (1988) présente deux faciès majeurs : le paysage agraire Baatonu et le paysage agraire Dendi. Le premier se caractérise par des champs de grandes tailles de formes géométriques éloignées des habitations. Un système de rotation et d'assolement très rigoureux y est pratiqué. La culture du coton y est très développée. Le calendrier cultural est calqué sur le cycle saisonnier des précipitations. Le paysage agraire Dendi se différencie par des terres cultivables peu étendues du fait des affleurements quartzitiques, des versants escarpés et de larges surfaces cuirassées. Les champs s'étendent des habitations jusqu'à deux ou cinq kilomètres au-delà. L'association des cultures y est très poussée. L'érosion y est effective du fait des défrichements répétés pour la conquête de nouvelles terres.



a *b*

c *d*

Clichés : BOKO G., 2011

Photo 10 : Superficies emblavées dans la zone d'étude

La planche ci-dessus montre quelques superficies emblavées dans la zone d'étude. En ***a*** *il s'agit d'un futur champ d'ignames. Les buttes sont préparées pour la prochaine saison. La photo* ***b*** *illustre un champ de riz sur les rives de l'Alibori. En* ***c****, il s'agit d'un champ de coton où les capsules ont déjà éclaté. Enfin la photo* ***d*** *montre un espace maraîcher aménagé sur les berges de l'Alibori.*

La forte présence de la culture attelée laisse présager un effectif bovin relativement important.

2.3.2. Elevage

L'élevage est la seconde activité économique après l'agriculture au Bénin, particulièrement dans les départements de l'Alibori et du Borgou (Saka, 1985, De Haan, 1997). Ces deux départements regroupent à eux seuls 69% du cheptel bovin du Bénin (Adjinacou et Onibon, 2004). L'exploitation des bovins et des petits ruminants, principales espèces élevées dans les départements de l'Alibori et du Borgou, repose sur les pâturages naturels et les résidus de récolte. Ainsi, agriculteurs et éleveurs

utilisent un même espace, ce qui nécessite une cogestion pour éviter les conflits inhérents à la cohabitation (Djenontin et *al.* 2003). En effet, les graminées et les légumineuses présentes dans les basses strates de la végétation constituent un facteur favorisant l'élevage dans la zone, car ces espèces sont fort appétées par les herbivores aussi bien sauvages que domestiques. Une analyse de l'effectif du bétail montre que :

- Les bovins sont les espèces les plus représentées (photo 11). On note une augmentation régulière des effectifs avec une plus forte concentration dans la commune de Banikoara. Deux races bovines dominent dans le bassin de l'Alibori : les zébus et la race Borgou. Au sein des zébus, on distingue les sous-races Djelli (ou Djalli), Goudali et Tchiwali (Kissèzounon, 1978). Plus la production cotonnière est élevée dans la commune, plus le cheptel bovin est important (Agonyissa, 2004).

- Les espèces ovines et caprines sont de taille réduite et sont destinées essentiellement à la consommation lors des cérémonies surtout et la commercialisation de viande de boucherie. Les effectifs ne sont pas élevés et sont caractérisés par un faible accroissement numérique. Cette faible augmentation numérique est due au fort taux de mortalité enregistré dans les élevages, conséquence d'absence d'un programme de prophylaxie, de manque d'eau et de pâturage sains. Ces effectifs réduits s'expliquent par l'incapacité des paysans à garder et entretenir de grands effectifs (Houéto, 2007).

L'élevage est pratiqué de façon extensive. L'élevage des bovins est l'apanage des Peuhl qui transhument au gré de la disponibilité des pâturages et surtout de l'eau. L'alimentation du cheptel est constituée à 80% des pâturages naturels, mais aussi des résidus des récoltes (mil, maïs, niébé, arachide, etc.) et des sous-produits agro-industriels (graines de coton, tourteaux d'oléagineux, drêches de brasserie) (Djenontin et *al.*, 2003).



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 11 : Troupeau de bovins dans la vallée du Niger

La photo 11 montre un troupeau de bœufs paissant dans une rizière dans la vallée du Niger. La taille du troupeau est à l'image de la place qu'occupe l'élevage de bovins dans la région. Un troupeau peut compter parfois plus de cent têtes.

La transhumance qui est due entre autres au mode de vie nomade des Peuhl, constitue une réaction nécessaire à la survie des troupeaux, mais aussi une technique efficace d'exploitation des ressources naturelles. Cependant, l'élevage de transhumance exerce une pression de plus en plus forte sur les pâturages naturels. Pendant la saison sèche, ce système induit des feux de brousse, l'élagage et l'étêtage des arbres pour permettre aux troupeaux de brouter les rejets. Les jachères constituent également des pâturages. Elles produisent suffisamment de biomasse pendant la saison pluvieuse. En saison sèche au contraire il se produit un déficit de fourrage, conséquence de la pratique du feu de brousse et de l'assèchement des cours d'eau. Les réserves fourragères (résidus de cultures) ne suffisent donc plus à nourrir le bétail. Les éleveurs des latitudes supérieures vont en transhumance à partir du mois de novembre dans les régions du sud du bassin. Aux éleveurs nationaux s'ajoutent les transhumants transfrontaliers venus du Nigeria, du Niger et du Burkina Faso. Le territoire du bassin accueille chaque année environ 100 000 têtes de bovins. Ainsi, la transhumance est perçue comme un système de production dégradant l'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 (Djènontin, et *al.*, 2003, Vissin, 2007).

Cette forte pression est très remarquable dans les régions du nord du bassin principalement autour des points d'eau et des cours d'eau où on note une aréole de surpâturage qui entraîne une diminution des ressources pastorale, une dégradation du couvert végét*al*. Cela provoque la fragilisation des berges des plans d'eau et des cours d'eau. A ces dégradations de l'environnement s'ajoute le piétinement des animaux dont l'impact est l'ensablement des cours et plan d'eau et l'érosion (Houéto, 2007).

De Haan et *al*. (1997), révèlent que la capacité de charge calculée en excluant les aires protégées comparée à celle calculée en intégrant ces aires montre que l'élevage dépend de l'utilisation des aires protégées, surtout en saison sèche. En saison sèche, la raréfaction des herbages due au passage du feu amène les éleveurs à pratiquer le pâturage aérien qui consiste à élaguer les branches des espèces comme *Khaya senegalensis*, *Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus* très appétées par les animaux. Ce traitement néfaste donne aux cimes des ligneux une apparence étriquée et digitée (Akindélé, 2000).

2.3.3. Pêche

Dans la zone d'étude, la pêche est pratiquée aussi bien dans l'Alibori que dans la plupart de ses affluents et dans les différents barrages à but pastoral construits par différents projets. Elle est aussi pratiquée dans le fleuve Niger (photo 12).



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 12 : Pêche artisanale dans l'Alibori

La photo ci-dessus illustre des habitants de la localité de Tobré, pratiquant une pêche artisanale dans une des poches d'eau existant durant l'étiage. Pendant que ceux proches de

la rive pêchent à la ligne, un autre est entré dans la rivière pour capturer un poisson. Les piquets visibles à la surface sont reliés entre eux par un filet, constituant ainsi un enclos rudimentaire.

D'une façon générale, cette activité est faite de façon saisonnière en fonction de la présence ou non d'eau dans les lits de ces différents cours d'eau. La population autochtone n'étant pas historiquement des pêcheurs, on dénombre une faible proportion de pêcheurs professionnels en son sein. Les différents cours et plans d'eau connaissent une timide exploitation par des étrangers (Nigérians, Nigériens, Maliens et Togolais).

Les techniques de pêches les plus courantes sont le filet épervier, les nasses et les enclos. Des pratiques de pêche aux pesticides ont été souvent rapportées provoquant des pertes dans les troupeaux transhumants. Les risques liés à la pollution des points d'eau par les pesticides menacent aussi bien la vie des espèces aquatiques et ripicoles que celle des hommes et de la faune sauvage. C'est un vrai problème de santé publique que pose ce type de pollution.

L'aquaculture est pratiquée via l'exploitation piscicole des retenues d'eau des barrages et dans des trous à poisson. Il faut noter aussi qu'au cours de ces dernières années, sous l'initiative des projets tels que le Programme d'Appui au Développement Participatif de la Pêche Artisanale (PADPPA) et les CeCPA, on assiste à un engouement – certes encore mineur – pour cette activité. Il y a une promotion de la pisciculture grâce à l'empoissonnement des barrages et l'organisation des pêcheurs en groupes. Ces actions sont menées essentiellement autour des vieux barrages.

Dans les départements du Borgou et de l'Alibori 17 barrages, 58 retenues d'eau et 50 mares pour un total de 12 500 000 m^3 à l'origine destinés à l'abreuvement du bétail ont favorisé l'émergence d'activités génératrices de revenus tels que le maraîchage et la pisciculture (Houéto, 2007).

2.3.4. Autres activités économiques

En dehors des principales activités étudiées ci-dessus, les populations en exercent d'autres pour des raisons économiques ou culturelles. Il s'agit de la chasse, du commerce et de l'industrie.

La chasse existe sous deux formes : la chasse moderne réglementée et la chasse traditionnelle. Cette dernière, lorsqu'elle est pratiquée dans le domaine libre, constitue un mode de gestion endogène des ressources fauniques. Mais pratiquée illégalement dans les réserves forestières (forêts classées et zones cynégétiques, parc national du W du Niger) qui abritent encore une faune très variée, il s'agit alors de braconnage. Les impacts de cette activité sur la faune ont déjà été décrits plus haut. Chez les Baatombu, la chasse constitue une activité endogène et réglementée (Boko G., 2009).

La chasse moderne est pratiquée pendant les périodes de chasse (décembre à juin) dans les zones cynégétiques. Les touristes sont les acteurs essentiels de cette activité.

Une des techniques de chasse des petits mammifères consiste à mettre le feu aux herbes sèches sous les arbres pour faire sortir les animaux de leur refuge pour les abattre. Les feux de végétation ainsi déclenchés causent souvent des dégradations importantes à la flore et fragilisent le sol.

Le bassin de l'Alibori regorge de marchés où se font des échanges commerciaux. Chaque commune dispose en dehors des petits marchés locaux, d'un marché centr*al*. Si l'accessibilité reste un obstacle majeur au développement de ces marchés locaux et parfois régionaux, la spécificité d'un marché constitue un facteur favorisant sa fréquentation (Houéto, 2007). Ainsi, le marché de Yarra, dans la commune de Sinendé attire des commerçantes en provenance de Bohicon, voire Massi, qui viennent s'approvisionner en maïs. De même, le marché de Malanville est le plus gros marché de la région. Il a un caractère international du fait de sa situation géographique et de par sa fréquentation par des acteurs provenant de divers horizons. De ce marché, partent vers l'intérieur du pays, au Togo et au Niger des produits maraîchers, principalement l'oignon et la tomate (Vissin, 2007).

Le secteur industriel est très peu développé. Les seules industries remarquables sont les usines d'égrenage de coton. Les sociétés présentes sont la SONAPRA et la SODICOT avec des usines à Kandi et Banikoara. Outre le coton, on distingue au niveau des communes d'autres unités industrielles comme les unités d'égrenage de riz et des petites unités de transformation du manioc en gari, de l'arachide en huile. Ces unités sont pour la plupart gérées par des groupements ou des individus.

Enfin, il existe d'autres activités mineures, mais qui occupent une part de la population de plus en plus importante. Il s'agit d'activités comme l'exploitation artisanale de carrière ou les activités de transformation (production de beurre de karité, par exemple). Si cette dernière n'occupe que les femmes, l'exploitation de carrière est exercée aussi bien par les hommes que par les femmes (photo 13). Selon les moyens, des bâtons de dynamite, ou des marteaux sont utilisés pour casser des portions des collines ou briser les gros blocs affleurants. Les morceaux obtenus sont ensuite concassés et tamisés. Le gravier est trié en plusieurs classes selon la taille des grains.



Cliché : BOKO G., 2006

Photo 13 : Gravier issu d'une carrière à Niaro (commune de Sinendé)

Conclusion partielle

Ce chapitre décrit le contexte de l'occupation et de l'utilisation de l'espace dans le bassin-versant de l'Alibori. La zone d'étude est caractérisée dans sa partie nord, par un climat de type soudano-sahélien tandis que le sud a un climat soudanien typique. Dans ces deux variantes des climats tropicaux l'année est divisée en une saison sèche et une saison humide. Le relief est marqué par la pénéplaine cristalline et le plateau de grès de Kandi. L'altitude varie entre 137 m à l'embouchure de l'Alibori à 544 m au sud de Tobré. La rivière Alibori et ses affluents constituent le principal trait marquant de l'hydrographie. D'une longueur de 427 km, elle tarit pendant la saison sèche à plusieurs endroits de son lit. Les principales formations géologiques rencontrées sont

le socle ancien, le Continental Terminal et les alluvions récents. La pédologie du bassin est constituée de sols ferrugineux, des sols brunifiés, des sols hydromorphes, des sols minéraux bruts et des lithosols. Ils servent d'assise aux différentes formations végétales rencontrées dans la zone d'étude. Les principales sont les forêts claires et savanes boisées, les savanes arborées et arbustives, les savanes saxatiles, les galeries forestières, les savanes à emprise agricole, les jachères arbustives, les prairies humides et les fourrés. Quelques rares plages dénudées y sont aussi rencontrées. Le milieu abrite une population humaine composée de trois groupes socioculturels majeurs : les Baatombu, les Dendi et les Peulh, auxquels s'ajoutent les Mokollé, les Djerma, les Gourmantché et les Gando. La dynamique démographique est caractérisée par une croissance de la population et une densité relativement faible (34,7 habitants/km² pour la commune de Banikoara qui est la plus peuplée). Ces populations pratiquent essentiellement deux activités économiques. L'agriculture est la principale activité. Elle est pratiquée de façon extensive malgré l'introduction progressive de machines agricoles et autres intrants. La seconde activité est l'élevage qui est l'apanage des Peulh. Elle est également pratiquée de façon extensive. La pratique de la transhumance dans la quête de pâturage et d'eau oblige les Peulh à un nomadisme pastoral saisonnier. La prédominance d'activités du secteur primaire, surtout pratiquées de façon extensive, ajoutée à une croissance démographique constante laisse présager une pression élevée sur les ressources naturelles. L'agriculture et le pastoralisme nomade étant particulièrement consommateurs d'espace. Il est à prévoir des pressions sur les formations végétales naturelles, avec la diminution des superficies de ces unités d'occupation.

Les différentes données et méthodes utilisées pour connaître la dynamique de l'occupation du sol dans le milieu ainsi que le rôle probable des différentes caractéristiques du milieu sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Données matériel et méthodes

Ce chapitre présente les différents travaux déjà réalisés soit dans le même secteur, soit sur une ou plusieurs des thématiques abordées dans cette thèse à travers une synthèse bibliographique. Les données climatiques, démographiques, socioéconomiques, les matériels ainsi que les modèles utilisés y sont aussi présentées. Les méthodes et techniques ayant permis d'aboutir aux différents résultats sont aussi exposées.

1. Présentation des variables d'étude

Il s'agit essentiellement des variables climatiques, les démographiques et socioéconomiques.

1.1. Variables climatiques

Les variables climatiques utilisées pour ce travail sont de trois types : les données thermométriques, la pluviométrie et l'évapotranspiration. Il est important de mentionner que le réseau de stations du secteur d'étude est plutôt faible. On dénombre neuf stations et postes pluviométriques situées à l'intérieur ou voisines du bassin de l'Alibori. Les stations localisées à l'intérieur des limites du bassin sont : Alfakoara, Kandi et Bembèrèkè. Les stations avoisinantes sont : Malanville, Ina, Guéné, Kérou, Banikoara et Karimama. Malheureusement, tous ces postes et stations ne sont pas fonctionnels et les données qui y sont recueillies comportent souvent d'importantes lacunes. Pour cette raison, il a fallu faire des sélections. Les données provenant des stations de Guéné, Alfakoara et Karimama n'ont pas été retenues car présentant des lacunes trop importantes. La station d'Ina a été écartée au cours des analyses. Non seulement parce qu'elle n'est pas localisée dans le bassin, mais en plus, elle appartient au même domaine climatique que Bembèrèkè dont elle est géographiquement proche. Son influence n'est pas perceptible au cours des différentes interpolations réalisées.

Tableau II : Stations situées à l'intérieur ou proches du bassin-versant de l'Alibori

Nom	Type	Latitude	Longitude	Altitude (en mètre)	Mesures	Nbre d'obs/ jr	Année de création
Banikoara	Pluvio	11°18 N	2°26 E	310	Précipitation	1	1954
Bembèrèkè	Pluvio	10°12N	2°40 E	491	Précipitation	1	1921
Ina	Climatique	09°58 N	2°44 E	358	Précipitations	3	1944
Kandi	Synoptique	11°08 N	2°58 E	290	Précipitations Température Evapotranspiration	8	1921
Malanville	Pluvio	11°52 N	1°39 E	160	Précipitation	1	1942
Alfakoara	Pluvio	11°27 N	3°04 E	342	Précipitation	1	1969
Kérou	Pluvio	10°50 N	2°06 E	256	Précipitation	1	1960
Karimama	Pluvio	12°10 N	3°20 E	172	Précipitation	1	1979

Source : Adapté de Vissin, 2007

Il faut préciser que toutes les données climatiques utilisées ont été collectées au Laboratoire Pierre Pagney : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE) qui les a obtenues de l'ASECNA.

1.1.1. La pluviométrie

Il s'agit principalement des séries pluviométriques des stations de Kandi, Banikoara, Malanville, Bembèrèkè et Kérou. Les séries disponibles pour ces stations varient, bien qu'elles aient la même source. On a :

- Kandi : 1950 – 2009
- Malanville : 1950 – 2008
- Banikoara : 1954 – 2009
- Bembèrèkè : 1950 – 2008
- Kérou : 1965 - 2005

Le tableau suivant représente la matrice de corrélation entre les différentes stations utilisées.

Tableau III : Matrice de corrélation des stations retenues

	Kandi	*Malanville*	*Banikoara*	*Bembèrèkè*	*Kérou*
Kandi	1				
Malanville	0,255788	1			
Banikoara	0,394384	**0,604814**	1		
Bembèrèkè	0,179671	0,219561	0,336899	1	
Kérou	-0,00389	0,172573	0,23199	0,378671	1

1.1.2. Autres paramètres climatiques

L'évapotranspiration et la température se retrouvent dans cette catégorie. Du fait de la présence d'une seule station synoptique dans la zone d'étude, cette dernière est la seule capable de fournir ces données. En l'occurrence, il s'agit de la station de Kandi.
Les données thermométriques se présentent sous deux variables : les températures minimales et les températures maximales. Les données recueillies couvrent la période 1965 – 2004.
En ce qui concerne l'évapotranspiration, elle est relevée à un pas de temps décadaire. Les données utilisées couvrent la période 1965 – 2004.

En raison de la diversité des générations des séries de données statistiques climatiques et afin de conserver une homogénéité dans les analyses de variabilité, les bilans et les modélisations, il a fallu retenir une période de travail. Sur la base des périodes couvertes par les stations retenues et en gardant à l'esprit que d'autres facteurs – essentiellement les autres paramètres à utiliser – doivent être pris en compte, la période 1965 – 2004 a été retenu pour le traitement des données climatiques. Ces données ont été utilisées pour caractériser le climat du milieu et étudier sa variabilité à travers le calcul de différents indices.

1.2. Variables démographiques et socioéconomiques

1.2.1. Variables démographiques

Il s'agit des statistiques relatives à la population. Ce sont des données provenant des résultats des recensements et fournies par l'Institut National des Statistiques et de l'Analyse Economique. Dans le cadre de ce travail, les données relatives aux résultats des Recensements Généraux de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 1972, 1992 et 2002 des communes situées dans la zone d'étude. En termes de résultats de recensement, les statistiques utilisées sont les effectifs des populations, mais aussi les caractéristiques de la population telles que le taux d'accroissement intercensitaire, le taux d'accroissement naturel et le pourcentage de ménages ruraux. Les données démographiques sont utiles pour la présentation des caractéristiques humaines de la zone d'étude et aussi à des fins de modélisation.

1.2.2. Variables socioéconomiques

Elles comprennent essentiellement les données relatives à la production agricole dans la zone d'étude. Ces données portent sur les différentes spéculations, les superficies emblavées, la production annuelle et le rendement. Elles ont été obtenues au Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (MAEP). Il faut noter que ces données sont très disparates. Pour la période 1971 – 1986, seuls les rendements des différentes cultures à l'échelle départementale sont disponibles. A partir de 1987, la production, la superficie et le rendement sont disponibles mais ne sont pas exhaustives pour toutes les communes et ne concernent pas toutes les spéculations. Pour certaines spéculations « récentes » comme le soja, les données n'existent qu'à partir de 1997. Il est utile de préciser que des périodes lacunaires existent aussi, rendant difficile le choix d'une période de travail en concordance avec celle des données climatiques.

2. Matériels

2.1. Les cartes

Les cartes utilisées sont disponibles sous deux formats : numériques et analogiques (papier). Celles en format papier exploitées sont rares et ont été ramenées sous forme numérique avant leur utilisation. La carte géologique du Bénin obtenue à l'INRAB et la carte générale du Bénin au 1/600 000 obtenue à l'IGN sont les deux cartes analogiques utilisées pour ce travail. La carte géologique a servi pour la description du cadre d'étude. Quant à la carte générale du Bénin, elle a servi lors des déplacements sur le terrain et pour sélectionner les localités « sensibles » à visiter. Des études antérieures (Orékan, 2008 ; Boko G., 2009 ; Idieti, 2009) fournissent des descriptions détaillées de ces cartes.

Les données au format numériques exploitées sont le modèle numérique de terrain (MNT) ASTER et l'imagerie Landsat.

2.1.1. Le modèle numérique de terrain ASTER

Le capteur ASTER (Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection) a été construit par METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) et mis en orbite par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en décembre 1999. Il a

permis d'acquérir des images d'une résolution horizontale de 15m et d'une dimension de 60 km x 60 km. Le MNT ASTER qui en a été extrait a été produit en utilisant un processus automatique sur les 15 millions d'images qui constituent la totalité des images prises par le capteur depuis son lancement. Ce processus inclut des traitements de stéréo-corrélation, masquage de nuages, élimination des valeurs résiduelles ou aberrantes et calcul de valeurs moyennes pour obtenir 1 264 118 scènes. Ces scènes ont ensuite été divisées en des pièces de 1° de côté. Le MNT ASTER couvre la Terre de 83°N à 83°S et est composé de 22 600 pièces. Il est disponible en téléchargement gratuit. Les données sont géoréfenrencées en longitude/latitude WGS 84. Elles sont livrées au format GeoTIFF compressé en un fichier zip. Chaque pièce comporte un fichier Tiff qui contient les données altimétriques et un second fichier qui comporte les éventuels artefacts et les valeurs utilisées pour le comblement de ces artefacts.

Une évaluation de la qualité de ce MNT lui confère une résolution verticale de 20 m et un degré de confiance de 95%, et une résolution horizontale de 30 m et un degré de confiance de 95% également. Il est nécessaire de préciser qu'il ne s'agit pas d'un Modèle Numérique d'Elévation (MNE) mais bien un Modèle Numérique de Terrain. Les MNT diffèrent des MNE en ceci que les MNE représentent le modelé du terrain avec les altitudes par rapport au niveau de la mer alors que les MNT font la même chose mais en prenant en compte les éléments artificiels. Il est donc possible sur un MNT d'une précision élevée de distinguer le tracé des routes par exemple.

2.1.2. Les images satellites

De manière générale, une image numérique est un ensemble de chiffres disposés en lignes et en colonnes décrivant la distribution spatiale de certains paramètres de l'espace représenté. Elle est constituée d'éléments discrets appelés pixels. A chaque pixel est associée une valeur qui peut varier entre 0 et 255. Sur une image, cette valeur est traduite dans une gamme de couleur allant du noir au blanc en passant par différents tons de gris, 0 représentant le noir et 255 le blanc. La valeur du pixel décrit la réflectance moyenne (ou le niveau d'énergie) d'un espace précis dans une scène (figure 16). La taille de cet espace affecte le niveau de détail de la scène. Ainsi, plus la taille du pixel est réduite, plus il y a de détails : c'est la résolution spatiale de l'image.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	69	8	75	101	57	64	89	22	96
2	40	1	200	95	150	65	52	0	0	57
3	25	9	231	47	113	200	98	0	0	33
4	75	100	100	53	50	52	44	0	111	62
5	100	100	100	99	51	51	0	68	32	95
6	245	100	100	110	73	52	51	222	8	11
7	200	37	100	41	88	54	53	235	157	140
8	35	220	95	32	79	69	47	29	117	190
9	22	250	217	86	91	235	35	255	80	167
10	87	99	233	230	231	234	240	2	6	157

Figure 16 : Configuration d'une image sous forme de pixels

La figure ci-dessus représente une image sous forme de pixels. Les valeurs proches ont été regroupées, permettant ainsi d'identifier des éléments sous forme linéaire ou surfacique.
Source : inspiré de Robin (2002).

Plusieurs capteurs en orbite autour de la Terre envoient tous les jours des images à des résolutions des plus larges aux plus fines. Ainsi, les images du capteur de MétéoSat ont une résolution d'un kilomètre (1 km) tandis que celles d'AVIRIS ou de GeoEye peuvent atteindre respectivement une résolution de 3,6m et 1m (Stoney., 2008). Entre ces deux se situent une large gamme de satellites fonctionnant à des résolutions intermédiaires. On peut citer par exemple Spot, Spot Végétation, ASTER, ou Landsat. Ce sont les scènes provenant de ce dernier qui ont été utilisées dans le cadre de ce travail.

Les images Landsat sont fournies par les satellites éponymes dont le premier, Landsat MSS a été lancé le 23 juillet 1972. Depuis, plusieurs générations se sont succédé. Les premières générations des capteurs Landsat (de 1 à 3) utilisaient la technologie Multispectral Scanner (MSS). A partir Landsat 4, lancé en 1982 les capteurs sont dotés de la technologie Thematic Mapper (TM). Le plus récent, Landsat 7, lancé le 15 avril 1999 est pourvue d'une amélioration du TM appelée ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) (tableau IV). Le 31 mai 2003, le Scan Line Corrector – dont le rôle est de compenser le mouvement avant du satellite lors des prises de vue – est tombé en panne de façon définitive. Les images obtenues après cette date sont qualifiées de « SLC –Off » et comportent des rayures (gap) rendant leur exploitation difficile.

Elles ne sont utilisables qu'après une manipulation où les parties striées sont comblées en utilisant un masque.

Tableau IV : Résumé des missions Landsat et capteurs embarqués

Satellite	Date de lancement	Capteurs	Observation
Landsat 1	23-7- 72	MSS et RBV	Hors-service depuis le 6 janvier 1978
Landsat 2	22-1-75	MSS et RBV	Hors service depuis le 5 février 1982
Landsat 3	5-3-78	MSS et RBV	Hors service le 31 mars 1983
Landsat 4	16-7- 82	TM et MSS	Capteurs hors-service depuis juillet 1987
Landsat 5	**1-3- 84**	**TM et MSS**	**Opérationnel**
Landsat 6	10-5-93	MSS et ETM	Perdu au lancement
Landsat 7	**15-4-99**	**ETM+**	**Opérationnel**

Source : NASA, 2001

Le satellite Landsat opère en mode multispectral avec 7 bandes pour le TM et 8 bandes pour l'ETM+ dont 3 des bandes sont dans le visible et 4 dans le proche infrarouge et l'infrarouge. Le tableau V présente les caractéristiques de ces images.

Tableau V : Caractéristiques des images Landsat TM et ETM+

Capteur TM	Sensibilité spectrale (µm)	Nom correspondant à la longueur d'onde	Résolution au sol (en m)
Bande 1	0.45-052	Bleu	30 x 30
Bande 2	0.52-0.6	Vert	30 x 30
Bande 3	0.63-0.69	Rouge	30 x 30
Bande 4	0.76-0.9	Proche Infrarouge	30 x 30
Bande 5	1.55-1.75	Infrarouge moyen	30 x 30
Bande 6	10.4-12.5	Infrarouge thermal	120 x 120
Bande 7	2.08-2.35	Infrarouge moyen	30 x 30
Bande 8	0.5-0.9	Panchromatique	15 x15

Source : NASA, 2001

Afin d'étudier les changements dans l'utilisation et l'occupation du sol dans le bassin de l'Alibori, les images Landsat, disponibles gratuitement et téléchargées sur le site web http://www.landsat.org ont été utilisées. Du fait de l'importante couverture nuageuse pendant l'hivernage, les images prises pendant la saison sèche ont été privilégiées (Orékan, 2008). Le tableau VI et la figure 17 présentent respectivement les caractéristiques desdites images ainsi que leur localisation à l'échelle du Bénin.

Tableau VI : Scènes LANDSAT utilisées

	Capteur	Date	Identification Path/Row
Nord du bassin	LANDSAT MSS	17 janvier 1973	206/52
	LANDSAT 5 TM	01 février 1990	192/52
	LANDSAT 7 ETM+	19 décembre 2008	192/52
Sud du bassin	LANDSAT MSS	09 janvier 1972	206/53
	LANDSAT 5 TM	17 février 1989	192/53
	LANDSAT 7 ETM+	19 décembre 2008	192/53

Il est recommandé, pour une analyse diachronique, de choisir des années relativement distantes afin de pouvoir observer les changements éventuels dans l'occupation et l'utilisation du sol.

On constate qu'à cause de la nécessité d'employer deux images pour couvrir la zone d'étude, leurs dates d'acquisition peuvent différer d'une scène à l'autre. Cela peut parfois mener à l'existence d'une "ligne" divisant les unités identifiées, mais n'a pas d'impact significatif sur le résultat fin*al.* (Mitasova et Neteler, 2008).

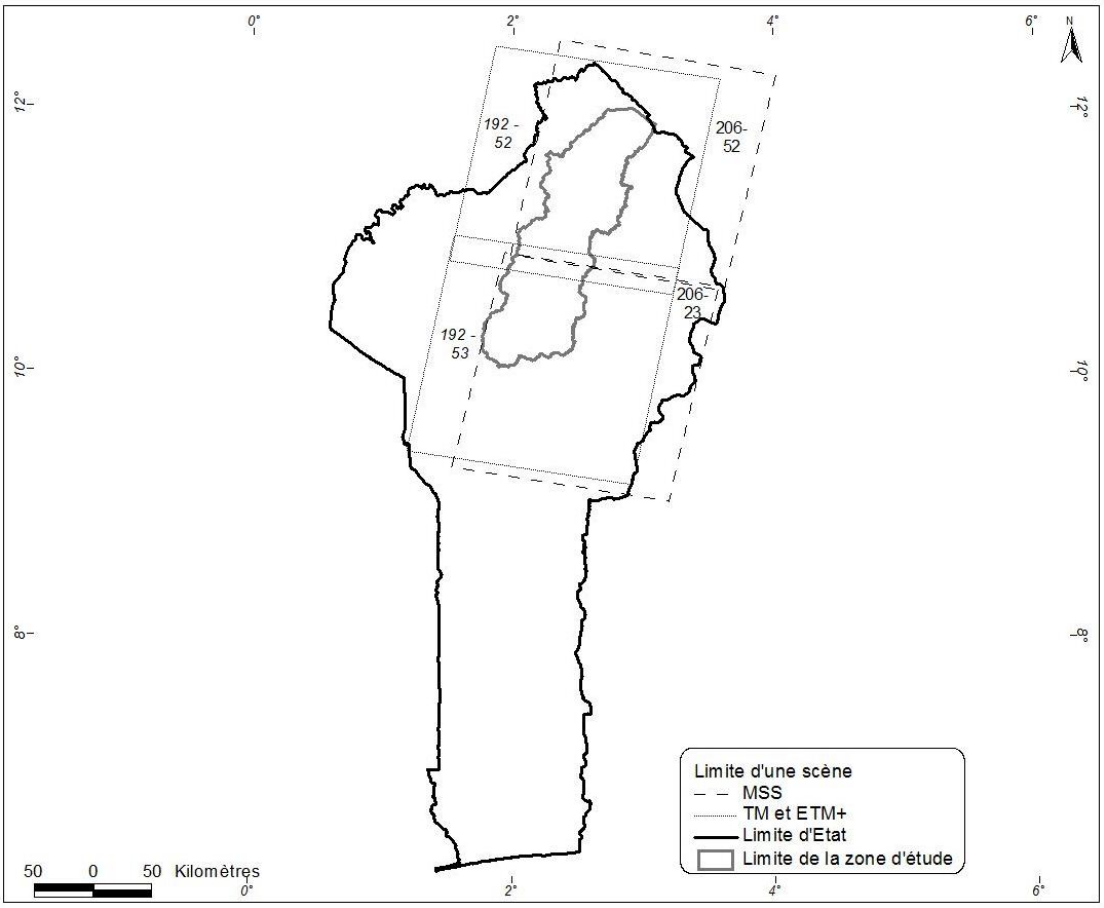


Figure 17 : Localisation des scènes Landsat utilisées

2.2. Outils et logiciels utilisés

Plusieurs outils différents ont servi à la collecte et le traitement des données.

Lors de la phase de collecte des données, trois guides d'entretien ont été utilisés. Un à l'usage des agriculteurs, un autre destiné aux éleveurs et le troisième a servi à discuter avec les agents des CeCPA et CeRPA. Les échanges avec les éleveurs et les agriculteurs ont eu lieu sous la forme de focus group organisé dans chaque localité visitée. Ces focus group avaient souvent lieu le soir ou tard dans l'après-midi, lorsque les participants avaient fini de vaquer à leurs occupations quotidiennes.

Les autres outils de collecte comprennent :

- un GPS qui a servi à enregistrer les coordonnés des points importants et celles des localités visitées
- la carte générale du Bénin au 1/ 600 000 pour les déplacements
- un appareil photo pour les prises de vue

Le traitement des données a nécessité divers logiciels informatiques. Les données statistiques (production agricole, démographie, données climatiques, données sur l'occupation du sol, etc.) ont été traitées avec Excel 2010.

Le logiciel PASW Statistics 18, plus connu sous le nom de SPSS a été utilisé pour les différentes analyses de régression logistique.

Les données cartographiques (MNT et images satellites) ont été traitées avec le SIG GRASS. Il a aussi servi à faire les interpolations et diverses analyses spatiales. Ce logiciel a été préféré à d'autres du fait de sa gratuité, de sa capacité à traiter plusieurs formats de données et de la multiplicité d'analyses et manipulations qui y sont possibles.

La production des cartes s'est faite avec les logiciels ArcView 3.2, QuantumGIS 1.8 et GRASS. 6.5. L'usage de plusieurs logiciels de cartographie explique la différence de présentation des cartes illustrant le document.

Le logiciel CLUE-S a servi à implémenter le modèle. Il comporte une extension séparée appelée File Converter qui sert à convertir les fichiers dans le format adéquat.

Les fichiers sont ensuite introduits dans le logiciel pour la simulation de l'occupation du sol. Une description plus détaillée du logiciel et du modèle est faite plus loin.

3. Méthode de collecte des données

3.1. La documentation :

L'objectif visé à travers cette démarche est d'identifier et de recenser la documentation existante sur le sujet ainsi que le milieu d'étude dans son ensemble ou en partie, de vérifier l'existence de travaux de recherche antérieurs ou en cours et voir dans quelle mesure il est possible d'en tirer des données ou méthodes. Les travaux ciblés sont ceux ayant abordé une des thématiques prises en compte dans cette thèse. Plus précisément, il s'agit de :

- la variabilité climatique ;
- les tendances climatiques, voire les changements climatiques ;
- la dynamique des états de surface ;
- les facteurs à la base des changements dans les formes d'occupation du sol ;
- l'utilisation de modèle pour prédire l'évolution de l'occupation du sol ;
- l'utilisation des SIG et de la télédétection comme outils.

Le choix de ces travaux a aussi pris en compte les méthodes utilisées par les auteurs pour aborder ces thématiques. Ces documents se présentent sous formes de :

- monographie ancienne ou actuelle sur une commune, forêt classée ou tout autre secteur faisant partie de la zone d'étude ;
- documents de synthèse et les rapports des projets en cours ou ayant ou lieu et couvrant la zone d'étude en partie ou entièrement ;
- articles scientifiques traitant d'une des thématiques du sujet, utilisant ou proposant une méthode pour aborder lesdites thématiques ;
- données statistiques (pluviométrie, démographie, agriculture, etc.) ;
- etc.

Dans cette perspective, plusieurs centres de documentation ont été visités notamment ceux des mairies des communes couvertes par le bassin, du Ministère de l'Environnement, de l'Agence Béninoise pour l'Environnement, de l'Université

d'Abomey-Calavi, etc. Mais la source de documentation la plus exploitée reste Internet, à travers les sites de publications scientifiques et les sites spécialisés dans les différents aspects de ce travail.

3.2. Les travaux de terrain

Plusieurs séjours sur le terrain ont été effectués dans le cadre de cette recherche. Diverses enquêtes ont été réalisées au cours de ces séjours. Ces enquêtes avaient pour principaux objectifs :

- d'identifier les formes et méthodes d'exploitations des ressources naturelles ;
- d'identifier les différentes formes d'occupation du sol ;
- de recenser les facteurs sociaux à la base de ces formes d'occupation ;
- de recenser les perceptions anthropiques de la variabilité climatique ;
- de collecter les diverses stratégies d'adaptation face aux problèmes liés aux ressources naturelles et à la variabilité climatique.

De façon générale, il s'est agi de recueillir les données qualitatives qui permettront d'analyser et d'apprécier les perceptions des populations sur l'occupation du sol et ses facteurs ainsi que sur la variabilité et les changements climatiques.

Plusieurs localités ont été ciblées et parcourues en fonction de divers paramètres. Ces paramètres sont entre autres :

- la proximité par rapport à un point spécifique (cours d'eau, forêt classée, etc.),
- une spécificité de la localité (forte production d'une spéculation particulière, par exemple) ;
- sur recommandation de guides ou personnes-ressources rencontrées sur le terrain ;
- recherche de documentation ;
- un mélange des paramètres cités ci-dessus.

Le tableau VII représente les localités enquêtées.

Tableau VII : Localités visitées lors des travaux de terrain

Critères	***Localités***	***Communes***
Proximité d'un lieu spécifique, Sur recommandation, Recherche de documentation Spécificité de la localité	*Banikoara Centre* *Koké* *Ounet* *Sonnou* *Tabenou* *Tinméringou* *Yambérou*	Banikoara
Sur recommandation	*Banougaoussou* *Bourougouma*	Gogounou
Recherche de documentation	*Kandi centre*	Kandi
Proximité d'un lieu spécifique	*Kargui*	Karimama
Proximité d'un lieu spécifique	*Fétékou* *Pikiré*	Kérou
Proximité d'un lieu spécifique	*Guéné*	Malanville
Proximité d'un lieu spécifique, Sur recommandation	*Gambinou* *Kika* *Nimgoussourou* *Pehunco – Centre* *Tobré*	Pehunco
Spécificité de la localité	*Guessébani* *Niaro* *Yarra*	Sinendé

Seule la commune de Bembèrèkè n'a pas été visitée lors des travaux de terrain. Ceci est essentiellement dû au fait qu'une faible partie de cette commune est incluse dans le bassin-versant de l'Alibori, et aussi du fait de la répétition de faits déjà observés dans d'autres localités. Enfin il faut ajouter qu'elle a aussi été prise en compte par des travaux antérieurs, (Gibigaye, 2003 ; Vissin, 2007 et Boko G., 2009).

La figure 18 illustre les localités enquêtées et points GPS enregistrés

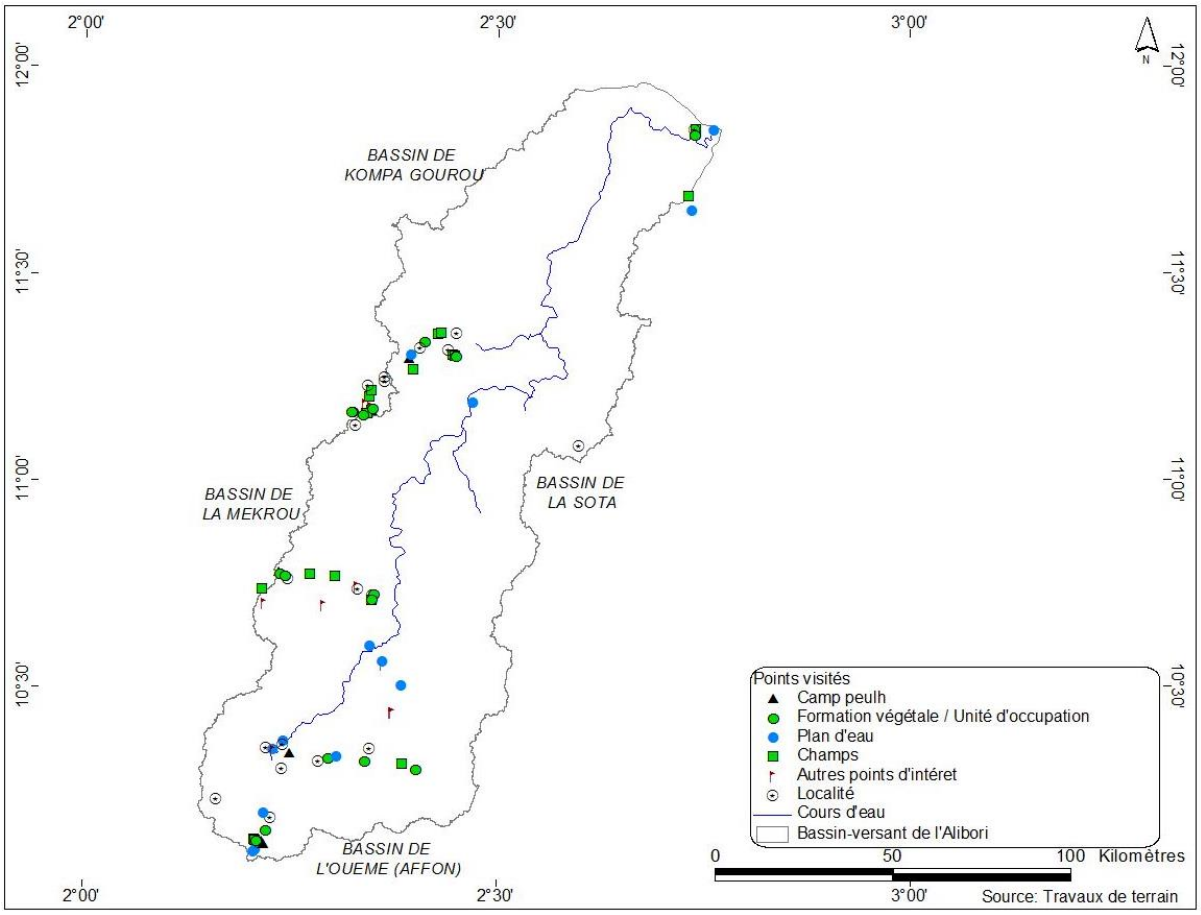


Figure 18 : Points GPS enregistrés au cours des travaux de terrain

L'inégale distribution des points s'explique par :

- l'existence de travaux antérieurs plus approfondis sur certaines parties de la zone d'étude,
- la répétition de phénomènes et de facteurs observés précédemment sur d'autres sites
- l'existence de zone de restriction d'accès (Parc W, par exemple).

Quant aux « débordements » (points situés hors du bassin) ils sont dus à la difficulté d'identifier sur le terrain les limites physiques de la zone d'étude.

Les travaux de terrain ont été réalisés avec différents outils selon les résultats souhaités. Les enquêtes socio-anthropologiques ont été réalisées avec des guides d'entretiens. Ces guides étaient destinés aux exploitants de ressources naturelles, notamment les agriculteurs et les éleveurs. Les agents des Centres Communaux de Promotion Agricole (CeCPA) et du Centre Régional de Promotion Agricole (CeRPA)

de l'Alibori ainsi que ceux de l'administration des Eaux et Forêts ont été aussi la cible d'entretiens.

La méthode d'enquête utilisée est le focus group. Cette méthode a été choisie pour deux raisons essentielles. La première est la littérature existant sur le secteur d'étude qui mentionne des paysages agraires spécifiques à chaque groupe socioculturel présent dans le milieu. Ensuite, les observations faites sur le terrain ont fait apparaître une certaine homogénéité dans les espaces cultivées et dans les spéculations en fonction du milieu, permettant de croire à l'existence de motivations homogènes (du moins à l'échelle de la localité) dans l'occupation de l'espace.

Pour organiser ces focus group, une fois arrivé dans une localité ciblée, le délégué ou le chef du village nous aidait à avoir les représentants du groupe-cible disponible (agriculteurs ou éleveurs). Le guide d'entretien est alors administré et les réponses sont traduites le cas échéant par un interprète, le plus souvent le secrétaire du Groupement Villageois (GV) de la localité. Une fois l'entretien conclu, nous nous rendions dans le campement Peuhl le plus proche pour le même exercice, mais avec un guide d'entretien pour les éleveurs.

Des visites de champs, d'aire protégée (si possible), de points d'eau et autres points d'intérêt (divinités locales, par exemple) étaient ensuite réalisées avec l'aide de guides mis à notre disposition par l'autorité locale.



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 14 : Réalisation d'un focus group à Pikiré

Au total, dix-neuf focus group ont été organisés dans treize localités réparties de façon disparate dans le secteur d'étude. Ces treize localités sont Tinminringou, Gambinou, Pikiré, Yambérou, Guessebani, Niaro, Kargui, Ouassa-Kika, Ningoussourou, Bourougouma, Yarra et Fétékou.

Une fois toutes les données et matériels nécessaires pour la réalisation du travail collectés, il a été procédé à leur traitement en utilisant des méthodes et techniques adaptées.

4. Traitement statistique des données climatiques

Afin de caractériser la variabilité climatique et de déterminer les tendances dans la zone d'étude, les données climatiques ont suivi des traitements statistiques. Ces derniers avaient pour objectif de calculer les paramètres qui permettront d'obtenir les résultats visés.

4.1. Les paramètres de tendance centrale

Le principal paramètre de tendance centrale utilisé ici est la moyenne arithmétique. Elle représente le centre d'un groupe de nombres dans une distribution statistique Elle a servi à caractériser les régimes pluviométriques et thermométriques dans le bassin-versant de l'Alibori sur la période de référence retenue. Sa formule est :

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x\, i$$

Dans le cadre de ce travail, les moyennes journalières, mensuelles, annuelles ainsi celle de la série utilisée ont été calculées. Ce qui a permis de caractériser l'état climatique moyen du milieu. La moyenne a aussi servi à calculer les paramètres de dispersion.

4.2. Les paramètres de dispersion

Deux paramètres de dispersion ont été calculés : l'écart-type et l'anomalie centrée réduite.

L'écart-type est une mesure de la dispersion des valeurs de l'observation autour de la moyenne (Groupe Chadule, 1994). C'est la racine carrée de la variance. Il est obtenu par la formule :

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

Selon Vissin (2007), l'écart-type constitue un excellent indicateur de variabilité.

Les anomalies centrées réduites sont calculées à partir de l'écart-type. Le but de la démarche est de normaliser (ou « standardiser ») les données à l'aide d'une transformation centrée réduite qui consiste simplement à centrer les données par rapport à leur moyenne et à les réduire par rapport à l'écart-type (Amoussou, 2010). L'anomalie centrée réduite est exprimée de la façon suivante :

$$xi \rightarrow zi = \frac{x - \bar{x}}{\sigma x}$$

L'anomalie centrée réduite appliquée aux données pluviométriques permet d'avoir les indices pluviométriques. Lorsque la valeur de l'indice calculé au pas de temps annuel est négative (inférieure à 0), l'année est considérée comme déficitaire ou sèche. Si cette valeur est supérieure à 0, c'est une année humide ou excédentaire. Enfin lorsque l'indice pluviométrique est égal à 0, on parle d'année moyenne ou normale (Idiéti, 2009).

Les anomalies centrées réduites ont été aussi calculées pour les températures pour caractériser leur variabilité temporelle.

Une fois les paramètres de dispersion calculés, les tendances climatiques ont été déterminées.

4.3. Mise en évidence des tendances

Pour déterminer les tendances, deux paramètres ont été utilisés : la moyenne mobile et la régression linéaire.

La moyenne mobile est un outil d'analyse qui prédit les valeurs d'une période en se basant sur la valeur de la variable pendant un nombre spécifique de périodes précédentes (Groupe Chadule, 1994). Elle fournit aussi une information sur la tendance qu'une simple moyenne pourrait masquer. La technique des moyennes

mobiles consiste à lisser les irrégularités en associant aux valeurs y_{ti} d'une chronique de nouvelles valeurs z_{ti} qui sont les moyennes arithmétiques d'une valeur originale y_{ti} et des valeurs qui l'encadrent (Vissin, 2007). Les moyennes mobiles peuvent être calculées suivant une période de trois (3) ans (une valeur de part et d'autre de y_{ti}) ou cinq (5) ans (deux valeurs de part et d'autre de y_{ti} (Yabi, 2008)). Dans la présente recherche, la moyenne mobile lissée sur cinq (5) ans a été choisie. Elle a permis de caractériser les variabilités pluviométrique et thermométrique par station. La moyenne mobile est obtenue par la formule :

$$F_{(t+1)} = \frac{1}{N}\sum_{J=1}^{N} t - j + 1$$

avec : *N* : le nombre de périodes précédentes à inclure dans la moyenne mobile
A_j : la valeur au temps *j*
F_j : la valeur prévue au temps *j*

Des moyennes mobiles sur cinq ans ont été calculées au pas de temps annuel pour les différentes stations dans le bassin. Le but est de réduire l'amplitude des variations interannuelles et de ne faire apparaître que les grandes tendances (Boko P., 2009). Cette méthode a permis d'avoir des séries hydrométriques et pluviométriques lissées pour les différentes stations aux pas de temps mensuel et annuel**.**

En outre, l'évolution sur le long terme est analysée par régression linéaire. Elle montre l'évolution linéaire sur le long terme et permet de détecter les tendances dans les séries utilisées. La méthode de régression consiste en une représentation graphique de droite de régression de type affine qui présente l'évolution linéaire et permet de déceler la tendance. L'équation de la droite de tendance est sous la forme :

$$y = ax + b$$

Avec *a* le coefficient directeur, représentant la pente et *b* une constante.

- Si a > 0, la tendance est à la hausse
- Si a < 0, la tendance est à la baisse (Idiéti, 2009)

Afin de mettre en évidence les différentes périodes (déficitaires, excédentaires ou normales), une technique de spatialisation inspirée de Paturel et *al.* (1995) a été utilisée. La période de référence utilisée (1965-2004) a été subdivisée en quatre décennies. Ces décennies sont : 1965-1974, 1975-1984, 1985-1994 et 1995-2004. Les moyennes des anomalies ont été calculées pour ces périodes pour chaque station. Les résultats obtenus ont été interpolés pour toute la superficie du bassin en utilisant le

module *v.surf.rst* du SIG GRASS. La cartographie des moyennes par décennie des indices annuels ainsi calculés traduit l'évolution dans le temps et dans l'espace de la variable étudiée tout en soulignant les zones tantôt déficitaires tantôt excédentaires.

4.4. Calcul du bilan climatique

Le bilan climatique permet de mettre en évidence l'évolution du climat à travers la différence entre les apports pluvieux et la demande en eau par évapotranspiration (Ogouwalé R., 2009). Il traduit la succession d'excédents et de déficits en eau dans le complexe. 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 (Hufty, 1976, cité par Vissin, 2007). Le bilan climatique exprime donc la différence entre la somme des abats pluviométriques et celle de l'évapotranspiration (Amoussou, 2010). La formule du bilan climatique est :

$$Bc = P - ETP$$

avec : Bc, le bilan climatique en mm, P la précipitation totale annuelle en mm et ETP, l'évapotranspiration potentielle totale en mm au même pas de temps que la pluviométrie.

Quand le bilan climatique est supérieur à zéro, il correspond à la partie de l'averse ayant pu raisonnablement donner lieu au ruissellement.

Ainsi :

- le bilan climatique est excédentaire si P > ETP;
- le bilan est déficitaire, si P < ETP;
- le bilan est équilibré quand P = ETP (Amoussou, 2010).

5. Traitement des données cartographiques

Les méthodes de traitement décrites ici aborderont essentiellement le processus d'interprétation et d'analyse des images satellites. L'analyse d'image satellites consiste en l'identification des objets ou éléments, sur une image. Ces éléments peuvent être des entités environnementales ou artificielles et consistent souvent en des points, des lignes (routes, fleuves) ou surfaces (formation végétale, installations humaines).

En général, les traitements d'image satellites sont séparés en deux phases : la phase de prétraitement et le traitement proprement dit.

5.1. Le prétraitement

Les techniques de prétraitement ont pu but d'améliorer l'image avant son analyse. Les opérations de prétraitement les plus courantes sont le géoréférencement et les corrections radiométriques (Orékan, 2008). Etant donné que la plupart des images satellites récentes sont géoréférencées avant d'être mise à disposition du public, cet aspect ne sera pas abordé ici.

5.1.1. Les corrections radiométriques

Les données satellites subissent des corrections radiométriques afin que chaque pixel représente la radiance apparente mesurée au capteur du satellite. Trois effets sont visés par les corrections radiométriques (Neteler et Mitasova, 2008) :

- *Les valeurs des pixels résultent souvent d'une transformation linéaire opérée par le fournisseur de l'image afin qu'elles tiennent dans un intervalle précis* (par ex. 0 – 255 pour les données 8 bits). En appliquant les valeurs de gains et biais (encore appelés compensation) fournies dans les fichiers d'entête, les valeurs des pixels peuvent être recalculées pour obtenir les valeurs de radiance captées par le satellite.

La radiance est calculée pour chaque bande présente dans la scène (excepté parfois pour les bandes 6). Pour ce faire, les données de gain/ biais disponibles pour chaque scène, sont utilisées. La formule spécifique aux images Landsat pour le calcul de la radiance spectrale varie selon les générations des satellites (Chander et *al.*, 2009).

Pour Landsat 7 ETM+ :

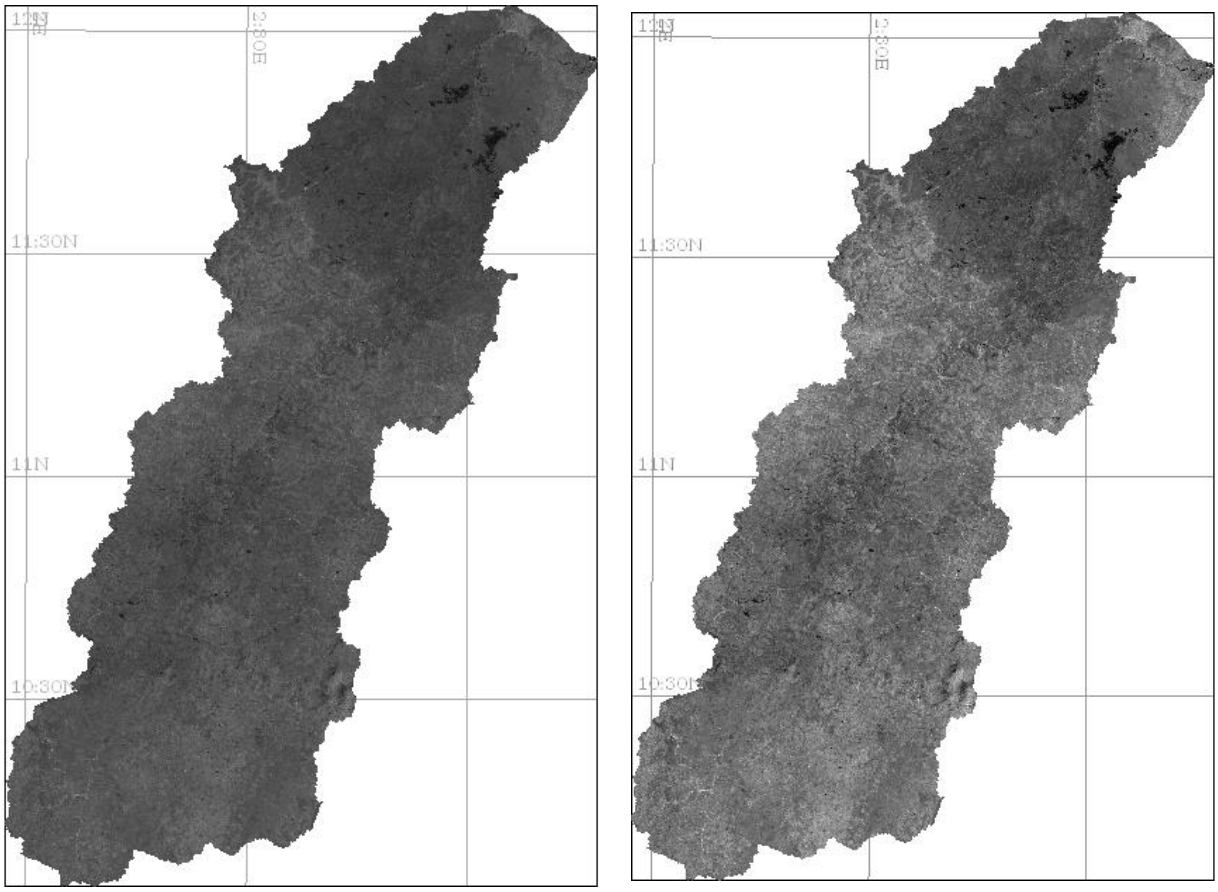
$$L_{\lambda=\left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{QCLAMAX - QCALMIN}\right)*(QCAL - QCALMIN)+LMIN_\lambda}$$

Pour Landsat TM, cette formule est légèrement modifiée :

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{QCALMAX}\right) * QCAL + LMIN_\lambda$$

Avec *LMAX* et *LMIN* les valeurs maximales et minimales de la radiance (fournies dans le fichier-entête accompagnant les images satellites)
QCALMAX et *QCALMIN* les valeurs maximales et minimales de l'image (souvent 255 et 1)
QCAL: l'image elle-même.

La figure 19 illustre le résultat de ce processus.



a *b*

Figure 19 : Bande 4 de l'image Landsat ETM+ du 24 octobre 2005

*En **a**, l'image brute, et **b** la radiance calculée. Sur l'image **b**, on distingue mieux les formes d'occupation. Les zones brûlées (tâches sombres au nord) sont plus visibles. On devine aussi le tracé de la rivière Alibori et le parc W (zone plus foncée au Nord).*

- *Les données optiques* : selon leur gamme spectrale, sont impactées par les effets de l'atmosphère. Afin de reconstruire les valeurs réelles de réflectance des objets à la surface de la terre, chaque bande doit subir une correction atmosphérique.
- *Lorsque l'espace photographié par le capteur est montagneux ou légèrement accidenté*, les pentes peuvent causer des modifications dans l'intensité de la réflectance (effets liés au terrain), qui peuvent mener à des erreurs lors des classifications. Pour corriger ce problème, une correction basée sur les pentes dérivées d'un MNT peut être appliquée.

L'utilisation de ces différentes corrections varie en fonction du projet, du type de l'image et des éléments observés. Seules les deux premières ont été utilisées dans le cadre du présent travail.

5.2. Le traitement proprement dit

Le traitement proprement dit comporte plusieurs parties : l'amélioration visuelle de l'image, la composition colorée et la fusion d'image, la classification, l'analyse multi-temporelle, la segmentation et la reconnaissance des entités. Ces différentes opérations peuvent être regroupées en deux phases. On distingue les phases de traitement visuel qui comporte les opérations visant à améliorer la qualité de l'image (amélioration visuelle, composition colorée, fusion d'image). Dans la seconde phase, on retrouve les traitements visant à extraire l'information recherchée.

5.2.1. La phase de traitement visuel

Etant donné la multitude de réponses spectrales provenant d'un nombre varié d'objets présents dans une image (forêts, plans d'eau, déserts, habitations, etc.), aucune correction radiométrique ne peut favoriser un contraste et une intensité optimale pour chaque objet.

L'amélioration visuelle consiste en un ensemble d'opérations visant essentiellement à améliorer la qualité visuelle de l'image en augmentant le contraste entre les éléments de la scène. Les techniques d'amélioration visuelle dépendent essentiellement de deux facteurs :

- les données numériques, c'est-à-dire les bandes spectrales et la résolution
- et l'objectif visé à travers l'interprétation.

Elles ne sont utilisées que pour l'interprétation visuelle (ou manuelle) mais pas pour des analyses approfondies. Les techniques d'amélioration les plus couramment utilisées comprennent le ratio de bande, le filtre spatial, l'agrandissement, l'amélioration de contraste par ajustement d'histogramme, la transformation de Fourier, l'analyse en composante principale (ACP) et la transformation de texture.

La technique d'amélioration utilisée ici est l'amélioration de contraste par ajustement de l'histogramme. L'histogramme de l'image est une représentation graphique des différentes valeurs d'intensité qui composent l'image (figure 20).

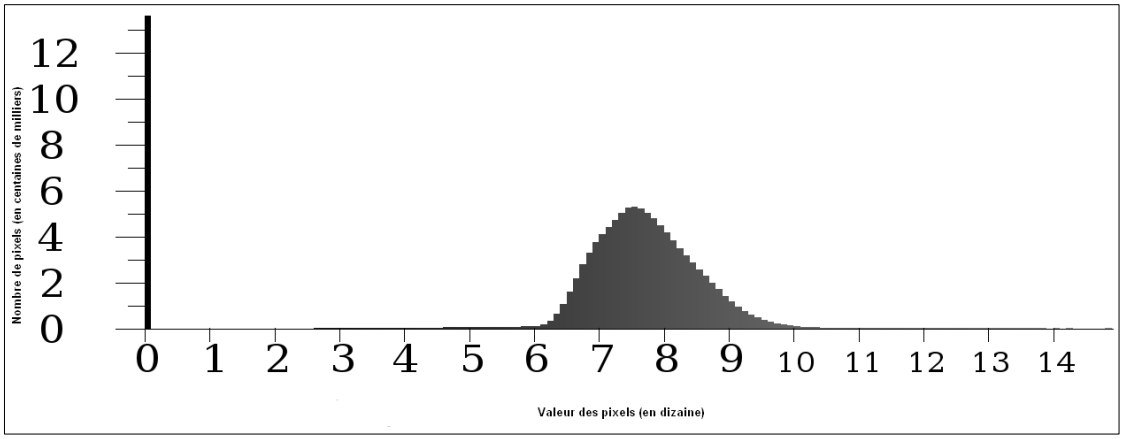


Figure 20 : Histogramme de la bande 4 de la scène Landsat 7 du 24 octobre 2005

L'axe des abscisses comporte les valeurs des pixels en dizaine et l'axe des ordonnées le nombre de pixels en centaine de milliers. On constate que toutes les valeurs de 0 à 255 ne sont pas comprises dans l'image.

On procède alors à un réétalement linéaire en affectant à la valeur 0, la valeur minimale réelle de l'image et 255 à la valeur maximale réelle pour bénéficier de toute la profondeur d'affichage disponible (Robin, 2002). La figure 21 résume le processus de cette opération.

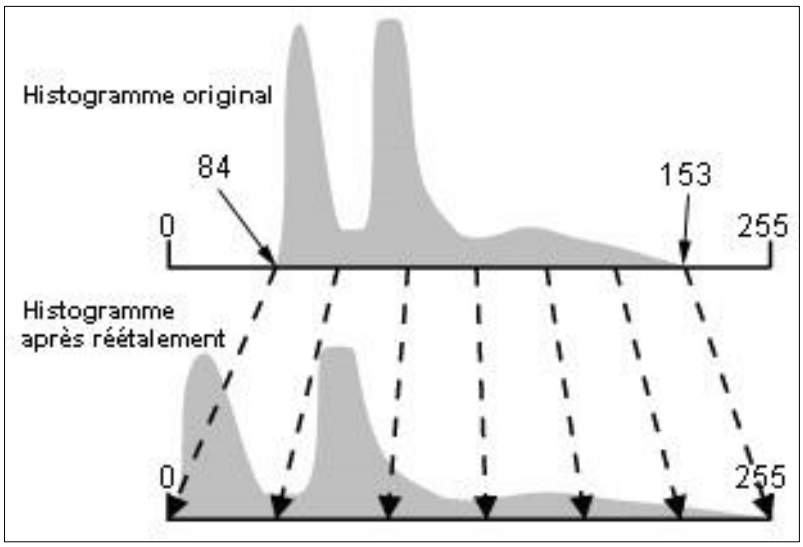
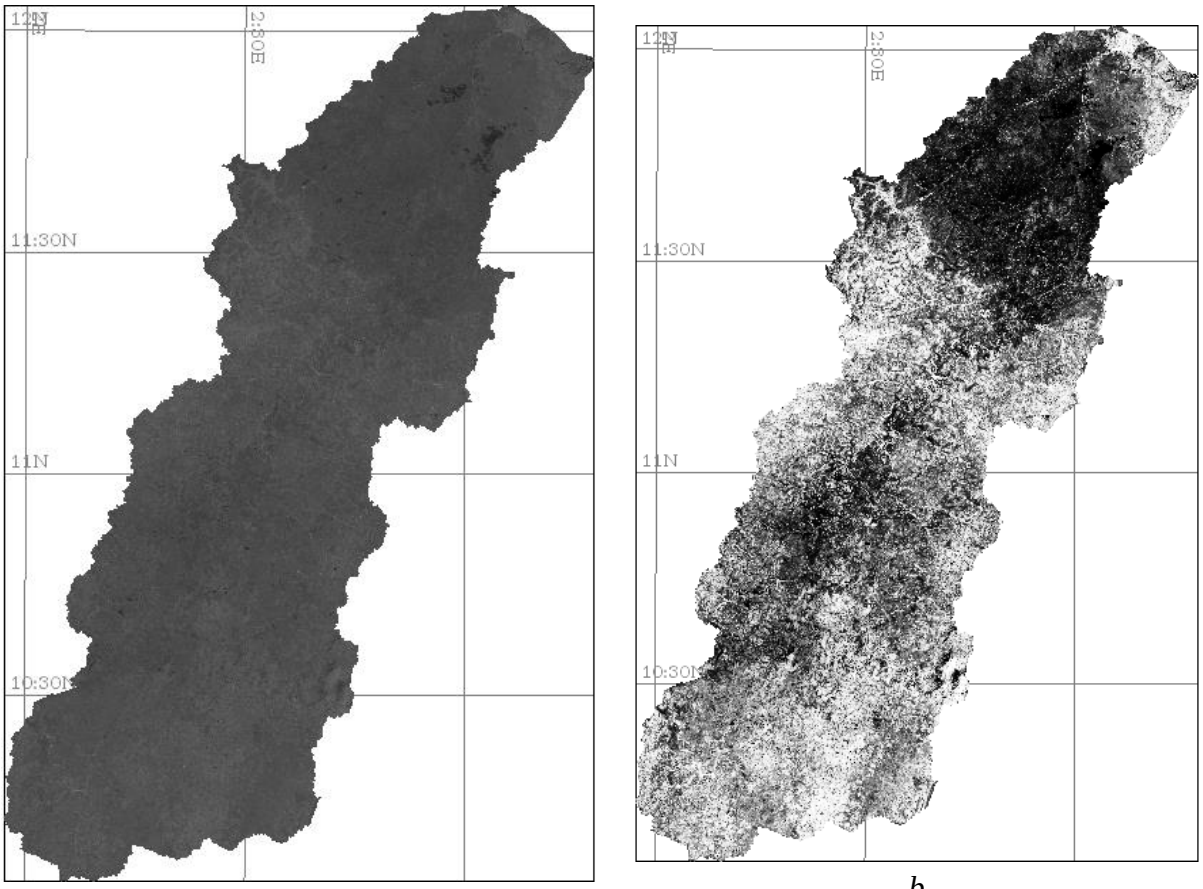


Figure 21 : Processus de réétalement d'histogramme

Source : Mitasova et Neteler, 2008

La figure 22 illustre le résultat obtenu suite à cette opération.



a *b*

Figure 22 : Résultat d'une amélioration par réétalement

Cette technique a été appliquée à toutes les images utilisées avant de faire les différentes compositions colorées.

La composition colorée requiert la connaissance basique des signatures spectrales des différents objets photographiés afin de savoir dans quelle longueur d'onde chaque objet émet la meilleure réponse spectrale. La figure 24 donne un aperçu des réponses spectrales de quelques entités.

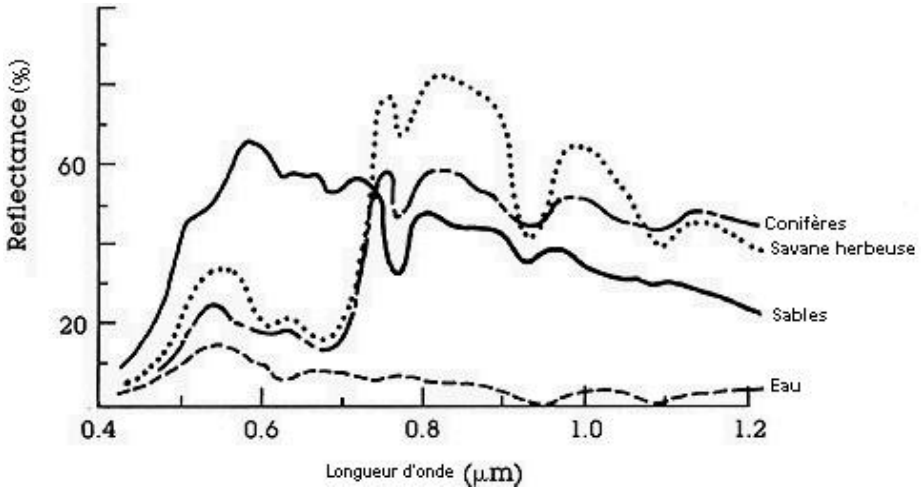


Figure 23 : Signatures spectrales de quelques entités

Source : Mitasova et Neteler, 2008

Cette figure permet de remarquer que l'eau et le sable ont une meilleure réflectance dans le visible (entre 0,4 et 0,7µm) tandis que la végétation se reflète plus dans le proche infrarouge (0,7 et 1,1µm).

Dans le SIG GRASS, le module *i.oif* permet, par une analyse de covariance, de proposer la composition idéale en fonction du phénomène à étudier. Les compositions permettant de mettre en évidence les différentes formations végétales ont été retenues en plus de la composition en vraies couleurs.

En plus des différentes bandes, on peut utiliser aussi des ratios de différentes bandes, ce qui permet d'obtenir des indices de végétation. Un indice de végétation est une combinaison linéaire des canaux qui est utilisée principalement pour estimer la densité du couvert végétal, différencier les grandes unités naturelles ou culturales et entreprendre dans certains cas la prévision des récoltes. Les courbes de réflectance d'un végétal vert et d'un sol nu montrent que les plus grandes différences de réflectance entre deux bandes s'observent dans les longueurs d'onde correspondant au rouge et à l'infrarouge.

Plus de quarante indices de végétation ont été développés dans divers domaines par les chercheurs en télédétection pour différents besoins (Footsing, 2009). Ces indices peuvent être regroupés en fonction de plusieurs critères parmi lesquels : l'utilisation qui en est faite, le nombre de bandes combinées et les opérations de bases appliquées aux canaux (Hudak et *al.*, 2005). Pour cette étude, c'est l'indice de végétation normalisé (NDVI, Normalised Difference Vegetation Index) qui a été utilisé.

La différenciation d'image basée sur les indices de végétation, est une technique couramment employée pour la détection des changements dans l'occupation du sol (Singh, 1989). L'indice NDVI, qui est la différence normalisée des valeurs d'intensité des bandes du rouge et du proche infrarouge, est peu affecté par les facteurs topographiques. De plus, l'histogramme de la bande NDVI présente une distribution normale facilitant la détection des changements dans l'occupation du sol.

La formule qui permet d'obtenir la NDVI est :

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

Avec :
PIR : bande du proche infrarouge
R : bande du rouge

Le résultat est une carte en format raster dont les valeurs varient de -1 à 1. La valeur minimale correspond aux espaces comportant moins de chlorophylle (plans d'eau). La valeur maximale correspond inversement aux espaces où l'absorption dans les bandes du rouge et de l'infrarouge est élevée. La figure 24 représente un extrait de la carte de la NDVI de la région de Kandi.

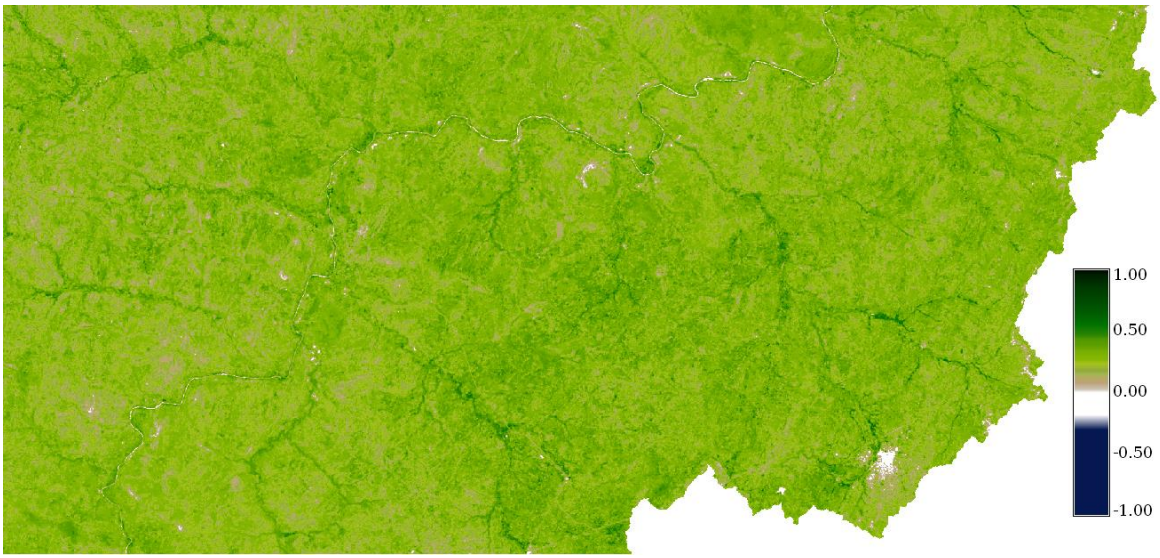


Figure 24 : Extrait de la carte de la NDVI de la région de Kandi

Sur cet extrait, les forêts-galeries apparaissent en vert foncé tandis que la ville de Kandi (au sud) apparaît en blanc.

Les deux formes de composition colorée (vraies couleurs et fausses couleurs) ont été utilisées pendant le traitement des images. Les différentes compositions utilisées sont illustrées par les figures ci-dessous.



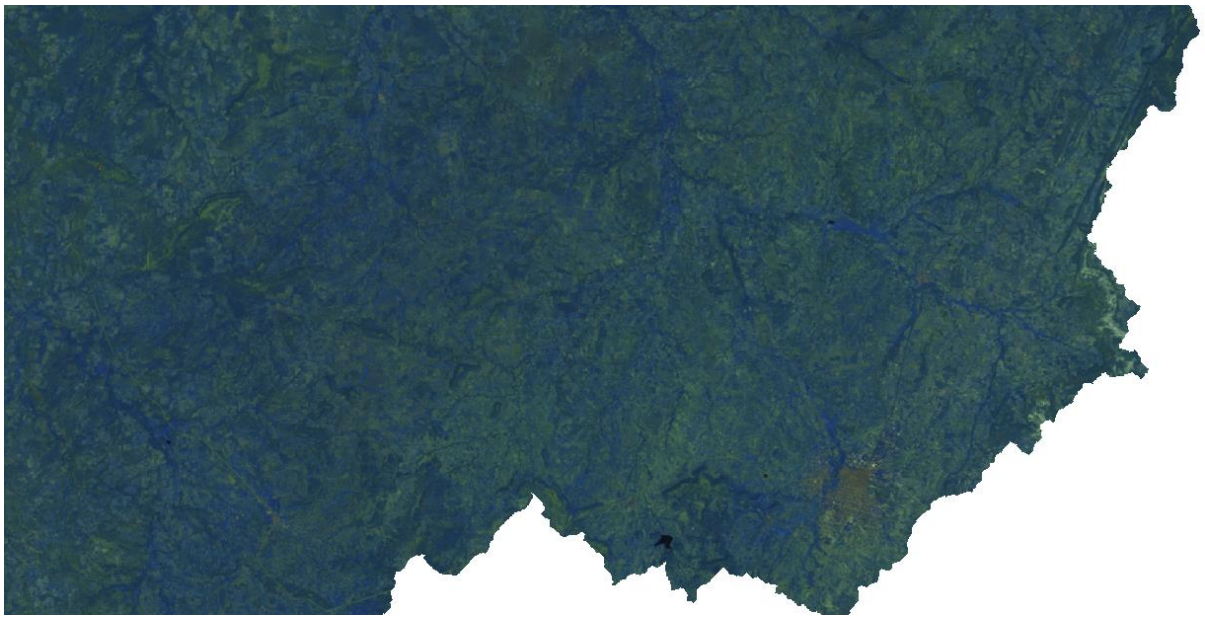
a



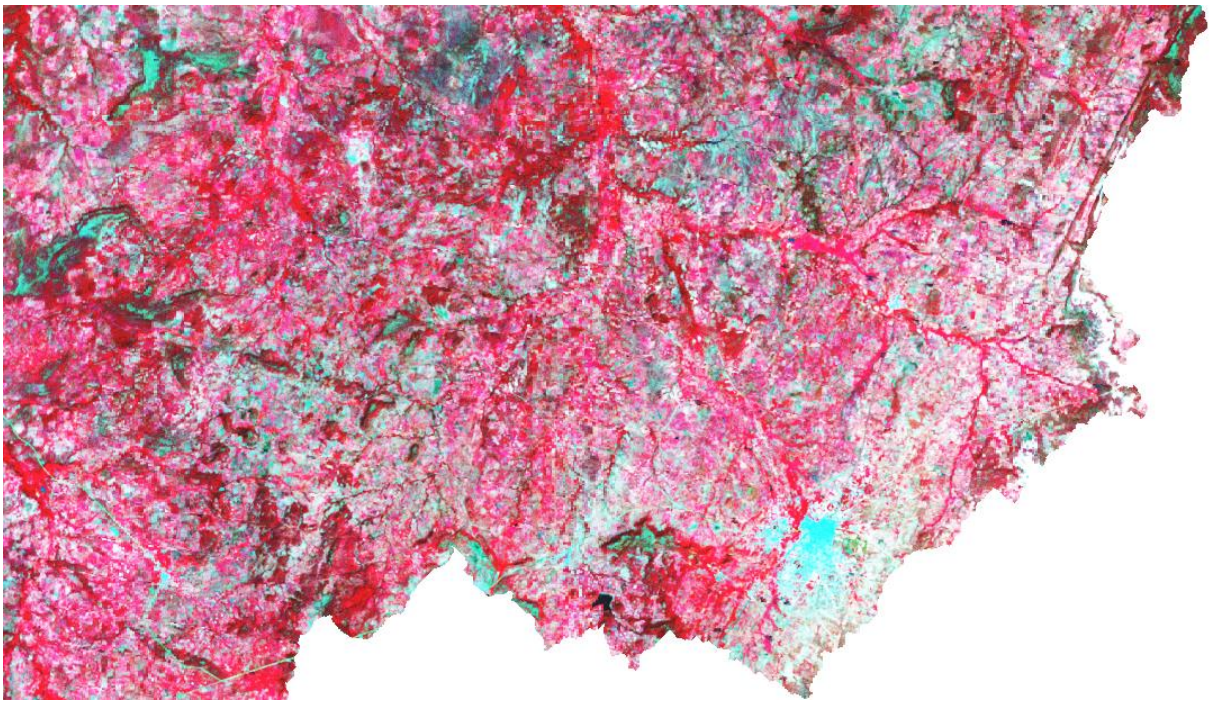
b

Figure 25 : Compositions en 3-2-1 (vraies couleurs) de la région de Kandi

*En **a**, les trois bandes sont superposées sans traitement préalable. A cette échelle, seules les parties qui absorbent le plus de lumière (plan d'eau, forêts denses et forêts galeries) ainsi que celles qui reflètent plus la lumière (villes) sont facilement distinguées. En **b**, la même composition, mais après un réétalement d'histogramme et une correction atmosphérique. On distingue la ville de Kandi en bas à droite (tâche blanche) et d'autres installations humaines (à l'ouest et au sud-est).*



a



b



c

Figure 26 : Trois compositions colorées en fausses couleurs

La figure ci-dessus représente trois différentes compositions en fausses couleurs. En ***a****, il s'agit d'une composition en 754. Elle est utilisée pour les différentes classes de texture du sol. La composition* ***b*** *est un 432, la végétation y est représentée en rouge. Les forêts denses sont en rouge foncé tandis que les formations décidues ont un ton rouge clair. Les routes et les plans d'eau ont une couleur claire (comme la ville de Kandi au Sud sur l'image). Enfin en* ***c****, il s'agit d'une composition utilisant un ratio d'image, en l'occurrence la NDVI. Les bandes composant cette image sont 5-NDVI et 2. Elle permet de différencier plusieurs formes d'occupation du sol. Les installations humaines apparaissent en bleu clair, les cours d'eau en bleu foncé tandis que les forêts galeries sont rouges vif. Les savanes naturelles apparaissent en rose et les espaces cultivés (champs, jachères et savane à emprise agricole) sont en bleu clair (mais plus sombre que celui des installations humaines). Les formations de forêt sont vertes.*

Le dernier traitement d'amélioration utilisée est le pansharpening. Il consiste en l'amélioration de la résolution des différentes bandes des images Landsat. Cette technique utilise la bande 8 panchromatique dont la résolution est de 14,5 m. Pour ce faire, on utilise une composition classique Rouge Vert Bleu (RVB) qu'on transforme en une composition Intensité Teinte Saturation (ITS). Ensuite, on procède à la manipulation inverse. Autrement dit, on transforme la composition ITS en RVB mais avec cette fois-ci la bande panchromatique à la place de l'intensité. Dans le résultat obtenu, les couches Rouge et Bleu ont désormais une résolution identique à celle de la panchromatique.

Une fois les traitements visuels achevés, les opérations d'extraction d'information sont implémentées.

5.2.2. L'extraction de l'information

L'extraction de l'information a été réalisée à l'aide d'une classification supervisée. Cette dernière a été appliquée sur une composition en fausses couleurs 5-NDVI-2 (voir figure 27 ci-dessus). La classification est une opération dont le but est d'identifier des groupes de pixels homogènes et les combiner en entités. Dans ce cas-ci, ces entités représentent des formes d'occupation du sol. Il existe trois types de classifications :

- la classification non supervisée : elle est réalisée de façon automatique avec un logiciel de traitement d'images ;
- la classification supervisée : Elle est réalisée « manuellement » à partir de l'interprétation des images ;
- la classification hybride : il s'agit d'une classification non supervisée sur laquelle l'utilisateur réalise des corrections en fonction de sa connaissance du terrain. Elle est un compromis entre les deux autres méthodes (Liu et Mason, 2009).

C'est la classification supervisée qui a été utilisée dans le cadre de ce travail. Le processus d'implémentation de la classification supervisée est expliqué ci-dessous.

5.2.3. La classification supervisée

Le principe de la classification d'une image est d'utiliser les éléments d'interprétation visuelle afin d'identifier des groupes homogènes de pixels qui représentent différentes entités ou des formes d'occupation.

Les éléments d'interprétation visuelle sont : la taille, la forme, le ton (ou nuance), la couleur, la texture, le motif, le voisinage et parfois l'ombrage (selon la résolution de l'image).

Il faut distinguer les classes spectrales et les classes d'information. Les classes spectrales sont des groupes de pixels qui ont une signature spectrale identique ou proche tandis que les classes d'information sont des groupes homogènes de pixels qui représentent différentes entités d'occupation.

Pour réaliser une classification supervisée on crée une carte appelée carte d'entraînement. Cette carte comporte des points dont la forme d'occupation est

connue avec exactitude par l'utilisateur. Après avoir déterminé le nombre de formes d'occupation à prendre en compte, on réalise la carte d'entraînement en numérisant sur une composition colorée, un certain nombre de pixels pour chaque type de formation identifiée. Entre dix et quinze zones d'entraînement par unité d'occupation identifiée sont nécessaires, en fonction de la taille de l'espace de travail (Liu et Mason, 2009). Ces zones d'entraînement fonctionnent à la manière d'un emporte-pièce en ce qu'elle traverse toutes les couches d'image spectrale et en extrait les valeurs pour chaque spectre. Ces valeurs spectrales sont ensuite utilisées pour créer la signature de l'unité d'occupation. Cette signature est sous la forme d'une distribution de probabilité statistique en autant de dimensions qu'il y a des images sélectionnée ('n' dimensions). La distribution de probabilité est calculée en utilisant l'approche dite de la vraisemblance maximale

Ces signatures sont ensuite appliquées à la combinaison utilisée. Les valeurs spectrales de chaque pixel (une valeur par spectre) sont adaptées au catalogue de signatures et à chaque pixel est attribuée une valeur de probabilité d'appartenance à chaque unité d'occupation, selon sa situation dans la distribution de la probabilité à n dimensions.

Habituellement, le pixel correspondant de l'image de la zone d'entraînement est affecté à l'unité qui a la plus forte probabilité (figure 27). Cette forme de décision est souvent qualifiée de « classification dure » car elle ne tient pas compte de l'incertitude. Toutefois, les probabilités peuvent être utilisées dans d'autres façons de créer des cartes qui reflètent l'incertitude de la classification (par exemple, grâce à une classification dite floue).

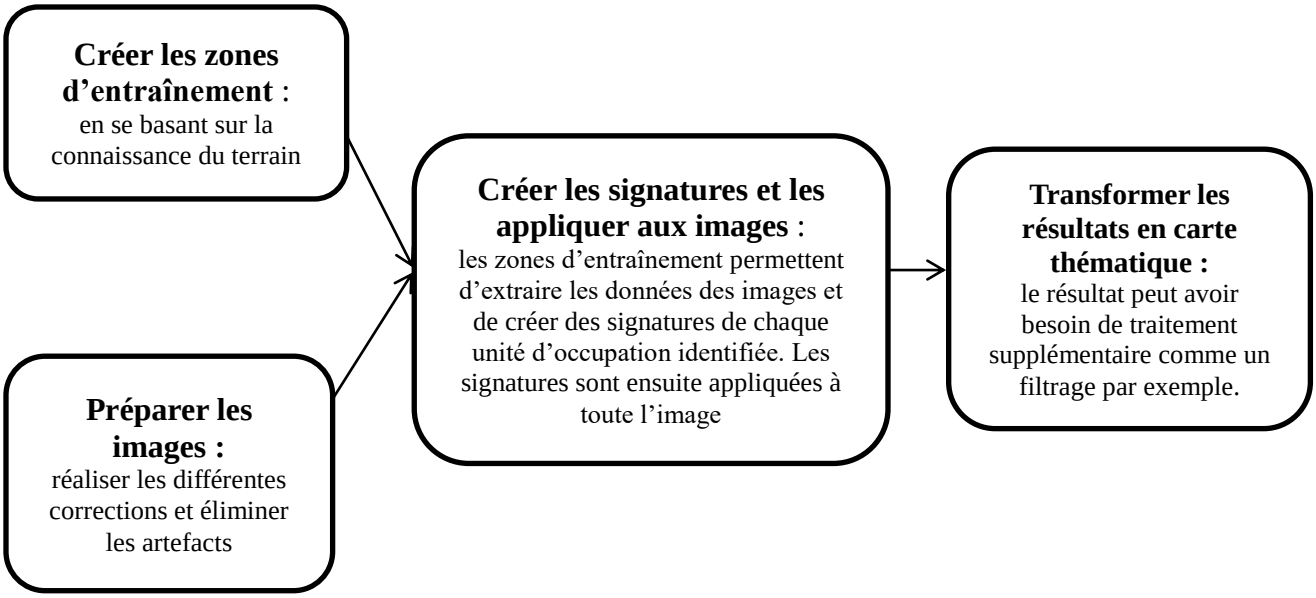


Figure 27 : Processus de classification supervisée

Source : Robin, 2002

Repérer une unité homogène et s'en servir dans une procédure de classification supervisée paraît être la démarche la plus simple (Boulahouat et Naert, 1996). Il n'en est concrètement rien : l'hétérogénéité du terrain est telle qu'il faut multiplier les points de contrôle et augmenter la superficie des parcelles d'entraînement, en effet, les parcelles de contrôle, vu leur petite taille, ne se sont pas montrées particulièrement utiles pour tenter de comprendre les causes de l'association de plusieurs unités de végétation dans une même classe ou la dispersion de l'une d'elles entre plusieurs classes, en effet, une incertitude affecte les pixels mixtes traversés par la limite entre deux unités et rend la limite des unités difficiles à déterminer avec exactitude. (Belkheiri, 2003).

La classification supervisée requiert une connaissance approfondie du terrain ainsi qu'une certaine expertise en matière de lecture d'images satellites. A cette fin, le tableau VIII a été utilisé pour l'interprétation des images.

Tableau VIII : Clé d'interprétation d'images satellites

Forme	Tonalité	Texture	Structure	Objet identifié
Irrégulière	Moyennement gris	Peu granuleux et peu lisse	Granulé et lisse	Savane arborée
Irrégulière	Gris assez sombre	Très peu lisse et assez granulé	Granulé et lisse	Savane boisée ou forêt claire
Sinueuse	Gris sombre	Floconnée	Assez homogène	Galerie forestière
Sinueuse	Gris sombre	Lisse	Homogène	Cours d'eau
Sinueuse	Très claire	Lisse	Homogène	Route ou piste
Régulière	Assez claire	Lisse	Homogène	Champs et jachères
Irrégulière	Gris clair	Très peu granulé	Homogène	Savane arbustive
Irrégulière	Très clair	Lisse	Homogène	Sol nu ou affleurement rocheux

Source : CENATEL

Ce tableau prend en compte quatre des éléments d'interprétation cités plus haut. La clef d'interprétation des images Landsat est disponible sur le site web http://biodiversityinformatics.amnh.org/landsatkey/landsatkey.php.

Les travaux de terrain effectués ont permis de prendre les coordonnés de points qui illustrent le mieux les différentes entités devant figurer dans les cartes d'occupation du sol. Ces coordonnées ont été utilisées lors de la création des zones d'entraînement pour la réalisation de la classification supervisée.

L'objectif final de la classification supervisée est d'affecter tous les pixels de l'image à des classes ou des thèmes particuliers (ex.: eau, forêt dense, savane herbeuse, champs, etc.) L'image résultante classée est composée d'une mosaïque de pixels, qui appartiennent chacun à un thème particulier, et est essentiellement une « carte » thématique de l'image (ou du groupe d'images) originale.

5.3. Validation des résultats

En matière d'occupation du sol, la méthode la plus courante pour l'évaluation et la validation des résultats obtenus est l'utilisation de l'indice de Kappa de Cohen. Cet indice est souvent utilisé pour évaluer les similarités entre les résultats obtenus et ceux prévus. Il est calculé en utilisant un tableau de contingence (ou tableau de confusion) qui décrit la distribution des classes de la carte de référence par rapport à

la carte des résultats. C'est la carte de vérité-terrain qui est utilisée comme carte de référence (Visser, 2004). La forme générique du tableau de contingence est présentée ci-dessous.

Tableau IX : Forme générique de la matrice de confusion (matrice de contingence)

		Classes de la carte des résultats				TOTAL
		1	2	…	c	
Classes de la carte de référence	1	P_{11}	P_{12}	…	P_{1}c	P_{1T}
	2	P_{21}	P_{22}	…	P_{2c}	P_{2T}
	…	…	…	…	…	…
	c	P_{c1}	P_{c2}	…		P_{cT}
TOTAL		P_{T1}	P_{T2}	…	P_{Tc}	1

Source : Visser, 2004.

La formule suivante est utilisée pour calculer l'indice Kappa de Cohen.

$$\kappa = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

Où P(A) représente la correspondance observée entre les classes et P(E) la probabilité hypothétique de correspondance.

D'après Pontius (2000), une étude sur l'occupation du sol peut être considérée comme valide si l'indice Kappa obtenu est compris entre 50 et 75%. Pour Landis et Koch (1977), cet indice est excellent quand il est égal à 0.81; bon quand il est compris entre 0.80 - 0.61. Il est modéré quand il est compris entre 0.60 - 0.21; mauvais quand il est compris entre 0.20 - 0.0 et très mauvais quand il est inférieur ou égal à 0.0. Dans ce dernier cas, on considère qu'il n'y a aucune correspondance entre les deux cartes.

C'est le module *r.kappa*, implémenté dans le SIG GRASS qui a été utilisé pour calculer cet indice. Cette méthode a été aussi appliquée aux cartes obtenues après exécution du modèle CLUE-S afin de vérifier la précision des simulations effectuées.

6. Présentation du modèle CLUE

6.1. Bref aperçu historique

Le modèle CLUE (Conversion of Land Use and its Effects – Changements dans l'occupation du sol et ses conséquences) a été créé pour simuler les changements dans l'occupation du sol en utilisant les relations – quantifiées par des méthodes

empiriques – entre l'occupation du sol et ses facteurs en combinaison avec une modélisation dynamique de la compétition entre les différentes unités d'occupation. (Veldkamp et Fresco, 1996, Verburg et *al.* 1999b). Le modèle initial a été créé par Tom Veldkamp et Louise Fresco en 1996, pour des applications aux échelles nationales et continentales. Les versions ultérieures seront développées par Peter Verburg de l'Université de Wageningen (Pays-Bas) en collaboration avec d'autres collègues à travers le monde.

Les premières applications du modèle seront faites pour l'Amérique Centrale, l'Equateur, la Chine et l'île de Java (Indonésie). Pour une application sur des surfaces aussi étendue, des résolutions grossières (au-delà du kilomètre) ont été utilisées. Au cours de ces différentes applications, les concepteurs font un constat : les travaux en matière de changement d'occupation du sol pour les petites surfaces, sont souvent basés sur des données telles que les cartes d'occupation ou les images satellites et autres photographies aériennes qui indiquent les formes d'occupation par des pixels classifiés ou des polygones homogènes. Ramenés à des échelles plus grossières, il en résultait que ces surfaces ne présentaient qu'une seule unité d'occupation. De ce fait, le modèle CLUE ne pouvait pas être directement utilisé à l'échelle régionale. L'approche de modélisation sera alors modifiée et renommée CLUE-S (Conversion of Land-Use and its Effects at Small regional extent – Changements dans l'occupation du sol et ses conséquences à l'échelle locale). Cette version du modèle a été conçue pour une simulation essentiellement spatiale des changements dans l'occupation du sol, basée sur une analyse empirique des relations observées à une date antérieure tout en prenant en compte les propriétés du système d'utilisation de l'espace. Il s'agit notamment des compétitions entre formes d'utilisation de l'espace, politiques ou restrictions spatiale et zonage de l'espace (Verburg et *al.* 1999b, Fotsing, 2009). L'autre différence majeure entre les deux modèles, c'est l'approche de modélisation elle-même. Alors que CLUE partait des facteurs à l'échelle nationale vers le local (top-down), CLUE-S adopte l'approche inverse. Les facteurs sont recherchés à l'échelle locale et permettent de faire une généralisation à l'échelle nationale (bottom-up) (Verburg et *al.* 1999b ; Castella et *al.*, 2007 ; Verburg et Overmas, 2009).

Différentes versions du modèle ont été développées au fil du temps, en fonction des besoins. On distingue CLUE, CLUE-S, Dyna-CLUE et la plus récente, CLUE-Scanner créée en 2011. Dans ce travail, c'est la version Dyna-CLUE qui a été utilisée.

Il n'a malheureusement pas été possible de trouver une explication ainsi qu'une méthodologie détaillée de l'utilisation de Dyna-CLUE. Quant à CLUE-Scanner, c'est une version assez récente qui n'est pas encore accessible au grand public. La méthodologie appliquée ici est celle de CLUE-S, qui a été généralisée aux versions ultérieures du modèle.

6.2. Structure du modèle

La description du modèle CLUE a déja été réalisée dans plusieurs études antérieures (Verburg et *al.*, 1999b ; Verburg et *al.*, 1999a ; Engelsman, 2002 ; Orekan, 2007 ; Fotsing, 2009, etc.). Le modèle CLUE est essentiellement composé de deux modules : un module d'analyse des aspects non-spatiaux et un module d'affectation spatiale. Ces deux modules fonctionnent respectivement à un niveau régional (la zone d'étude) et au niveau du pixel (Engelsman, 2002).

Le module non-spatial calcule les changements dans les superficies occupées par chaque type d'unité d'occupation. Au sein du second module, ces demandes sont traduites en des changements dans l'occupation à différents endroits (sélectionnés en fonction des facteurs de localisation) de la zone d'étude (figure 28). Le logiciel éponyme fourni pour l'implémentation du modèle ne gère que l'aspect spati*al*. Pour les aspects concernant l'analyse non-spatiale, l'utilisateur est libre d'utiliser les outils qu'il juge les mieux adaptés en fonction du milieu d'étude et de ses spécificités. Les résultats cette analyse doivent préciser, au pas de temps annuel, la superficie occupée par chaque type d'unité d'occupation, ceci étant une des variables utilisées lors de l'analyse spatiale.

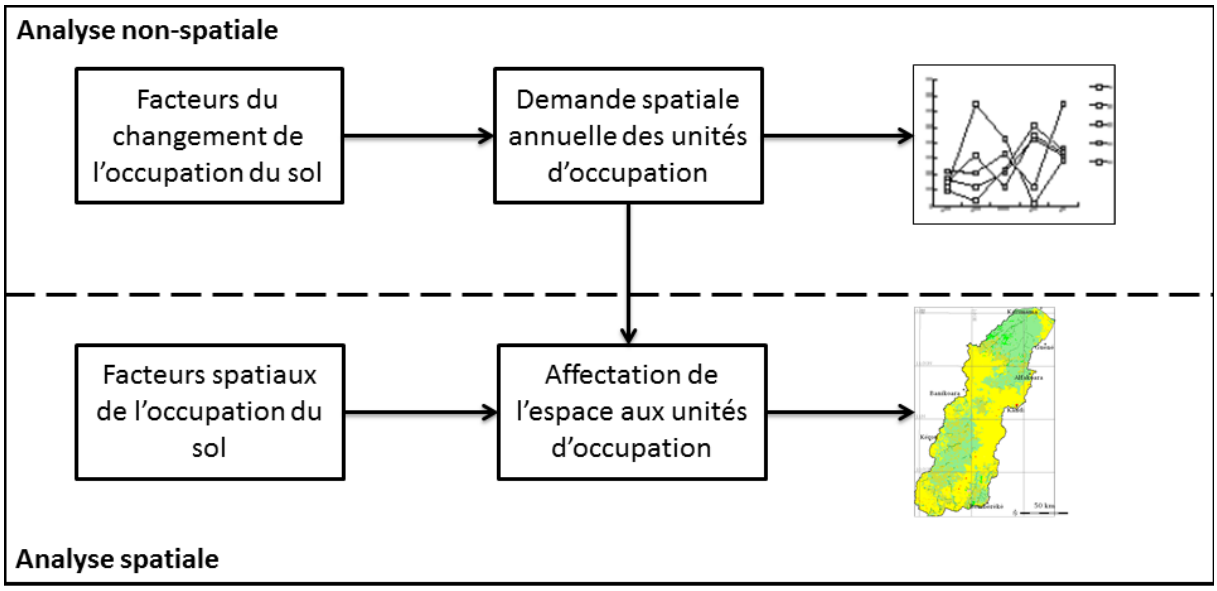


Figure 28 : Struture du modèle CLUE-S

Source : Verburg et *al.* (2002)

6.3. Processus de modélisation

L'utilisation du modèle CLUE vise à réaliser une analyse spatiale et multi-échelle des relations à la base de la dynamique de l'occupation du sol. Le processus démarre à partir d'une carte d'occupation du sol et consiste essentiellement en deux étapes. D'abord l'occupation du sol passée et présente est analysée à différentes échelles spatiales en utilisant une méthode de régression multiple. Cette méthode permet de déterminer les facteurs socioéconomiques et bio-géophysiques ainsi que les relations entre ces facteurs et l'étendue des différentes unités d'occupation.

A la seconde étape, les relations quantitatives ainsi établies sont intégrées dans un modèle au sein duquel l'évolution future de l'occupation du sol peut être spatialement simulée. Cette simulation est réalisée en utilisant divers scenarii d'évolution qui prennent en compte les éventuels changements au niveau des différents facteurs ainsi que d'autres paramètres aussi variés que la demande nationale en produits agricoles, entre autres.

Au cours de la simulation spatiale, l'affectation des terres aux différents types d'unité d'occupation est réalisée sur la base d'une combinaison comprenant analyse spatiale et modélisation dynamique et empirique. La figure 29 donne un aperçu des différentes données et informations nécessaires pour réussir cette simulation.

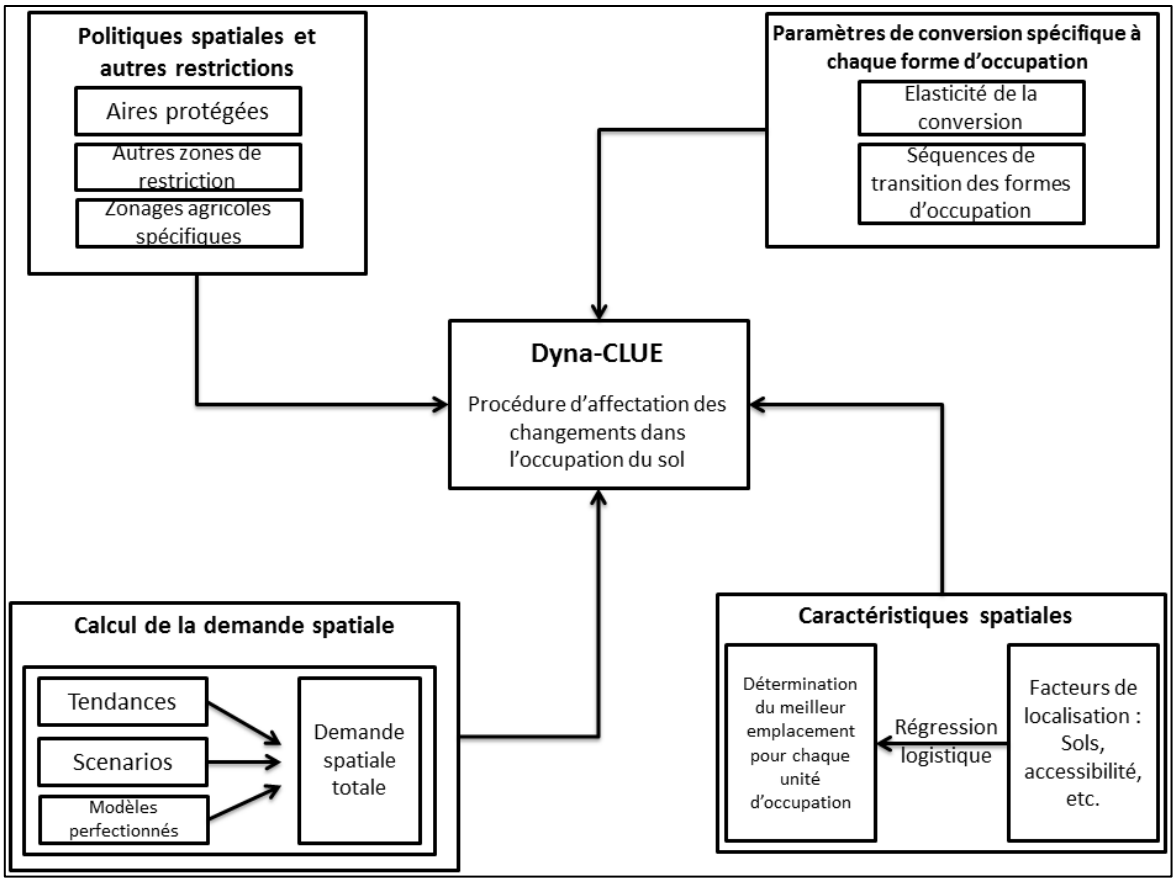


Figure 29 : Vue d'ensemble du flux de données dans le modèle CLUE

Source : Verburg et Veldkamp (2004)

Ces différentes informations sont subdivisées en quatre catégories (figure ci-dessus), qui ensemble créent un ensemble de conditions et possibilités pour lesquelles le modèle calcule le meilleur résultat à travers un processus itératif. Les quatre catégories sont les politiques et autres restrictions spatiales, les paramètres de conversion spécifiques à chaque forme d'utilisation, le calcul de la demande spatiale et les caractéristiques spatiales.

6.3.1. Les politiques et autres restrictions spatiales

Il s'agit essentiellement des zones où les modifications dans l'occupation du sol sont interdites où restreintes, à travers l'application de politique spatiale spécifique ou de régime foncier particulier. Certaines politiques spatiales interdisent toute possibilité de changement dans l'occupation, comme dans les aires protégées ou les réserves. D'autres politiques se contentent de limiter les différents usages possibles dans une région donnée. Il peut s'agir aussi d'un type de spéculation agricole (zone tampon du parc W, par exemple), comme d'un type de construction (en milieu urbain par exemple). Ces informations sont fournies au modèle sous la forme d'une carte.

6.3.2. Les paramètres de conversion spécifiques à chaque forme d'occupation

Les informations classes dans cette catégorie permettent de déterminer la dynamique temporale des simulations. Deux paramètres sont utilisés pour caractériser chaque type d'unité d'occupation. Il s'agit de l'élasticité et de la séquence de transition.

L'élasticité est liée au caractère réversible du changement dans l'occupation du sol. Une élasticité relative ($ELAS_u$) comprise entre 0 et 1 est définie pour l'utilisation de l'espace considérée sur la base des connaissances du système agraire ou lors de la calibration du modèle. Trois possibilités sont envisageables :

- $ELAS_u$ = 1 lorsque les transitions sont difficiles ou impossibles après la première conversion (cas des installations humaines ou des plantations),
- $ELAS_u$ = 0 lorsqu'il n'existe aucune restriction au changement
- 0 < $ELAS_u$ <1 pour le cas des utilisations de l'espace opérant entre les deux extrêmes (exemple des surfaces soumis à la culture itinérante sur brulis).

Plus la valeur de l'élasticité sera élevée, plus il sera difficile de convertir cette unité d'occupation (Fotsing, 2009).

La séquence de transition, quant à elle, le paramètre qui permet de spécifier les différentes conversions possibles pour chaque type d'unité d'occupation ainsi que la durée de ces conversions. Ces informations sont transcrites dans une matrice de conversion qui définit :

- en quelle autre unité d'occupation une unité peut être convertie (figure 30) ;

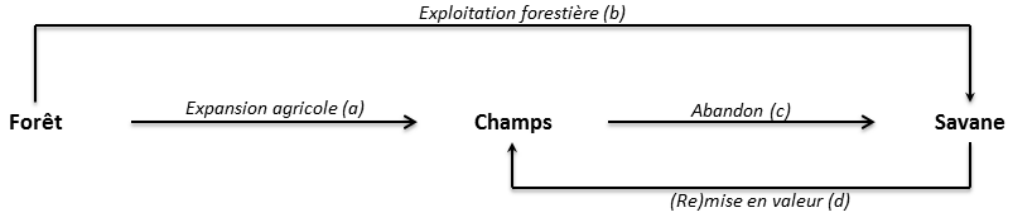


Figure 30 : Séquence probable de transition dans l'occupation du sol

Source : Verburg et *al.* (2002)

- à quels endroits une conversion spécifique peut survenir et à quels autres cette conversion n'est pas possible ;
- combien de temps une unité d'occupation peut rester stable avant d'être transformée en une autre unité ;

- le nombre d'années maximum qu'une unité d'occupation peut rester en un endroit spécifique (cas des espaces cultivés dans un système de culture itinérante).

Tableau X : Exemple de matrice de conversion des quelques unités d'occupation

Futur probable / *Etat actuel*	*Forêt*	*Champ*	*Savane*
Forêt	+	**+(a)**	**+(b)**
Champs	-	+	**+(c)**
Savane	-	**+(d)**	+

Source : Verburg et *al.* 2002

Ce tableau va de pair avec la figure 30. Les lettres entre parenthèses se réfèrent à celles de la figure. On peut donc déduire à la lecture des deux que :

- une forêt peut évoluer vers champ (suite à une évolution du front pionnier), une savane (suite à une exploitation forestière) ou simplement demeurer une forêt (soit par mesures conservatoires ou par inexploitation humaine). Mais aucune des types d'occupation ne peut évoluer vers une forêt ;
- un espace cultivé (champ) peut soit, rester dans le même état, soit devenir une savane suite à un abandon,
- une savane peut devenir un espace cultivé, suite à une exploitation ou à une remise en valeur après un abandon ; mais elle peut aussi rester dans le même état.

La lecture de la matrice montre également que les auteurs du modèle excluent dont toute éventualité d'une réversibilité du processus de déforestation.

Le modèle possède une option qui permet de gérer les cas de changements autonomes éventuels.

Le nombre d'années minimum et maximum avant une conversion éventuelle doit être indiqué dans la matrice de conversion. La période exacte étant fonction de différents facteurs et conditions, le modèle se chargera lors de la phase de simulation de déterminée cette période à l'aide de ces différentes informations.

6.3.3. Le calcul de la demande spatiale

La demande spatiale peut être définie comme la superficie qu'occupera une unité d'occupation au cours de la simulation en prenant en compte les différents facteurs intégrés comme paramètres du modèle. Le module d'estimation de la demande spatiale fait partie des aspects statistiques de la modélisation et est réalisé hors du modèle. La demande spatiale peut être estimée mathématiquement. Cette estimation peut être réalisée à partir de simples extrapolations, ou de modèles macroéconomiques complexes. Les résultats obtenus sont utilisés comme input pour la modélisation (Engelsman, 2002). Ceci permet une restriction de la simulation en précisant la surface totale requise par une forme d'occupation spécifique. A travers la littérature (Orékan 2007, Arouna, 2012), plusieurs formules ont été proposées pour extrapoler l'évolution spatiale d'une unité d'occupation, généralement en partant de deux années différentes. Certaines plus complexes prennent même en compte les comportements socioéconomiques et environnementaux de la population du milieu (Fotsing, 2009). Dans le cas de ce travail, la formule suivante a été utilisée.

$$r_u = \left[\left(\frac{A_1}{A_0}\right)^{1/t} - 1\right] \times 100$$

Avec :
r le taux d'évolution de l'unité d'occupation *u*,
A_1, la superficie occupée par l'unité pour l'année la plus récente,
A_0 la superficie occupée par l'unité pour l'année la plus ancienne,
t l'écart temporel (en année) pour les deux années considérées.

Le résultat obtenu avec cette formule est le pourcentage d'évolution de l'unité d'occupation au pas de temps annuel. Ces pourcentages calculés pour chaque unité d'occupation destinée à évoluer au cours de la simulation, sont ensuite appliqués pour connaître la demande spatiale desdites unités pour chaque année à simuler.

6.3.4. Les caractéristiques spatiales

Les changements dans l'occupation du sol sont supposés survenir à des endroits « favorables » à une unité d'occupation spécifique à un moment précis. Le caractère favorable est défini par le résultat de l'interaction entre les différents acteurs et les processus de prise de décision qui ont mené à une configuration spatiale précise. Ce caractère est estimé de façon empirique à partir d'un ensemble de facteurs issus de la

connaissance de la problématique locale relative à l'occupation du sol (Verburg, 2002).

L'analyse quantitative de la relation entre l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants est effectuée afin d'identifier les facteurs qui se combinent pour influencer significativement la distribution spatiale de chaque utilisation et mesurer l'importance de chaque facteur dans cette interaction. Le modèle de régression logistique est adapté pour ce type de problème où la variable dépendante est de type binaire (Agresti et Finlay, 1997). Le modèle de régression logistique est un modèle linéaire généralisé (et donc paramétrique) dans lequel la variable réponse est qualitative. Ce type de modèle qui permet de faire la prédiction d'une variable dépendante en tenant compte d'un ensemble d'informations issues de variables explicatives (Hosmer et Lemeshow, 1989). Pour un type d'occupation i ayant n facteurs déterminants, le modèle de régression multiple peut alors être défini comme suit (Verburg, 2002 ; Engelsman, 2002 ; Orékan 2007 ; Fotsing, 2009) :

$$Log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \cdots + \beta_n X_{n,i}$$

Où $\boldsymbol{P_i}$ représente la probabilité pour un pixel de devenir l'unité d'occupation considérée, et les $\boldsymbol{X}$ sont les facteurs déterminants. $\boldsymbol{\beta}$ représente le coefficient affecté à chaque facteur, estimé lors de la régression logistique, en utilisant l'occupation actuelle comme variable.

Cette fonction représente les conditions à remplir pour un pixel donné. Les pixels ayant donc la plus haute probabilité sont affectés à l'unité d'occupation correspondant lors de la simulation. Cette méthode permet d'intégrer un grand nombre de facteurs dans le modèle, les moins significatifs étant automatiquement au cours de la régression logistique.

L le logiciel SPSS a été utilisé pour obtenir les modèles de régression logistique pour chaque unité d'occupation. Ces modèles ont été calculés en deux étapes. La première étape consiste à construire des régressions simples entre les unités d'occupation et toutes les variables identifiées. Pour limiter les effets de multi-colinéarité, certaines variables sont exclues du modèle lorsqu'elles sont a priori redondantes avec d'autres variables. Une régression logistique binaire simple est utilisée à cette étape (Garson, 2001 ; Fotsing, 2009).

La seconde étape consiste à sélectionner les variables qui contribuent plus significativement à l'explication de la structure et les changements de l'unité

d'occupation. Les informations utilisées sont les paramètres statistiques des régressions simples réalisées précédemment et les connaissances disponibles sur les processus modélisés. Les trois paramètres statistiques sur lesquels s'appuie la sélection sont : le sens de la corrélation déterminé par le signe du coefficient βi, la signification statistique de la corrélation et le pouvoir explicatif de la variable (Fotsing, 2009). Une régression multiple pas à pas est utilisée au cours de cette seconde étape. Le niveau de signification statistique a été fixé à 0,01, soit un coefficient de confiance de 99% bien qu'en général, une valeur de 0,05% est considérée comme significative. Cette valeur a été choisie pour rester en conformité avec celle recommandée par les concepteurs du modèle CLUE (Verburg et *al.*, 2002).

6.4. Evaluation du modèle de régression logistique

Afin d'obtenir de s'assurer de la performance des modèles de régression obtenus par la méthode décrite ci-dessus, il est nécessaire d'évaluer le pouvoir explicatif de la variable, représenté par la valeur ROC ou Relative Operating Characteristics.

La valeur ROC est une mesure de la qualité de la régression logistique tout comme le coefficient de détermination R^2 de la régression linéaire. La valeur de la variable dépendante peut être prédite « positive » ou « négative » si la probabilité prédite est supérieure ou inférieure à une probabilité seuil dont le choix dépend des besoins de précision du modèle. La méthode est basée sur les proportions de « vrai positif » et de « faux positif » (tableau XI). Ce tableau illustre la probabilité d'occurrence d'une unité d'occupation donnée. L'occurrence de cette unité d'occupation (événement) est considérée comme « positive » et la non-occurrence comme « négative ». Le diagnostic représente la prédiction faite par rapport à cette occurrence.

Tableau XI : Tableau de contingence deux à deux

Evénement / Diagnostic	Positif	Négatif	Total
Positif	Vrai Positif [A]	Faux Positif [B]	A + B
Négatif	Faux Négatif [C]	Vrai Négatif [D]	C + D
Total	A + C	B + D	

Source : Engelsman, 2002

Il existe deux probabilités pour qu'un événement positif ou négatif s'accorde avec la prédiction. La première est le vrai-positif (A) et la seconde le vrai-négatif (D). Les éventualités B et D représentent les probabilités de désaccord : le faux-positif (B) et le

faux négatif (C). La valeur ROC est calculée en utilisant les proportions de vrai-positif (A/A+C) et de faux-positif (B/B+D) respectivement sur l'axe vertical et l'axe horizontal (Orékan, 2008). L'efficacité du modèle est mesurée en termes de surface en-dessous de la courbe. Les valeurs varient de 0,5 à 1. Lorsque la valeur est égale à 0,5 les proportions de vrai-positif et faux-positif sont égales. On en déduit que le modèle de régression obtenu ne prédit pas mieux les changements que n'importe quelle autre approche. Si la valeur est égale à 1 (la proportion de vrai-positif est égale à 1 tandis que celle de faux-positif est égale à 0), le modèle est alors parfait, ou il s'agit d'un cas d'autocorrélation. Bien entendu, l'idéal est d'obtenir une valeur proche de 1 (Pontius, 2001 ; Engelsman, 2002).

L'avantage de cette approche est qu'il est possible de comparer des modèles construits pour la même variable mais avec des facteurs différents. Elle permet aussi la comparaison de modèle prédisant différentes variables.

6.5. Processus d'allocation spatiale

Une fois les différents paramètres estimés et introduits dans le logiciel, le modèle calcule à un pas de temps discret, les changements les plus probables dans l'occupation du sol, en tenant compte des restrictions et autres conditions fixées lors de la phase de définition des données. La figure 31 résume le processus tel qu'appliqué par le modèle lors de l'allocation spatiale.

Le processus d'allocation se déroule selon plusieurs étapes. La première étape est de déterminer tous les pixels susceptibles de modification. Trois types de pixels sont exclus de cette phase. Il s'agit :

- des pixels situés dans une zone de restriction (aire protégée par exemple) ;
- des pixels occupés par une unité d'occupation où des changements ne peuvent survenir (plan d'eau, inselberg, installations humaines) ;
- des pixels localisés dans l'emprise d'un type d'unité d'occupation ne pouvant plus changer à cause de la configuration de la matrice de conversion.

Les pixels répondant à un de ces critères ne sont pas pris en compte lors de cette première phase.

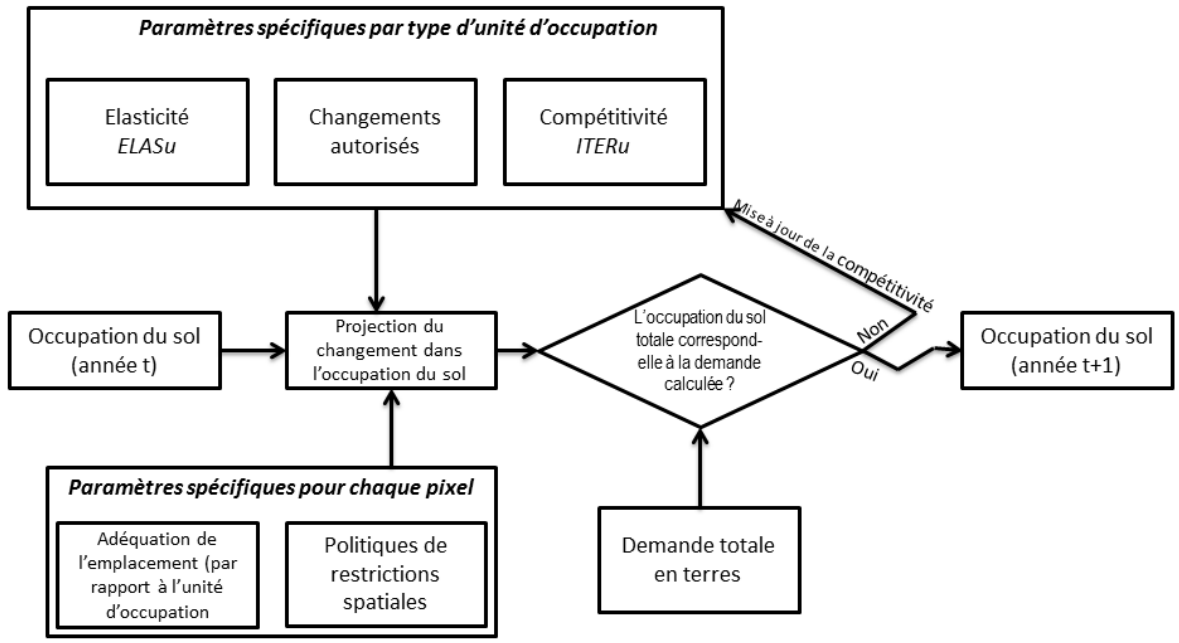


Figure 31 : Processus d'allocation spatiale du modèle CLUE-S

Source : Verburg et Veldkamp (2004)

Au cours de la seconde étape, pour chaque pixel, la probabilité totale est calculée pour chaque forme d'occupation à partir de la formule :

$$TPROP_{i,u} = P_i + ELAS_u + ITER_u$$

Avec :
***TPROP*$_{i,u}$** *la probabilité totale calculée,*
***Pi**, la probabilité du pixel de se transformer en une forme d'occupation donnée (estimée antérieurement par le modèle de régression),*
***ELAS*$_u$** *l'élasticité de l'unité d'occupation u ; et*
***ITER*$_u$** *est une variable itérative de l'unité d'occupation et révélatrice de la compétitivité de l'unité d'occupation*

Après cette étape, une première allocation est faite pour toutes les formes d'occupation avec une valeur de ITER égale pour elles toutes. Les pixels ayant donc les probabilités les plus élevées par rapport à une forme d'occupation spécifique sont donc convertis en cette dernière en prenant en compte les changements autorisés ou non dans la matrice de conversion. Suite à cette étape, des changements dans l'occupation du sol seront intervenus au niveau d'un certain nombre de pixels.

Enfin, lors de la quatrième étape, la demande totale calculée annuellement pour chaque forme d'occupation est comparée à celle allouée lors de l'étape précédente. Si la superficie allouée est inférieure à la demande, la valeur de l'itération ($ITER_u$) est augmentée. Si cette superficie est inférieure, l'itération est réduite. Il est donc possible au cours de cette procédure que l'itération prédomine sur la probabilité

calculée à l'aide de la régression logistique.

Les trois dernières étapes sont répétées aussi longtemps que les demandes ne sont pas correctement allouées. Quand la superficie affectée est égale à la demande, la carte finale est sauvegardée et la simulation continue avec l'année suivante ou le mois suivant selon le pas de temps défini.

Tout ce processus se déroule au sein du modèle sans intervention externe de l'utilisateur, pour peu que les paramètres soient justes et les données introduites correctes.

6.6. Préparation des données

Le modèle CLUE est souvent défini comme essentiellement spatial (Fotsing, 2009). De ce fait, la plupart des paramètres sont introduits sont sous un aspect spatial, c'est-à-dire de carte. Mais le modèle étant composé aussi d'un module statistique, des outils supplémentaires ainsi que des travaux sans aspect spatial direct s'avèrent indispensables.

Les changements dans l'occupation du sol sont fonction d'une multitude de facteurs socioéconomiques et biophysiques. Par conséquent, la modélisation de ces changements requiert une base de données de déterminants plus ou moins importants selon le cas. Le contenu de cette base de données diffère selon les cas. Toutefois, il est établi que pour exécuter le modèle, le minimum requis est une carte d'occupation du secteur d'étude. Dans le cas où une calibration du modèle serait prévue, alors il faut au minimum les cartes d'occupation de deux années différentes avec un écart d'au moins dix ans.

Pour la simulation de la dynamique de l'occupation du sol, les données requises sont souvent relatives aux paramètres biophysiques et socioéconomiques considérées comme les facteurs à la base de ladite dynamique. Ces facteurs sont généralement des variables qui décrivent la démographie, le sol, la géomorphologie, le climat et les infrastructures (Verburg et *al.*, 2002).

6.6.1. Conception des cartes

Si l'aspect spatial du modèle est reconnu, les cartes à introduire sont dans un format spécifique et requiert des opérations précises avant le processus de modélisation proprement dit. Les cartes d'occupation du sol utilisées pour la simulation passent d'abord par un premier processus : la généralisation.

En effet, sur une carte d'occupation du sol il est possible de dénombrer plus d'une dizaine de formes d'occupation. Le but de la généralisation est de réduire ces formes d'occupation afin de faciliter le processus de modélisation. Dans le cadre de cette étude, cinq (5) formes d'occupation ont été retenues pour la simulation : les champs (terme retenu pour toutes les zones cultivées et les jachères), les localités (toutes les installations humaines) les forêts (terme regroupant les différentes formations végétales d'origine naturelle), les plans d'eau et les inselbergs (terme retenu pour désigner aussi bien les formes de relief où toute culture est impossible, que les autres milieux inaptes à toute forme d'occupation) et les aires protégées. Par la suite, les plans d'eau et les inselbergs ont été regroupés dans la même catégorie (surfaces non cultivables), réduisant à quatre (4) le nombre final d'unités d'occupation.

Ensuite, les quatre unités d'occupation dont l'évolution sera simulée par la modélisation ont été extraites. Les aires protégées ne sont certes pas supposées évoluer au cours de la simulation, mais représentant des zones de restrictions, elles ont été extraites pour être introduite dans le modèle à cette fin. Une fois les cartes extraites pour chaque unité d'occupation, il faut enfin les recoder en binaire. Il s'agit de remplacer toutes les valeurs présentes dans les cartes par les chiffres 1 et zéro (0). Les pixels représentant l'unité d'occupation se voient attribuer la valeur 1 et tous les autres pixels ont la valeur 0. Ceci est fait pour toutes les unités d'occupation. Les cartes représentant des zones de restriction sont recodées différemment. Pour ces dernières, trois valeurs sont utilisées : 0 pour tous les pixels actifs (représentant autre chose que les zones de restriction), -9999 pour les pixels sans valeur le cas échéant, et -9998 pour les pixels situés dans les zones de restriction. Les modules *r.recode* et *r.reclass* de GRASS ont servi à réaliser ces différentes opérations.

Il est inutile de préciser ici que ces différentes cartes doivent être en format matriciel (raster), le format vectoriel ne gérant pas les pixels.

Le modèle CLUE-S n'acceptant les données que sous le format ASCII (American Standard Code for Information Interchange, « Code américain normalisé pour l'échange d'information ») autrement sous forme de texte but, toutes les cartes (facteurs déterminants, unités d'occupation et zones de restriction) ont été converties sous ce format à l'aide du module *r.out.arc* de GRASS. Une fois ces conversions terminées, les cartes sont prêtes à être utilisées comme input pour le module statistique du modèle.

6.6.2. Conception et format des données : le module statistique

Le choix des paramètres à introduire dans le modèle nécessite une connaissance approfondie de la zone d'étude. La détermination des facteurs à la base de l'occupation s'est faite suivant deux approches complémentaires. La première consiste en des travaux de terrain, essentiellement des enquêtes dont le processus a déjà été décrit au chapitre précédent. Les résultats obtenus ont permis d'avoir une première série de facteurs déterminants potentiels.

Comme signalé plus haut, les données doivent être introduites sous forme de carte. De ce fait tous les paramètres identifiés, mais ne pouvant pas être spatialisés n'ont pas été exploités dans le processus de modélisation.

Ce dernier commence d'abord par le traitement statistique des données à l'aide du module File Converter installé simultanément avec le logiciel CLUE-S (fig. 32a). Les différentes cartes converties sont copiées dans le dossier où le modèle est installé. Ensuite, elles sont intégrées dans le module via le fichier *name.txt*, présent dans le dossier d'installation, où les noms entiers des cartes sont insérés, à raison d'un fichier par ligne (fig. 32b) ou directement dans le module.

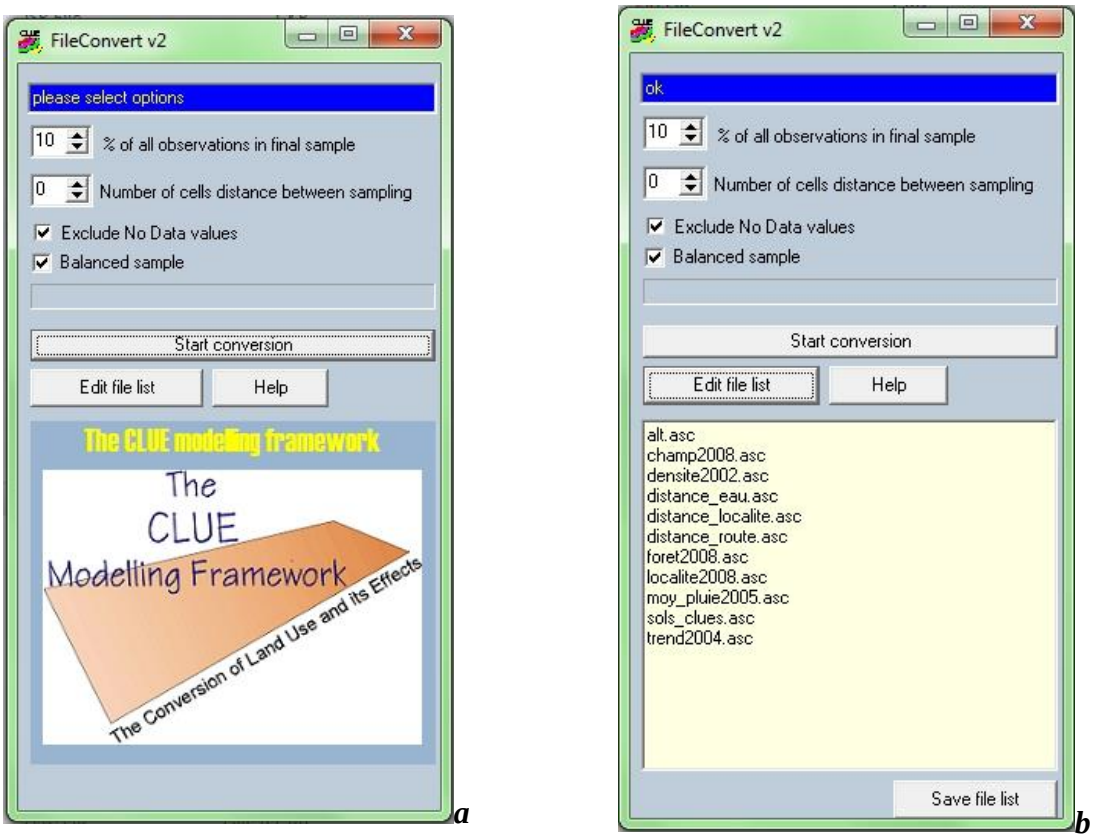


Figure 32 : Interfaces du module File Converter

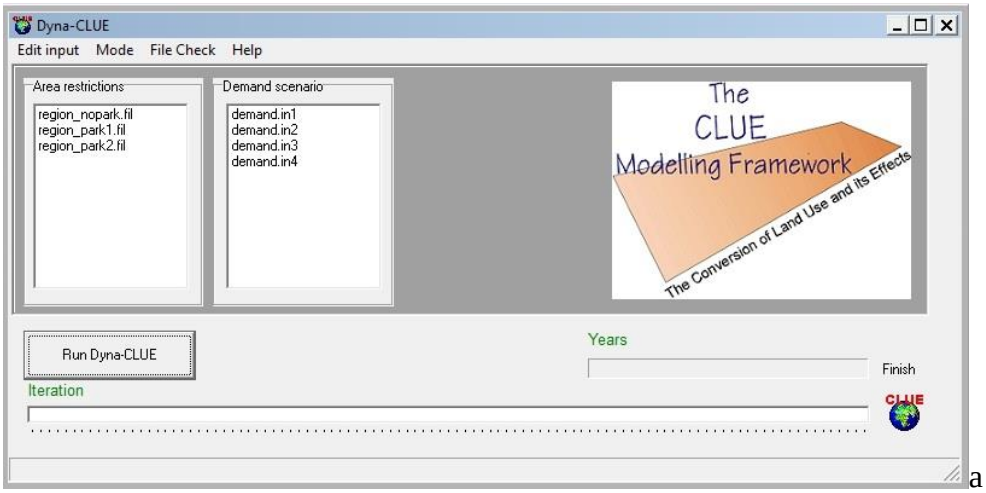
*Sur la figure ci-dessus, en **a**, il s'agit de l'interface du module à son lancement. En **b**, le même module, avec la liste des fichiers déjà introduite.*

Une fois la liste prête, avec tous les noms correctement introduits (la moindre erreur de saisie entraîne un blocage du processus sans aucune information sur la cause du blocage), on démarre la conversion. Le module produit un fichier tabulaire nommé *stat.txt* qui va être utilisé pour les analyses de régression logistique.

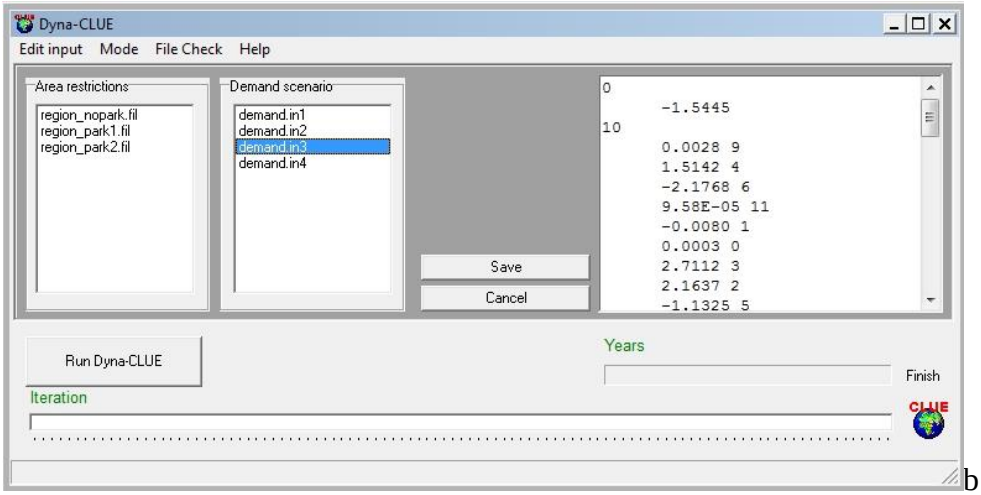
Le but d'une analyse de régression logistique est de répondre à un problème du genre : l'apparition d'un phénomène Y dépendant de plusieurs variables X_1, X_2, X_3, … X_n ; lesquelles de ces variables prédisent le mieux le comportement de Y ? On distingue plusieurs types de régression logistique. Dans le cadre de ce travail, une régression logistique de type binaire a été utilisée. Cette régression a été choisie du fait du nombre peu élevé de facteurs spatialisables pris en compte. Les facteurs non significatifs (ayant un coefficient nul) sont automatiquement éliminés. Les résultats obtenus sont des modèles Logit de régression pour les trois différentes formes d'occupation.

6.7. Le logiciel CLUE : interface et paramètres requis pour la simulation

Comme énoncé plus haut, le modèle CLUE comporte deux modules. Le convertisseur de fichiers ayant été présenté plus haut, on s'attardera ici sur le module principal, où est réalisé l'essentiel du travail de simulation. La figure 34 donne deux aperçus de l'interface du logiciel Dyna-CLUE.



a



b

Figure 33 : Aperçus de l'interface du logiciel Dyna-CLUE

L'interface de lancement présente un menu permettant d'introduire les différents paramètres requis et les résultats des analyses statistiques (régression logistique, matrice de conversion, etc.). Le menu offre également des options supplémentaires pour le contrôle des fichiers introduits ainsi que le choix des cartes à produire à la fin de la simulation.

Des emplacements sont prévus pour préciser les fichiers indiquant les zones de restriction (marqué *Area restrictions*) ainsi que la demande spatiale calculée pour les

différentes unités d'occupation (emplacement marqué *Demand scenario*). Enfin l'espace de droite présentant le logo du modèle est réservé pour l'introduction des paramètres statistiques, pour le cas où l'utilisateur choisit ce mode plutôt qu'une modification manuelle des fichiers.

Une fois les différents paramètres statistiques requis plus haut calculés, il s'agit de les introduire dans le logiciel. Cette introduction se fait uniquement à travers la modification de fichiers spécifiques déjà présents à l'installation. Autrement dit, le logiciel est configuré pour n'accepter que les noms de ces fichiers aussi bien en entrée qu'en sortie (fin de la simulation).

6.7.1. Paramètres requis et mode d'introduction

Les paramètres à introduire pour l'exécution du modèle peuvent être classés en deux catégories : les cartes et les paramètres statistiques.

Le tableau XII ci-dessous présente un récapitulatif des différentes cartes et comment elles sont intégrées dans le logiciel.

Tableau XII : Méthode d'introduction des facteurs spatiaux dans le logiciel CLUE

Type de carte	Nom du fichier à modifier	Observations
Occupation du sol (1ère année)	*Cov_all.0*	Aucune modification autorisée
Facteurs déterminants statiques	*Sc1gr#.fil*	Il faut remplacer # par le code correspondant au facteur. Nécessite un fichier par facteur.
Facteurs déterminants dynamiques (densité de population par exemple)	*Sc1gr#.**	Idem pour le #. Il faut remplacer l'astérisque par l'année correspondante. Nécessite un fichier par année de simulation
Zone de restriction	*Region1.fil*	

Les codes attribués aux facteurs et aux différentes unités d'occupation sont conservés tout au long du paramétrage. L'utilisateur n'a la liberté de modifier selon le cas que le caractère final (souvent un numéro) des fichiers.

Une fois ces réglages effectués, les autres paramètres restants à introduire sont essentiellement les valeurs statistiques. Il s'agit essentiellement de la matrice de

conversion, des valeurs des régressions logistiques, de la demande en terres estimée et des autres paramètres supplémentaires Ils sont introduits à l'aide de trois différents fichiers à modifier.

La matrice de conversion est prise en compte à travers le fichier *allow.txt*. Comme précisé plus haut, il s'agit d'un tableau à double entrée où le nombre de lignes correspond au nombre d'unités d'occupation destinées à être modéliser. Les conversions possibles sont indiquées par le chiffre 1 tandis que 0 est utilisé pour les cas de conversion impossible.

Les résultats des régressions logistiques sont intégrées à travers la modification du fichier *alloc.reg*. La modification de ce fichier requiert un certain nombre de principes. La première ligne indique le code de l'unité d'occupation, la seconde la valeur de la constante dans le modèle de régression. La troisième ligne précise le nombre de facteurs explicatifs dans le modèle. A partir de la quatrième ligne sont précisées les différentes valeurs des coefficients pour chaque facteur, à raison d'une valeur par ligne. Ensuite le même processus est répété pour chaque unité d'occupation.

La demande spatiale est calculée au pas de temps annuel et pour toutes les unités d'occupation. Elle est introduite via le fichier *demand.in** (l'astérisque remplace un chiffre au choix). A la première ligne du fichier est spécifié le nombre d'années pour lesquelles les valeurs sont estimées. A partir de la seconde ligne sont listées les demandes spatiales par unité d'occupation, à raison d'une ligne par année en commençant par l'année de la carte de base. La demande totale doit être égale à la superficie totale. L'unité est l'hectare.

Enfin, le dernier fichier spécifiant les valeurs nécessaires pour la simulation est nommé *main.1*. Il regroupe sur vingt lignes le reste des paramètres. Le tableau XV présente ces vingt différentes lignes et les informations qui doivent y être précisées.

Tableau XIII : Principaux paramètres

N° de ligne	Informations	Format	Observations
1	Nombre d'unité d'occupation	Entier naturel	
2	Nombre de région	Entier naturel	
3	Nombre maximal de variables indépendantes dans un modèle de régression	Entier naturel	Nombre de facteurs déterminants dans le modèle de régression qui en comporte le plus
4	Nombre total de facteurs déterminants	Entier naturel	
5	Nombre de lignes	Entier naturel	Les cartes étant en format raster à l'origine, elles sont composées de lignes et de colonnes.
6	Nombre de colonnes	Entier naturel	
7	Taille du pixel	Réel	Il ne s'agit pas de la résolution (qui est exprimée généralement en côté du pixel) mais de la superficie du pixel à spécifier en hectare.
8	Longitude du dernier pixel en bas à gauche	Réel	Données disponibles dans l'entête du fichier raster converti en ASCII
9	Latitude du dernier pixel en bas à gauche	Réel	
10	Codes des différentes unités d'occupation	Entier naturel	Commence à partir de 0. Tous les codes sont entrés sur la même ligne, séparés par un espace
11	Valeur d'élasticité pour chaque unité d'occupation	Réel	Varie entre 0 et 1. A rentrer dans l'ordre de la ligne 10
12	Variables d'itération	Réel	Trois valeurs sont à préciser : le mode d'itération, l'écart moyen entre la demande et l'espace alloué et l'écart maximum entre la demande et l'espace alloué.
13	Années de démarrage et de fin de la simulation	Entier naturel	
14	Nombre de facteurs déterminants dynamiques (densité de population, par exemple)	Entier naturel	
15	Choix du format de fichier en sortie	1, 0, -2 ou 2	Préciser si on souhaite des fichiers ASCII au format ArcView, avec en-tête ou pas
16	Choix d'une région spécifique	0, 1 ou 2	0 : pas de régression pour une région spécifique (choix par défaut), 1 : différentes régressions pour différentes régions. Les demandes doivent alors être spécifiées,

			2 : différentes régressions pour différentes régions, mais les demandes sont agrégées.
17	Prise en compte de l'historique de l'occupation du sol	0, 1 ou 2	Quand cette dernière est connue. Sinon, le modèle choisit un nombre aléatoire. L'utilisateur doit préciser le nombre d'années maximum pour lesquelles ce chiffre est utilisé.
18	Prise en compte du paramètre de voisinage	0, 1 ou 2	0 : paramètre non utilisé 1 : paramètre utilisé 2 : seules les influences du voisinage sont calculées et sauvegardées. Pas de simulation réalisée
19	Variables relatives à la préférence d'un emplacement spécifique	Entier naturel	1 ou 0 pour activer ou non ce paramètre. S'il est activé, il faut préciser pour chaque unité d'occupation la valeur de cette préférence à ajouter à la probabilité calculée à partir de la régression.
20	Paramètre d'itération	Réel	On recommande une valeur entre 0,001 et 0,1.

Conclusion partielle

Les différentes données nécessaires ainsi que leur mode d'acquisition ont été présentées dans ce chapitre. Il s'agit principalement de données climatiques (température, pluviométrie, évapotranspiration), socioéconomiques (production agricole), démographiques et cartographiques (images satellites, modèles numériques de terrain). Il est à noter que les périodes de ces différentes données ne concordent pas toujours. Le choix de ces périodes (1965-2004 pour les données climatiques, 1972, 1990 et 2008 pour l'occupation du sol, 1977, 1992 et 2002 pour la population) est dû aux contraintes liées à la disponibilité et à l'accessibilité même de ces données.

Dans ces cas, et quand il était nécessaire, des interpolations ont été réalisées afin de corriger cela dans la mesure du possible. Les traitements statistiques appliqués aux données climatiques sont le calcul de la moyenne, de l'écart-type, des anomalies et de la moyenne mobile. Les images satellites sont passées par des phases de prétraitement (correction atmosphérique, par exemple), d'amélioration visuelle et de

traitement afin d'en extraire les cartes d'occupation pour les différentes années. Le modèle Dyna-CLUE, a été utilisé pour la simulation de l'occupation du sol sur différentes années.

Chapitre 4 : Occupation du sol dans le bassin de l'Alibori : dynamique et facteurs déterminants

Le système agraire du bassin-versant de l'Alibori reste peu diversifié du fait d'une part de son appartenance au bassin cotonnier du Nord-Bénin, et d'autre part de sa diversité sociale relativement faible (essentiellement trois groupes socioculturels). Les formes d'exploitation des ressources naturelles, sources de la dégradation environnementale, y sont par conséquent peu variées. L'évolution des différentes unités d'occupation du sol dans milieu fournit des informations sur l'état de dégradation de l'environnement dans ce milieu. L'occupation du sol fournit également un indicateur de l'exploitation des ressources naturelles ainsi que de l'espace dans le milieu. Les changements dans l'occupation du sol résultent d'une combinaison de facteurs synergétiques, conduisant le plus souvent à une pression accrue sur des ressources de plus en plus rares, des interventions institutionnelles externes, la perte des capacités d'adaptation et des changements dans les attitudes et les organisations sociales. Les changements dans les biens et services des écosystèmes qui résultent des changements dans l'occupation du sol renforcent les facteurs à la base de ces changements, entretenant ainsi un cercle vicieux.

Ce chapitre vise d'abord à étudier l'évolution des états de surface dans le bassin de l'Alibori, puis de présenter les différents facteurs à la base de cette évolution.

1. Etat de l'occupation du sol dans le bassin de l'Alibori

L'état de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori a été réalisé à partir d'une analyse diachronique basée sur des images provenant de différentes générations du satellite Landsat. La méthodologie qui a permis de transformer ces différentes images en cartes a été expliquée précédemment.

Les figures 38, 39 et 40 présentent l'occupation du sol dans la zone d'étude respectivement en 1973, 1990 et 2008. Une première analyse visuelle des différentes cartes permet de distinguer quatre catégories d'unités d'occupation : les espaces cultivés (champs, mosaïques de culture et de jachère, plantation), les zones de végétation naturelles (forêts denses, forêts-galerie, forêts claires, savanes boisées,

fourrés, prairies, savanes saxicoles) les zones d'installation humaines et les unités d'occupation non-modifiables (surfaces cuirassées, plans d'eau).

En 1973 (figure 38), les unités d'occupation dominantes étaient les zones de végétation naturelle présentes sur 86,11% de la surface du bassin. Ces 86% se répartissent essentiellement entre les forêts claires et savanes boisées (18,41%) et les savanes arborées arbustives qui occupaient 61,42% de la superficie totale. Viennent ensuite les espaces cultivés. Ils occupent 13,71% du la superficie du bassin, représentés par les mosaïques de cultures et de jachères. Les zones d'installations humaines n'occupaient que 0,11% en termes d'occupation spatiale (figure 34).

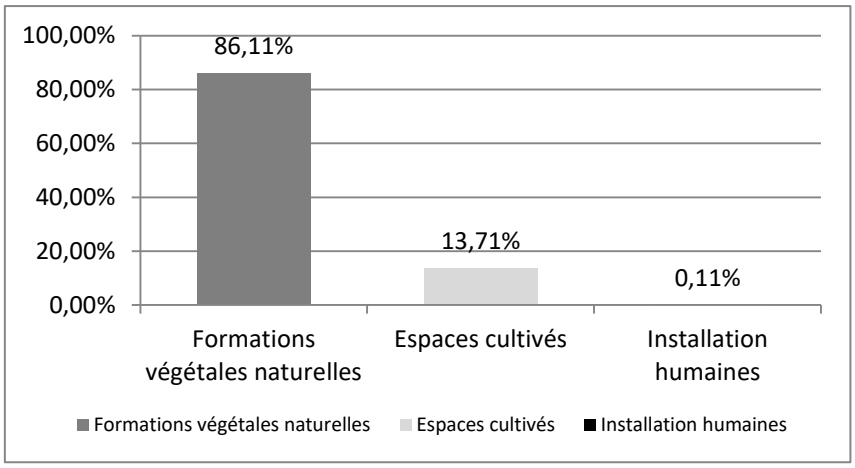


Figure 34 : Proportion des principales catégories d'unité d'occupation du sol en 1973

En 1973, le bassin-versant de l'Alibori présentait un état d'occupation quasi tropical. 5% de l'espace étaient occupés par des forêts (denses ou ripicoles). Elles n'étaient pas toutes localisées dans les aires protégées (figure 37).

En 1990, l'occupation du sol n'a pas radicalement changé dans le bassin (figure 37). Les zones de végétation naturelles restent dominantes avec 64,03% de superficie occupée partagés entre les forêts claires et savanes boisées (18,62) et les savanes arborées et arbustives (41,29%). Les espaces cultivés suivent avec 16,79% sans y ajouter les savanes à emprise agricole (19,01) qui se situent entre les deux catégories. Les installations humaines occupent 0,15% de la superficie du bassin. En 1990, la végétation de type tropical humide cède peu à peu le pas à une végétation soudanienne. Les forêts sont encore présentes (3,57%) mais essentiellement dans les aires protégées (parc W et Forêt Classée de Ouénou Bénou).

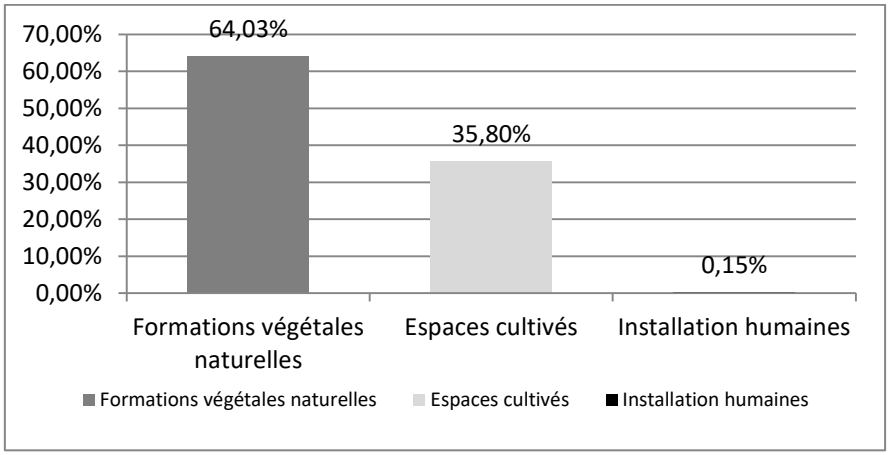


Figure 35 : Proportion des principales catégories d'unité d'occupation du sol en 1990

La carte de 2008 (figure 37) présente un réel contraste avec celles des années précédentes. En effet, on peut y constater *de visu* que les espaces cultivés y ont largement progressé. Ils occupent 45,05% de la superficie du bassin. Les zones de végétation naturelles se rencontrent essentiellement dans les aires protégées (parc W, forêts classées de l'Alibori Supérieur et de Ouénou Bénou). Elles n'occupent plus que 54,76% du bassin (figure 36). Les forêts (denses et ripicoles) ont quasiment disparu (3,14%) et ne sont présentes que sous forme d'îlots dans le Parc W et la forêt classée de Ouénou Bénou. La forêt classée de l'Alibori supérieur quant à elle ne présente que des formations de savanes. Les installations humaines occupent 0,17% de la superficie totale du bassin, mais les localités sont de plus en plus proches des formations naturelles et des aires protégées. On assiste à une savanisation accrue de la végétation dans le bassin.

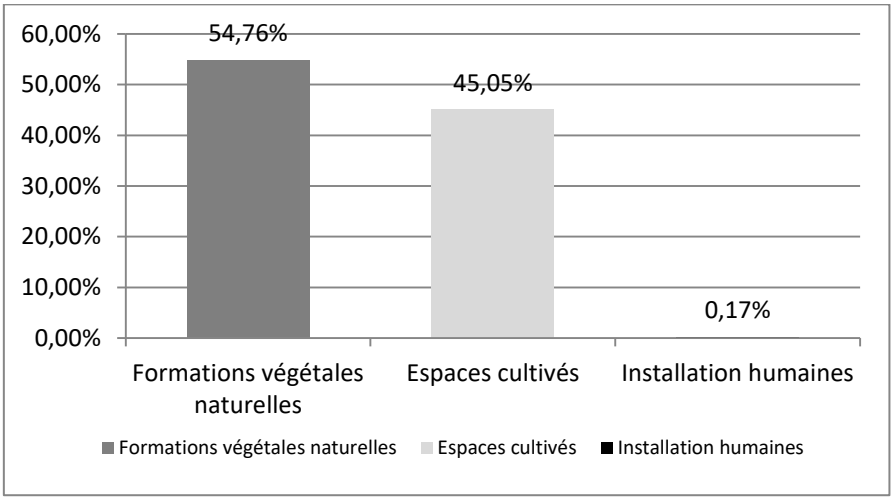


Figure 36 : Proportion des principales catégories d'unité d'occupation du sol en 2008

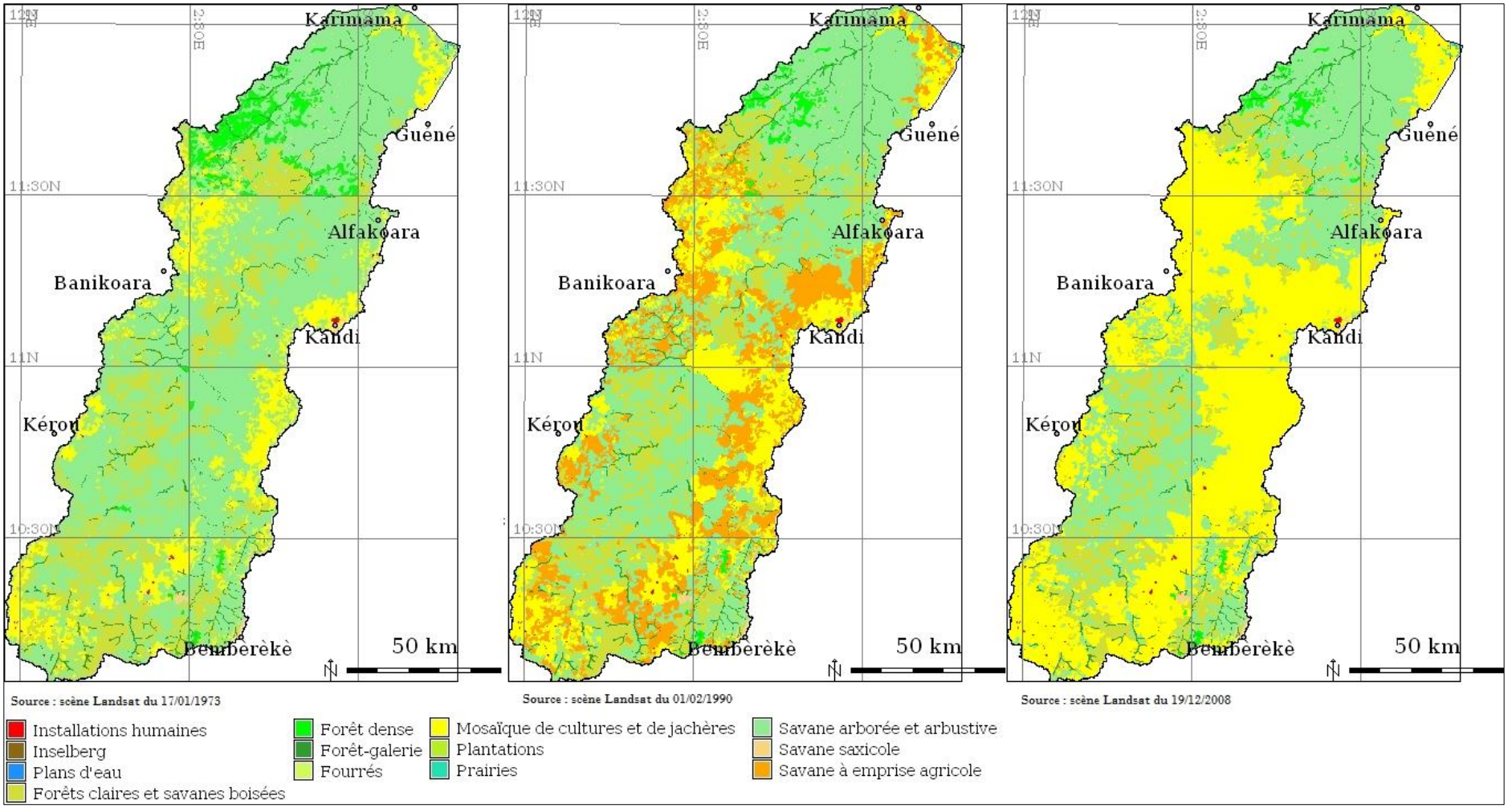


Figure 37 : Occupation du sol dans le bassin de l'Alibori en 1973, 1990 et 2008

2. Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori

Les tableaux XIV et XV ci –dessous présentent l'évolution au cours des trois années (1973, 1990 et 2008) des différentes unités d'occupation identifiées dans la zone d'étude.

Tableau XIV : Dynamique des unités d'occupation entre 1973 et 1990

Unités	Superficie en km²		Progression	Régression
	1972	1990		
Installations humaines	15,588	20,993	34,67	
Plans d'eau	2,744	2,744		
Forêts claires et savanes boisée	2553,501	2583,619	1,18	
Forêt dense	483,348	180,668		-62,62%
Forêt-galerie	320,682	315,357		-1,66%
Fourrés	2,396	2,396	0	
Mosaïque de cultures et de jachères	1902,264	2328,984	22,43	
Prairies	5,995	5,995	0	
Savane arborée et arbustive	8520,62	5728,301		-32,77
Savane saxicole	66,022	66,022	0	
Surfaces cuirassées	0,654	0,654	0	

Tableau XV : Dynamique des unités d'occupation entre 1990 et 2008

Unités	Superficie en km²		Progression	Régression
	1990	2008		
Installations humaines	20,993	23,624	11,14	
Plans d'eau	2,744	2,744	0	
Forêts claires et savanes boisée	2583,619	2067,949		-24,93%
Forêt dense	180,668	171,356		-5,43%
Forêt-galerie	315,357	263,608		-19,63%
Fourrés	2,396	2,396	0	
Mosaïque de cultures et de jachères	2328,984	6249,35	62,73	
Prairies	5,995	5,995	0	
Savane arborée et arbustive	5728,301	5019,697		-14,12%
Savane saxicole	66,022	64,916		-1,70%
Surfaces cuirassées	0,654	0,654	11,14	

Trois formes d'évolution ressortent de la lecture de ces deux tableaux : la progression, la régression et la stabilité. La dernière catégorie (stabilité) ne concerne que les unités d'occupation qui ne sont pas sujet à d'éventuelles modifications. Il s'agit principalement des plans d'eau et des surfaces cuirassées. Entrent dans cette

catégorie aussi les savanes saxicoles qui, du fait de la topographie sont rarement exploitées.

Lorsqu'on s'intéresse aux unités d'occupation ayant évolué, entre 1973 et 1990, on constate qu'il s'agit des installations humaines (+34,67%), des mosaïques de cultures et de jachères dont la superficie a augmenté de 22,43%. Les forêts claires et savanes boisées ont aussi connu une progression mineure de 1,18%, passant de 2 553 à 2 583 km². Au cours de cette même période trois autres unités d'occupation ont connu une régression. Il s'agit uniquement de formations végétales naturelles. Ainsi, les forêts denses sont passées de 483 à 180 km² soit une diminution de 62%. Les forêts-galeries quant à elles ont vu leur superficie totale passer de 320 à 315 km². La progression de 1,18% constatée pour les forêts claires et savanes boisées s'est faite au détriment de ces deux unités d'occupation précédentes. Enfin les savanes arborées et arbustives ont perdu près du cinquième de leur superficie, passant de 8520 à 5728 km². L'espace anciennement occupée par ces savanes ont été converties soit en mosaïques de culture et de jachère, soit en savane à emprise agricole. En somme, sur les 18 années, les unités d'occupation d'origine anthropique ont toutes progressé au détriment des formations végétales naturelles.

Les trois formes d'évolution constatée pour la période 1973-1990 se retrouvent aussi dans celle de 1990-2008. Les trois unités stables restent les plans d'eau, les surfaces cuirassées et les savanes saxicoles (perte de 1,70%), pour les mêmes raisons que celles mentionnées précédemment. Seules deux unités d'occupation ont connu une progression au cours de ces dix-huit années. Il s'agit des installations humaines (+11,14%) et des mosaïques de cultures et de jachères (+62,73%). Autrement dit, les espaces cultivés ont triplé leur superficie de 1990, passant de 2329 à 6249 km² ! Au rang des régressions, toutes les formations végétales naturelles (à l'exception des prairies et des fourrés) ont vu des diminutions de la superficie qu'elles occupaient dix-huit ans plus tôt. Les forêts claires et savanes boisées ont reculé de 24,93% tandis que les savanes arborées et arbustive ont perdu 5,11% passant respectivement de 2583 à 2067 km² et de 5728 à 5019 km². Les superficies des forêts denses et ripicoles ont baissé respectivement de 4,43% et -19,63%. Ces deux unités ne doivent leur (relativement) faible baisse qu'à leur situation dans les aires protégées. En effet, en 2008 (figure 37), les forêts denses ne sont rencontrées que dans le noyau central de la Forêt Classée de Ouénou Bénou et par îlots dans le parc W. Quant aux forêts-galeries,

comme leur nom l'indique, elles sont encore présentes le long des cours d'eau, mais essentiellement sur les portions où ces derniers passent à travers les aires protégées. Elles n'existent pratiquement plus au niveau de la zone libre. Ce constat confirme le rôle de frein à la désertification que doit constituer les différentes aires protégées présentes dans le bassin.

La figure 38 représente l'évolution des pourcentages pour chaque type d'unité d'occupation de 1973 à 2008.

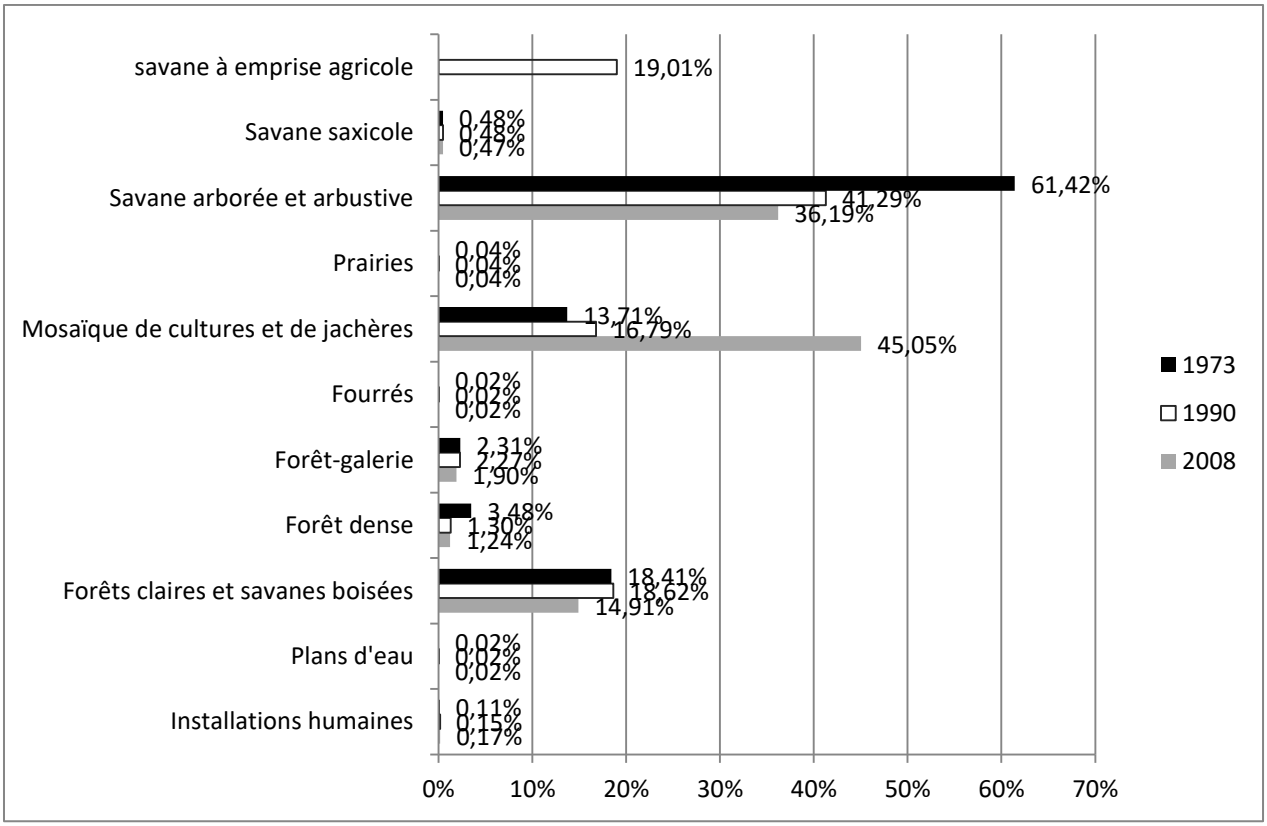


Figure 38 : Evolution des pourcentages de chaque unité d'occupation de 1973 à 2008

3. Déterminants de l'occupation du sol et de sa dynamique

De façon générale, des causes empiriques sont reconnues comme étant à la base de l'occupation du sol et de son évolution diachronique. Ces causes sont souvent basées sur la littérature généraliste en matière d'occupation du sol. Il s'agit ici de dépasser ces considérations empiriques et de chercher les causes spécifiques au secteur d'étude.

Au terme des travaux de terrain et d'une étude approfondie de la littérature portant sur la zone d'étude, plusieurs facteurs ont été identifiés. Ces facteurs peuvent être

répertoriés en deux catégories. Il s'agit des facteurs biophysiques et des facteurs liés directement ou indirectement à l'homme et ses activités.

3.1. Les facteurs biophysiques

Des différents travaux effectués sur le terrain, il ressort que l'occupation du sol dépend d'un certain nombre de caractéristiques physiques du milieu. Il s'agit de la topographie, de la pluviométrie, de la pédologie et de l'hydrographie et des facteurs spatiaux.

3.1.1. Les facteurs topographiques

Les populations du bassin de l'Alibori ne mentionnent pas expressément avoir une préférence pour un type de relief spécifique comme critère dans le choix des espaces à emblaver. La preuve en est la présence de culture au niveau des vallées et des bas-fonds. Ils sont souvent utilisés pour les cultures maraîchères et la riziculture. Par ailleurs, le relief du milieu ne présente pas d'accident notable à l'exception des collines de Sinendé et de Bembèrèkè.

Mais dans le même temps, on remarque que la progression des espaces cultivés se fait aux dépens de toutes les formations végétales naturelles sauf des savanes saxicoles dont les superficies ont été stables tout le long de la période d'étude. On peut donc considérer que si le relief n'est pas un critère clairement identifié au niveau des populations, il constitue toutefois un facteur limitant à l'extension des zones de cultures.

Par ailleurs, les zones caractérisées par des pentes plus ou moins prononcées ne sont généralement pas cultivés. En effet, en l'absence d'une connaissance des pratiques anti-érosion, les populations évitent des sites présentant des pentes par crainte que les intrants et les semences, ou les plantes plus tard, soient emportés par le ruissellement.

3.1.2. Les facteurs pédologiques

Outre le relief, le second facteur biophysique est la pédologie, autrement dit le sol de la zone d'étude. Entre en compte ici la notion d'aptitude culturale. S'il est reconnu que toutes les cultures n'ont pas le même rendement sur tous les types, certains sols ne sont carrément pas aptes à la culture. Les producteurs du bassin-versant de

l'Alibori sont bien conscients de ce fait et ont leur propres indicateurs afin de reconnaître les sols les plus aptes à leurs spéculations. Ces indicateurs sont la plupart du temps des espèces végétales dont la présence est considérée comme signe de fertilité du sol à une culture spécifique.

Les sols les plus rencontrés dans la zone d'étude sont les sols ferrugineux, qui sont reconnus pour être aptes aux cultures annuelles. Plus spécifiquement, les sols ferrugineux sur matériau kaolinique sont aptes à toutes les cultures. Ceci permet une rotation des principales spéculations sans préoccupation majeure pour l'aptitude des sols.

3.1.3. Les facteurs pluviométriques

Dans un système de production essentiellement pluvial, la pluviométrie constitue un véritable couteau à double tranchant. Elle agit comme facteur de deux manières possibles : soit en fonction du démarrage de la saison, soit en fonction des hauteurs enregistrées.

Selon que les hauteurs de pluie enregistrées soient excédentaires ou déficitaires, elles auront des impacts différents sur l'occupation du sol. Principalement sur l'extension des espaces cultivés. Lorsque les abats pluviométriques correspondent aux attentes des producteurs, les emblavures ne sont pas systématiquement augmentées entre deux campagnes agricoles. Si elles sont augmentées, c'est alors dû à la prise en compte d'autres facteurs. Mais si la pluviométrie est inférieure à la moyenne, on assiste à un accroissement des superficies afin de bénéficier d'un rendement tout au moins égal à celle d'une campagne normale. En ce qui concerne les formations végétales naturelles, si l'existence directe d'un lien entre la présence de forêts et la pluviométrie reste à prouver, la relation contraire quant à elle est bien effective. Ces formations requièrent une pluviométrie annuelle moyenne en–deçà de laquelle leur existence est menacée. La récession pluviométrique des deux dernières décennies a aussi joué un rôle dans le recul des formations végétales naturelles.

Les dates de démarrage des pluies constituent un facteur de l'occupation du sol en ceci qu'elles conditionnent les pratiques culturales. En effet, en cas de démarrage tardif des pluies, on assiste à la pratique de re-semis. C'est-à-dire que de nouvelles semences sont mises en terre pour remplacer celles perdues lors des premiers semis

suite au retard des pluies. Les agriculteurs ont aussi recours à des variétés à cycle court. Ceux qui n'ont pas les moyens de recourir à ces variétés ou n'ont pas de semences supplémentaires prennent soin des premiers semis, mais avec le risque d'un faible rendement. Dans des cas de retard extrême, la culture de certaines spéculations est simplement annulée, comme c'est le cas de la pomme de terre dans la commune de Karimama.

Dans le cas de pluies précoces, c'est le calendrier de semis normal qui est appliqué. Enfin, on assiste à des réductions des superficies emblavées en cas d'apparition de poche de sécheresse.

3.1.4. L'hydrographie

Malgré la très faible présence de systèmes d'irrigation dans la zone d'étude, l'hydrographie y reste un critère majeur de l'occupation du sol. Dans les communes comme Péhunco, Karimama et Malanville où les cultures maraîchères font partie des principales spéculations, les aménagements hydrauliques jouent un rôle crucial dans la production agricole. La présence de l'eau constituant la condition indispensable pour le maraîchage. Dans les zones où le maraîchage n'est pas une activité dominante, les aménagements hydrauliques sont sollicités pour les activités pastorales, conditionnant ainsi l'installation des campements permanents ou temporaires des Peuhl.

Par ailleurs, l'hydrographie constitue le principal facteur lors de l'installation des fronts pionniers par les migrants agricoles. En effet, les cours d'eau constituent la principale source exploitée pour satisfaire les besoins en eau du ménage et du bétail.

L'évolution des différentes unités d'occupation confirme bien ce constat, puisque de 1973 à 2008, les forêts-galeries localisées en dehors des aires protégées ont quasiment toutes disparu.

3.2. Les facteurs spatiaux

Ils se manifestent essentiellement sous deux formes. Il s'agit de la disponibilité en terres et de la localisation des unités d'occupation.

- *La disponibilité en terres* est liée à la base de la pression exercée sur les superficies cultivables. La densité démographique étant inégalement répartie

dans le bassin, et du fait de la présence d'aires protégées – bénéficiant d'une protection plus ou moins stricte – la disponibilité en superficies cultivables n'est pas égale partout. La commune de Banikoara, qui est la plus peuplée est aussi occupée sur près du tiers de sa superficie par le parc W. En fonction du système cultural et des différentes spéculations, le besoin en terres est plus ou moins élevé. Dans la commune de Kérou par exemple, un groupe de jeunes (25 à 30 ans) est allé s'installer dans la Forêt Classée de l'Alibori Supérieur, créant un hameau appelé Bourougouma. Ils disent s'y être installés par manque de terre dans la zone libre de la commune. Les principales cultures pratiquées sont le coton, l'igname et le mil. Leur principale motivation reste la disponibilité de grandes surfaces cultivables. Ils sont conscients de l'aspect illégal de leur présence dans ce domaine (Selon la loi n°093-009 du 2 juillet 1993 portant régime des forêts en République du Bénin, les défrichements pour l' agriculture sont interdits dans tout domaine forestier de l'Etat n'ayant pas fait l'objet d'un aménagement ad hoc), mais préfèrent se plaindre de la présence d'un autre producteur, venu de Banikoara, possédant d'une machine agricole qui lui permet d'emblaver près de cent hectares par campagne. Le paroxysme est atteint lorsqu'on se rend compte qu'une fois les coordonnées de Bourougouma projetées sur une carte administrative, elle localité se situe dans la commune de Gogounou.

- Quant à la *localisation des unités d'occupation*, il s'agit essentiellement de la proximité de formations végétales naturelles des installations humaines. Que ces formations soient situées en zone libre ou soient une aire protégée importe peu. La proximité d'un village ou tout autre forme d'installation humaine (campements, ferme, etc.) augmente de façon exponentielle la probabilité de conversion de cette unité d'occupation naturelle en une entité d'origine anthropique (champ, plantation, etc.). Ceci est plus remarquable au niveau des domaines classés selon leur niveau de protection. Si le parc W bénéficie d'un programme spécial et où la réglementation est très stricte, il n'en va pas de même pour les Forêts Classées de Ouénou Bénou et de l'Alibori Supérieur ainsi que la rôneraie de Goroubi. De larges superficies emblavées sont présentes dans ces domaines.

Les facteurs biophysiques n'agissent pas de façon isolée sur l'occupation du sol. Cette dernière est le résultat d'une combinaison des effets de ces différents facteurs, et de ceux des facteurs liés à l'homme et ses activités.

3.3. Les facteurs d'origine humaine

Il s'agit de tous les facteurs influant sur l'occupation du sol et sa dynamique, et qui trouvent leurs sources de façon directe ou indirecte dans les actions de l'homme. Les travaux menés ont permis d'identifier les facteurs sociaux, culturels, économiques et institutionnels.

3.3.1. Les facteurs sociaux et culturels

La plupart des facteurs sociaux et culturels trouvent leurs racines dans une autre cause humaine : la croissance démographique. Empirisme mis à part, la croissance démographique est souvent citée comme une des causes de l'occupation du sol et de sa dynamique lors des travaux de terrain par les populations-cibles (éleveurs et agriculteurs). La croissance démographique en tant que facteur de l'occupation du sol se présente sous plusieurs aspects, relativement similaires. On distingue entre autres la taille des champs et la taille de la famille.

- *La taille des champs* : il y a une trentaine d'années, un champ d'un hectare pouvait suffire aux besoins d'une famille. C'était une agriculture de subsistance essentiellement. Aujourd'hui, il faut en moyenne dix hectares à une famille. Avec l'accroissement de la population, de plus en plus d'espace sont mis en friche.

- *La taille de la famille* : plus une famille est grande, plus les besoins sont importants. Selon le recensement de 2002, la taille moyenne d'une famille dans les communes du bassin est de 8,7 personnes. Or, les travaux de terrain ont montré qu'avec l'âge, chaque membre d'une famille veut avoir son propre champ. De plus, pour les Peuhls, le premier facteur conditionnant la taille du champ est le nombre d'enfants composant la famille.

Un des effets les plus remarquables de ces deux facteurs, est la réduction du temps de jachère. La pression grandissante sur les terres dans un contexte de croissance démographique, surtout dans les zones où la disponibilité de superficie cultivable reste limitée, entraîne un besoin constant d'espace. A défaut de nouvelles friches, les

populations retournent vers les anciennes friches, sans leur laisser le temps de se reconstituer complètement.

Sur le plan culturel, l'accroissement des superficies emblavées varie en fonction du groupe socioculturel dominant dans le milieu. Dans le bassin-versant de l'Alibori, malgré la présence du bassin cotonnier, les cultures vivrières restent très présentes, surtout celles qui sont à la base de l'alimentation. Chez les Dendi et les Peuhls, il s'agit des céréales (sorgho et petit mil) tandis que chez les Baatombu c'est plutôt l'igname. Pour les Peulh qui ne font généralement pas de culture de rente, ce sont les céréales, surtout le sorgho, qui constituent les spéculations primordiales. La superficie des emblavures est aussi liée à la taille de la famille et est très peu sensible aux spéculations économiques. Il est nécessaire de préciser que l'igname n'est pas cultivée deux années de suite sur la même parcelle et sa culture nécessite un ensoleillement important. Elle requiert annuellement de nouvelles friches (ou le retour vers d'anciennes jachères) et l'abattage des ligneux susceptibles de réduire l'ensoleillement. Une fois qu'une parcelle est défrichée, les arbres et arbustes qui s'y trouvent sont détruits pour permettre aux cultures de profiter au maximum de la lumière solaire. Les gros arbres et certains arbustes de taille importante sont tués par le feu et les arbustes de taille moindre sont généralement coupés à quelques centimètres du sol.

Un facteur socioculturel non négligeable est le prestige lié à la réputation acquise par une localité ou une commune des suites d'une spécialisation dans une spéculation particulière. Ainsi, dans le bassin-versant de l'Alibori, la commune de Banikoara tient particulièrement à son rang de première productrice de coton du Bénin. Les réponses obtenues lors des différents focus group font ressortir que les producteurs de cette commune tiennent à ce prestige et procèdent annuellement à l'extension des emblavures destinées à la cotonculture. Ceci en dépit des difficultés récurrentes que connait cette spéculation. Une autre localité où ce facteur a été relevé, est le village de Yarra, situé dans la commune de Sinendé. Malgré sa proximité avec la Forêt Classée de l'Alibori supérieur, les habitants de ce village se sont spécialisés dans la culture du maïs. Les emblavures sont faites aux dépens de la Forêt Classée qui est de plus en plus occupée par les champs, malgré son statut d'aire protégée (photo 15). Il faut dire qu'après la récolte, les commerçants viennent de très loin (depuis Zogbodomey,

parfois) pour acheter le maïs produit dans cette localité. Ici aussi, les producteurs tiennent à ce prestige, et priorisent cette spéculation au détriment des autres.



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 15 : Champ de mais à Yarra dans la Forêt Classée de l'Alibori

Les moyens dont disposent les agriculteurs constituent le dernier facteur social constaté lors des travaux de terrain. Dans la zone d'étude, trois outils sont essentiellement utilisés pour les cultures. Il s'agit de la houe (qui est la plus répandue), de la charrue et des machines agricoles. Ces outils conditionnent l'étendue des emblavures réalisées par les producteurs agricoles. Les utilisateurs de la houe déclarent cultiver en moyenne trois hectares par spéculation, tandis que ceux qui possèdent une charrue peuvent cultiver jusqu'à dix hectares pour chaque spéculation. Quant aux groupements qui ont pu bénéficier de machines agricoles sont capables d'emblaver jusqu'à vingt-cinq hectares. La disponibilité en terres reste leur seule limite. A Yarra, par exemple, un agriculteur a emblavé, machines agricoles à l'appui, vingt hectares de maïs au cours d'une même campagne. Les revenus qu'il en a tirés lui ont permis de se construire une maison d'un standard plus élevé que celles des autres producteurs. On peut en déduire que les moyens à sa disposition lui ont permis d'avoir un certain prestige social qui a incité d'autres agriculteurs à vouloir faire comme lui. Les différents facteurs ont donc les liens entre eux avec souvent des effets de feed-back.

3.3.2. Les facteurs économiques

Il s'agit principalement des activités économiques menées dans le bassin et de leurs effets directs ou indirects. Les principales activités économiques sont celles du secteur primaire, essentiellement l'agriculture et l'élevage. Si les effets de l'élevage sur l'occupation du sol ne sont pas évidents, ceux de l'agriculture méritent une attention particulière.

3.3.2.1. La production agricole

Elle est la principale activité économique pratiquée dans le bassin-versant de l'Alibori. Les principales spéculations sont :

- les cultures industrielles : le coton, l'arachide et le soja
- les cultures vivrières : le maïs, l'igname, le sorgho, le petit mil, le manioc et le niébé.

L'évolution des emblavures de ces différentes cultures est illustrée par la figure 39. Cette figure montre que les cultures industrielles occupent une part prépondérante dans les superficies emblavées. La principale culture est le coton, qui occupe le plus d'espace. Les produits à la base de l'alimentation – et potentiellement commercialisables – comme le maïs et le sorgho viennent en second, suivis de l'igname, le niébé et le petit mil. Enfin, l'arachide et le manioc sont celles auxquelles les producteurs consacrent moins d'espace.

La culture du soja est à priori récente (pas de donnée avant 1997). L'intérêt des agriculteurs pour la production de cette légumineuse sera détaillé plus loin.

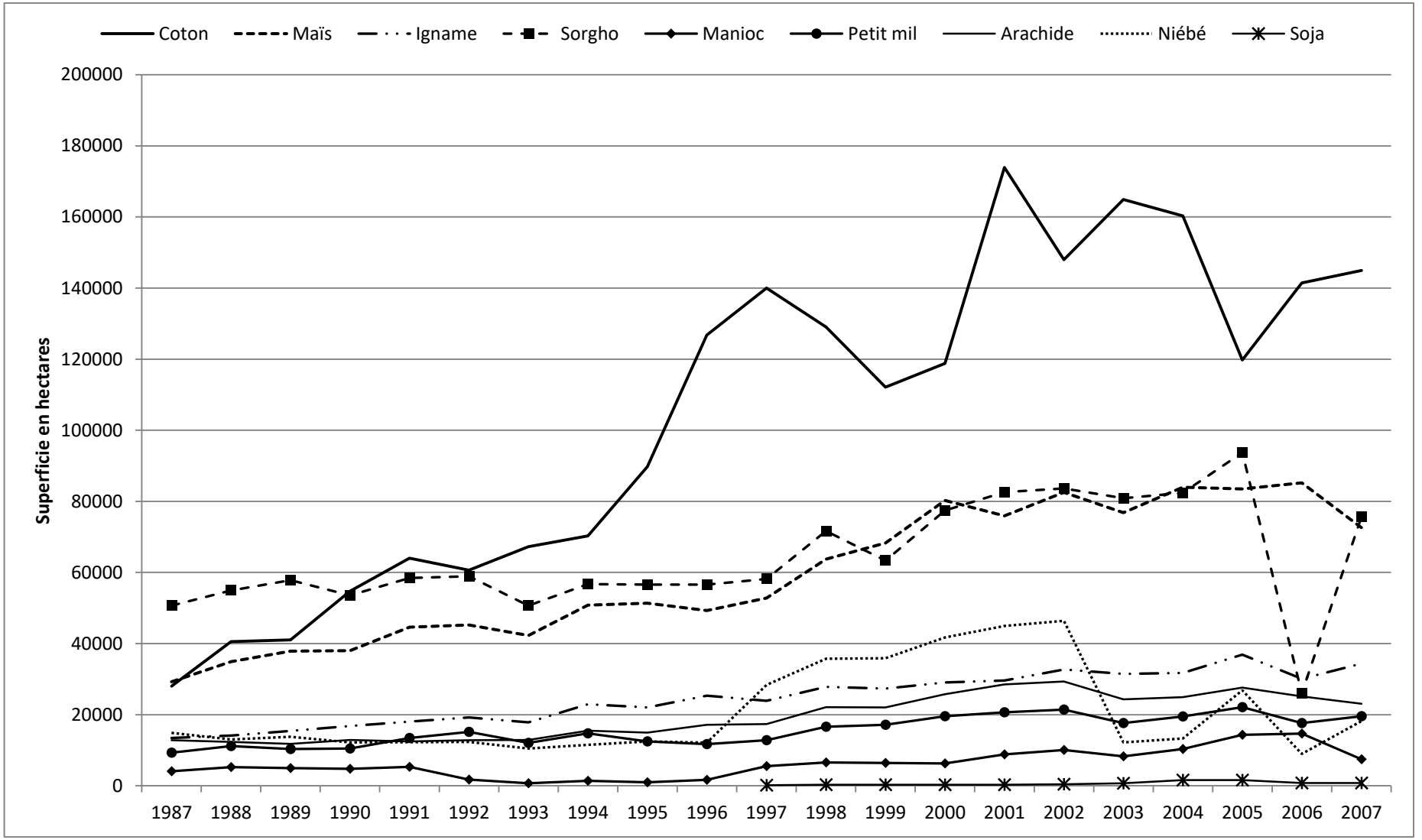


Figure 39 : Evolution des superficies cultivées pour les principales spéculations agricoles (1987-2007)

D'une façon générale, on remarque aussi que l'allure des courbes est la même pour toutes les cultures :

- de 1987 à 1994 : une phase de croissance douce, avec des progressions légèrement en dents de scie,

- de 1995 à 2004 : une phase de croissance plus accentuée avec pour certaines spéculations un véritable doublement de superficie. Le coton est passée de 70 000 ha en 1994 à 173 000 en 2001, tandis que le niébé est passera de 11 500 ha à 46 500 ha pour la même période,

- de 2005 à nos jours : une phase de régression suivie d'une légère reprise. Le sorgho passera de 93 000 ha en 2004 à 26 000 ha en 2006 et le coton, de 160 000 ha en 2004 à 119 000 ha en 2005. A l'exception du manioc, et dans une moindre mesure, de l'arachide, pour toutes les autres spéculations on assiste à une augmentation de leurs emblavures respectives

Les différentes fluctuations enregistrées dans l'évolution des superficies emblavées sont dues à d'autres facteurs sous-jacents qui constituent des motivations pour les agriculteurs à s'investir plus ou moins dans une culture donnée. Certains de ces facteurs ont déjà été présentés plus haut. Au nombre des autres facteurs d'ordre économique, la rentabilité occupe une place non négligeable.

3.3.2.2. La rentabilité

L'agriculture est pratiquée essentiellement à des fins économiques et de subsistance. La raison économique est même l'unique objectif visé à travers la culture de rente. Dans le bassin-versant de l'Alibori, la production de cultures industrielles obéit aussi à cette règle. Ainsi, l'évolution des emblavures pour une spéculation spécifique est étroitement liée à la rentabilité de cette dernière, de l'aveu même des producteurs. Tout autre facteur mis à part, les producteurs reconnaissent que s'ils doivent augmenter ou diminuer la superficie consacrée à une culture, c'est en fonction de sa rentabilité lors de la campagne précédente. Par exemple, en 2010, le coton était vendu 190 FCFA le kilogramme contre 230 FCFA lors de la campagne précédente. Cela a conduit à un découragement des producteurs qui prévoyaient de réduire les champs de coton, pour consacrer l'espace libéré soit à une culture plus rentable, soit à une culture vivrière à la base de l'alimentation. Il en va de même pour le maïs dont le

prix peut varier au cours de la même année, de 8 000 FCFA le sac de 50 kg peut atteindre 20 000 FCFA. Cette variation en cours d'année amène parfois le producteur à augmenter la taille des champs pour la campagne suivante afin d'en tirer un bénéfice conséquent.

Tous ces facteurs directs ou sous-jacents sont liés entre eux directement ou indirectement par différentes motivations. Les facteurs institutionnels constituent souvent la base de ces motivations.

3.4. Les facteurs institutionnels

Il s'agit de facteurs n'ayant pas un lien direct avec l'occupation du sol, mais a des effets sur elle par répercussion. Ce sont généralement des décisions politiques, de projets ou des choix de politiques économiques ou agricoles qui visent des objectifs de développement. Un accent sera mis ici sur les projets et les mesures mentionnés par les populations lors des différents focus group organisés pendant les travaux de terrain.

Les projets agricoles des initiatives privées ou publiques visant soit à améliorer un aspect spécifique de la pratique agricole, soit à inciter ou accroître la production d'une spéculation particulière. Dans la zone d'étude, deux activités visant à l'accroissement ou à la production et une autre avec pour objectif l'amélioration de la pratique agricole, sont en cours d'exécution avec des impacts directs ou indirects sur l'occupation du sol et sa dynamique. La première est une initiative publique nationale qui met l'accent sur la culture du maïs. Il s'agit du Projet d'Urgence d'Appui à la Sécurité Alimentaire (PUASA) dont l'objectif est de garantir la sécurité alimentaire nationale à court terme. Dans ce cadre, des semences et de l'engrais sont fournis aux producteurs intéressés. La perspective de bénéficier de ces avantages avec la garantie d'une vente finale de la récolte a incité les producteurs à s'intéresser au maïs. C'est d'ailleurs la principale raison avancée par la plupart des producteurs qui ont augmenté leurs champs de maïs.

Le second projet est une initiative privée de l'industrie FLUDOR pour encourager la production de soja. Bien qu'il ne soit pas de la même envergure, son influence est remarquable dans les communes où la culture vivrière est encore importante

(Sinendé, Péhonco et Kérou). Une partie de producteurs a choisi de consacrer une partie de leur champ à la culture du soja. La certitude de l'écoulement du produit de la récolte reste ici aussi une source de motivation majeure.

L'activité visant l'amélioration de la pratique agricole est le programme de mécanisation de l'agriculture exécuté par le Bénin à partir de 2009. Cette initiative gouvernementale visait à doter les communes de machines agricoles destinées à l'usage des producteurs organisés en coopérative ou groupements. Le but visé était une augmentation du rendement des cultures vivrières dans un contexte de crise alimentaire. Ce programme a eu comme impact, dans les zones qui en ont bénéficié, une augmentation de la taille des champs. Les travaux étant devenus moins ardus qu'avec la houe ou la charrue. A Kargui, les maraîchers ont bénéficié de motopompes qui leur permettent d'irriguer leurs champs sans grand effort. Ils en ont donc profité pour accroître les tailles de leurs champs, allant jusqu'à occuper la rôneraie de Goroubi, un domaine classé.

L'effet inverse a aussi été observé dans les localités n'ayant pas bénéficié de ce genre d'appui. Les producteurs dans ces zones conservent les mêmes habitudes agricoles et subissent donc les conséquences économiques de cette inégale répartition des subsides étatiques.

Au nombre des filières bénéficiant de l'intervention de l'Etat, le coton jouit d'un privilège particulier. On s'y intéressera donc de manière plus spécifique.

3.4.1. La cotonculture et son rôle dans la dynamique de l'occupation du sol

3.4.1.1. Aperçu sur l'évolution de la filière coton

Au Bénin, l'évolution de la production cotonnière de 1960 à nos jours a enregistré de très nombreuses fluctuations liées en particulier aux modifications des stratégies de développement et à l'organisation de la filière. Cette période peut être analysée en quatre phases présentant l'évolution du coton graine au Bénin.

- ✓ **La phase de 1960 à 1972**

Sous l'impulsion de la Compagnie Française de Développement des fibres Textiles (CFDT) et de la Société d'Assistance technique et de Coopération (SATEC), la culture

du coton enregistre une croissance constante qui se traduit par une production record de 50 000 tonnes de coton-graine en 1972-1973. Ceci a été possible grâce à l'augmentation régulière des superficies emblavées et des traitements phytosanitaires.

- ✓ **La phase de 1973-1980**

Avec l'avènement du régime socialiste, un accent particulier a été mis sur le développement de l'agriculture, principalement axé sur les cultures vivrières. Il s'en est suivi une chute de la production jusqu'à 16 000 tonnes de coton-graine en 1977-1978 à cause du climat de désaffectation entretenu autour de la filière. Les baisses accidentelles enregistrées en 1980-1981 seraient dues à une mauvaise utilisation d'un insecticide dont la qualité a été mise en doute par les producteurs et au découragement qui en a résulté.

- ✓ **La phase de 1981 à 1989**

La culture cotonnière est à nouveau encouragée. De grands projets de développement rural dans le Borgou, le Zou et l'Atacora concourent à sa relance. La production a atteint un niveau record de 133 000 tonnes en 1986-1987. Malheureusement cette période est aussi caractérisée par des problèmes liés :

- La conjoncture économique internationale parfois peu favorable (fluctuation du taux de change du dollar, accroissement de la production au niveau mondial) ;
- L'insuffisance des infrastructures d'engrenage et de stockage ;
- La méthode de gestion peu efficace de la filière ayant conduit à un déficit cumulé de près de 7 milliards de Francs CFA de 1985 à 1988.

Cette situation été à l'origine de la réhabilitation de la filière coton, objet de négociation avec les bailleurs de fonds et qui a permis la résorption du déficit cumulé par la mise en œuvre de réformes efficaces.

- ✓ **La phase de 1990 à nos jours**

Cette période est caractérisée par une accélération de l'engouement pour "l'or blanc" surtout à partir de 1991 suite à une forte mévente des produits vivriers et à un bon

fonctionnement de la filière coton. ceci s'est traduit par une augmentation des emblavures (230 000 et 250 000 ha) et de la production (277 000 et 263 000 tonnes) respectivement en 1993-1994 et 1994-1995. Une politique de quotas contrôlés instaurée en 1992 à travers la mise en place des intrants n'a pu ralentir cet engouement.

Malgré tous ces efforts consentis, les productions ne dépassent pas les superficies emblavées. En somme, à l'échelle nationale, l'accroissement de la production est recherché à travers une augmentation des emblavures. Ceci est vrai en particulier dans le bassin cotonnier et reste une des sources de la pression anthropique exercée sur les formations végétales naturelles.

3.4.1.2. Impact de la filière sur l'occupation du sol

La figure 40 présente l'évolution de la production cotonnière dans le bassin de l'Alibori, ainsi que celle du rendement et des emblavures de 1987 à 2007.

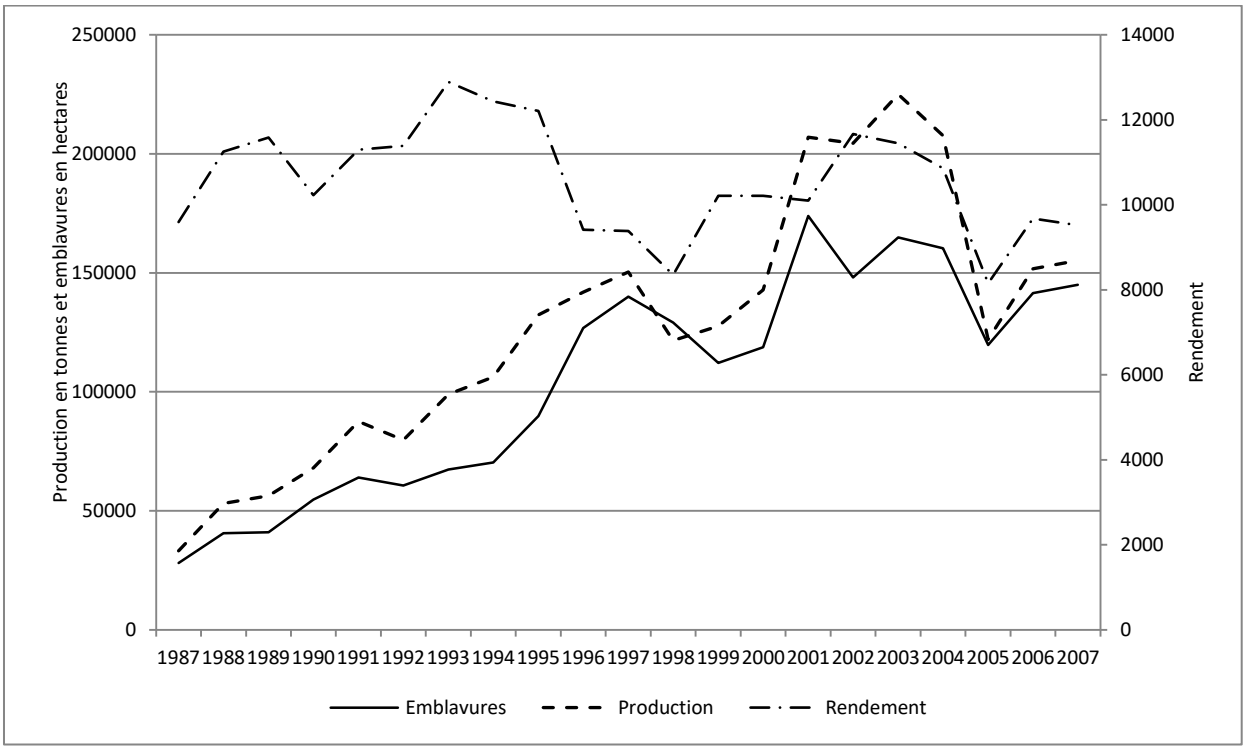


Figure 40 : Evolution des emblavures, de la production et du rendement du coton dans les communes du bassin de l'Alibori

A la lecture de cette figure, on se rend compte que de 1987 à 1995, le rendement reste élevé. La courbe de la production suit la même allure que celle des emblavures. Cette

période correspond approximativement à la deuxième phase. Quand on la rapproche de l'occupation du sol (carte de 1990), c'est la période de l'évolution des fronts pionniers. L'engouement pour la culture et l'implication de l'Etat encouragent les producteurs à conquérir de nouvelles terres. Les aires protégées sont toutes prises d'assaut. De 1995 à 2007, on observe une évolution en dents de scie. Les superficies cultivées continueront de croître jusqu'en 2001 où elles atteindront leur maximum. Ce maximum peut être lié à l'euphorie née du succès de la filière au cours des années 90. Il précède une légère chute (2002) suivie d'une nouvelle croissance. Celle-ci sera suivie d'une nouvelle chute presque définitive, les emblavures n'atteindront plus leur niveau de 2001. La production et le rendement ont une allure quasi-similaire à celle des emblavures. Le désintérêt progressif des producteurs, l'émergence de nouvelles filières (surtout vivrières) auxquels s'ajoute un renforcement de la protection de quelques aires classées (parc W, notamment) sont autant de facteurs qui expliquent d'une part la chute des superficies cultivées, et d'autres parts celles de la production. L'augmentation de la pression sur les terres et la réduction du temps de jachères expliquent quant à elles, la baisse du rendement dont la courbe a fini par être rejointe par celles de la production et des emblavures.

Cette figure confirme le constat fait précédemment : l'amélioration de la production est recherchée à travers une augmentation quasi-constante des superficies cultivées.

La filière coton bénéficie de l'appui étatique sous la forme de conseils d'encadrement et de subvention pour la fourniture d'intrants divers (semences, engrais, herbicides, pesticides, etc.). Ces différentes formes d'intervention ont des effets insoupçonnés sur l'occupation du sol.

La quantité d'engrais fourni aux producteurs est basée sur la taille du champ de coton (déclarée par les acteurs de la filière, AIC, CPV, etc.). Cette quantité est subventionnée par l'Etat béninois et parvient au producteur gratuitement. L'épandage de la quantité fournie étant rarement pratiqué selon les techniques proposées par les encadreurs, elle s'avère insuffisante. Le producteur se voit alors contraint de recourir à de nouvelles doses, cette fois-ci à titre payant. Pour couvrir les frais de ces doses, il utilise les fonds issus de la récolte d'autres spéculations produites à cet effet, espérant les récupérer à la vente du coton. Des espaces sont dont réservés pour ces types de champs.

Le second impact est l'utilisation de l'engrais fourni. Pendant les enquêtes, les producteurs de maïs, surtout dans le cadre du PUASA ont tous reconnu avoir des champs de coton en parallèle. L'objectif est d'utiliser l'engrais du coton pour le champ de maïs. De l'aveu des producteurs, cet engrais est très bénéfique pour le maïs. Le constat est confirmé par les cotonculteurs qui juxtaposent les champs de coton et de maïs dans le même but (photo 16). Quand il ne dispose pas d'assez d'espace pour une juxtaposition, c'est au cours de la rotation qu'il espère en profiter, cultivant du maïs à l'emplacement de l'ancien champ de coton, ce dernier bénéficiera alors de nouvelles friches.



Cliché : BOKO G., 2010

Photo 16 : Champs de coton et de maïs juxtaposés à Gogounou

Sur cette photo, on voit à droite le champ de maïs et à gauche celui de coton. Deux raisons peuvent justifier l'emplacement du champ de maïs. Soit le sens du ruissèlement (l'eau y emporterait les intrants appliqués pour le coton), soit il est localisé sur un ancien champ de coton.

Enfin, le troisième effet recensé est d'origine économique. Les producteurs signalent une tendance plutôt curieuse dans le prix des intrants. La remarque générale est une fluctuation du prix en fonction du rendement de la campagne précédente. Si le kilogramme de coton a connu une hausse au cours de la campagne actuelle, le prix de cession des intrants sera plus élevé à la campagne prochaine. Les intrants étant généralement vendus à crédit, une fois ce dernier remboursé, le bénéfice des producteurs chute substantiellement. La "solution" trouvée par les producteurs à ce problème est l'accroissement de la taille des champs. Solution qui ne fait en réalité qu'entretenir ce cercle vicieux.

Un dernier aspect des facteurs institutionnels, c'est le temps de collecte des produits récoltés. Pour le producteur agricole qui travaille selon un calendrier rythmé par les

saisons, la garantie de l'écoulement de la production n'est pas toujours suffisante. Il faut que cela se réalise de façon à respecter son calendrier. Lors des travaux de terrain, ils ont confié que si le coton n'est pas pesé et collecté au plus tard en décembre, tout leur calendrier est faussé. Les feux de brousse pratiqués pour le défrichement seront des feux tardifs. Ceux dont les produits sont déjà collectés peuvent allumer les feux qui menaceront les champs non encore collectés. Des pluies isolées peuvent survenir à tout moment, avec des risques de détérioration de la qualité de la production. Ceci est valable pour le coton et le maïs. Surtout pour le coton, pour lequel les producteurs n'ont pas développé de système de conservation particulier. Le produit récolté est laissé en vrac sur le champ, exposé aux intempéries, en attendant la collecte (photo 17). Plus le producteur attend, plus il est découragé (surtout si le prix du kilogramme est bas), car le coton perd sa qualité. La plupart du temps, il choisit de réduire son investissement dans la filière pour s'intéresser à une autre "mieux organisée" (comme le maïs ou plus récemment le soja) et plus en accord avec son calendrier. Les superficies consacrées à cette filière seront donc diminuées au profit d'autres.



Cliché : BOKO G., 2011

Photo 17 : Coton récolté dans un champ à Ouara (Gogonou)

La photo ci-dessus illustre un champ de coton, où la récolte a déjà commencé. Le coton récolté est regroupé en un grand tas qui sera pesé avant d'être convoyé vers les usines ou les magasins. Le temps passé à attendre les camions pour la collecte constitue un facteur conditionnant la production pour la campagne suivante.

Les différents facteurs à la base de l'utilisation du sol, ainsi que des changements

dans l'occupation et l'utilisation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori ayant été identifiés suite aux travaux de terrain, il convient de confronter ces résultats à ceux de travaux antérieurs sur le même thème et/ou dans la même zone d'étude afin de ressortir les limites de l'étude.

4. Discussion

Du point de vue de la méthode de production des cartes d'occupation du sol, il faut signaler que la forte influence de la végétation sur les signatures spectrales rend encore plus difficile la différence entre les différentes formations végétales. Si les données utilisées permettent de voir clairement une évolution de certains phénomènes à grande échelle, la réalisation d'une carte à moyenne échelle nécessite le recours à des résolutions plus fines ou à l'utilisation de photos aériennes pour rendre compte des groupements végétaux existants ou de la physionomie de la végétation en place (Moran et *al.* 1992, Belkheri, 2003). L'exploitation des données satellites ne dispense pas du terrain, même si elle permet de réduire les observations au sol nécessaires à une étude. Les classifications servent à spécifier les grandes unités homogènes mais ne sont pas d'une grande utilité pour distinguer plus finement les différents groupements végétaux (Grégoire et Ferrari, 1990 ; Janeau, 1992).

Les données de terrain ne sont pas toujours satisfaisantes, le problème de l'hétérogénéité limite la sélection des parcelles d'une taille suffisante pour être repérables sur image. Il est difficile de trouver assez de parcelles pour l'entraînement et d'autres pour le contrôle afin de pouvoir évaluer les classifications supervisées. Un plan d'échantillonnage précis est requis dans ce but (Boulahouat et Naert, 1996 ; Schowengerdt, 1997).

En ce qui concerne la méthode de détection des changements, deux approches essentielles sont reconnues dans le domaine de la recherche sur la dynamique de l'occupation du sol : (i) une analyse comparative de produits issus de classifications indépendantes, et (ii) une analyse simultanée de données multi-temporelles. La seconde approche comprend les opérations sur les images (division, soustraction, etc.), l'analyse en composantes principales et les analyses vectorielles. La méthode la plus directe semble être la comparaison de cartes d'occupation datant de périodes

différentes. Cette approche présente l'avantage de compenser les variations atmosphériques et les conditions phénologiques entre les deux dates ou même entre deux différents capteurs. Chaque classification étant produite indépendamment mais cartographiée selon la même thématique (Briassoulis, 2000). C'est approche qui a été utilisée ici pour les cartes d'occupation du sol. Cette méthode a été critiquée car elle tend à combiner les erreurs des classifications initiales (Visser, 2004).

Quant aux facteurs identifiés, l'absence de la seconde activité la plus pratiquée, l'élevage, reste un fait remarquable. Pour autant, les impacts de l'élevage sur l'occupation du sol existent et sont visibles sur le terrain. Il s'agit par exemple des feux de végétation ou de l'émondage des ligneux. Ces impacts agissent souvent comme des facteurs indirects. Par ailleurs, si l'étude avait pris en compte le circuit de transhumance des éleveurs, il serait possible de connaître les potentiels sites de campement. Cette information, cumulée avec la taille des familles permettra d'avoir une idée de la taille du champ qui sera installé autour du campement par exemple. Ce qui par extrapolation pourrait fournir des informations sur la surface à défricher ainsi que les pertes potentielles en biodiversité.

D'une façon plus générale, plusieurs travaux scientifiques ont abordé la question de l'identification des principaux facteurs régissant l'occupation et l'utilisation de l'espace. Pour Vissin (2007) qui a travaillé à l'échelle du bassin du Niger au Bénin le principal facteur est la démographie dont l'augmentation constitue une source de pression croissante sur les ressources naturelles et fait progresser le phénomène de déforestation. Pour Sounon Bouko et *al.* (2007), c'est plutôt la culture itinérante qui est la première cause de déboisement. Les auteurs précisent que l'extension des superficies cultivées est liée au besoin en friche pour certaines cultures très exigeantes en sols fertiles telles que l'igname. Pour répondre à cette exigence de la culture d'igname certains agriculteurs accroissent leurs superficies en nouvelles friches chaque année pour élever le niveau de leur production. Ces deux travaux vont dans le même sens les résultats obtenus dans cette thèse.

D'autres études, à l'échelle globale ont essayé de faire une catégorisation des différents déterminants de l'occupation et de l'utilisation du sol.

Lambin et *al.* (2001) ont essayé d'aller au-delà des « mythes » classiques en matière de déterminants de l'occupation et l'utilisation du sol. Pour eux, la plupart des

travaux passent outre les facteurs indirects de l'occupation du sol. Ces causes ont des liens étroits avec les opportunités économiques, les choix politiques et l'accessibilité des marchés. En résumant un certain nombre d'études de cas, Lambin et *al.* (2003) trouvent que les changements dans l'occupation et l'utilisation du sol sont dus à une combinaison de causes principales qui sont :

- la rareté des ressources qui conduit à une augmentation de la pression sur ces ressources ;
- les variations des opportunités créées par les marchés ;
- les interventions de décideurs externes ;
- la perte des capacités d'adaptation et augmentation de la vulnérabilité ;
- les changements dans l'organisation sociale, l'accès aux ressources ainsi que les changements de comportement.

Ces causes pouvant agir aussi comme des contraintes en forçant les acteurs locaux à prendre des décisions de dégradation, d'innovation ou de déplacement. Les auteurs précisent que toutes ces causes peuvent ne pas être présentes dans une même région. Seule une combinaison d'interactions synergétiques est rencontrée. D'une façon plus schématique, l'occupation du sol et ses déterminants directs et indirects peuvent être représentés sous la forme de l'équation suivante :

Occupation du sol = *f* (pression, opportunités, politiques, vulnérabilités, organisation sociale). Ces différents facteurs peuvent être détaillés comme suit :

- Pression = *f* (population utilisatrice des ressources, emploi, disponibilité des ressources, fragilité des ressources) ;
- Opportunités = *f* (prix du marché, coûts de production, coût du transport, technologie) ;
- Politiques = *f* (subventions, taxes, régime foncier, infrastructure, gouvernance) ;
- Vulnérabilités = *f* (exposition aux perturbations externes, sensibilité, capacités d'adaptation) ;
- Organisation sociale = *f* (accès aux ressources, niveau de revenus, caractéristiques du ménage, interactions rurales-urbaines).

Pour Briassoulis (2004), les facteurs influençant les changements dans l'occupation et l'utilisation du sol existent à deux échelles spatiales : au niveau de la parcelle individuelle et au niveau régional (sous-bassin, bassin, pays, sous-région, globe). A l'échelle de la parcelle, les facteurs biophysiques potentiels sont le climat local, la topographie, les sols, la géologie, l'hydrographie de surface et l'hydrographie souterraine. Les choix et décisions conduisant aux changements dans l'utilisation du sol sont influencés par des facteurs comme la taille du ménage, l'âge, le genre, le niveau d'instruction, les caractéristiques socioéconomiques du ménage, l'accessibilité, les conditions spécifiques du site, les coûts du transport, les coûts de production, la taille du champ, la concurrence, la rentabilité, le régime foncier, les prix des produits, l'appui financier public et privé, les pratiques en matière de gestion des terres. A l'échelle spatiale supérieure, les facteurs biophysiques clefs sont le climat, la géomorphologie, la géologie, l'hydrographie, les sols, la faune et la flore. Les déterminants sociétaux concernent la structure de la population et sa dynamique, le niveau technologique, l'organisation socioéconomique, la culture, les systèmes politique et institutionnel, la demande spatiale.

Enfin, Lambin et *al.* (2007) distingue six (06) catégories de facteurs directs ou indirects contribuant à la dynamique de l'occupation du sol. Il s'agit, des facteurs économiques et technologiques, des facteurs démographiques, des facteurs institutionnels, des facteurs culturels, de la globalisation et de la variabilité naturelle.

De façon générale, on peut dire que les résultats obtenus dans ce chapitre sont corroborés par les travaux précédemment cités. Les facteurs identifiés dans la zone d'étude ne sont pas particulièrement différents de ceux reconnus comme principaux déterminants des changements dans l'occupation/l'utilisation du sol de manière globale. Toutefois, il faut signaler que les travaux mentionnés précisent que les facteurs n'agissent pas isolément. Ils constituent un réseau complexe avec des interactions entre eux. Les changements observés dans l'occupation et l'utilisation du sol sont la résultante de ces différentes interactions. La présente étude ne prend pas en compte les relations complexes et les rétroactions potentielles entre les facteurs qui ont été identifiés.

Conclusion partielle

La dynamique de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori a été étudiée en se basant sur les cartes de 1972, 1990 et 2008. Les résultats obtenus montrent que les formations végétales naturelles sont en pleine régression. C'est le constat inverse pour les unités d'occupation d'origine anthropique comme les champs, les jachères et les installations humaines. Ces trois unités d'occupation ont progressé au détriment des autres unités naturelles. Seules les formations végétales « hostiles » à l'agriculture pour diverses raisons (relief, hydrographie, etc.) n'ont pas été affectées par cette extension des champs et autres jachères. Il s'agit des savanes saxicoles, des fourrés, des prairies et des plantations. Les potentiels facteurs à la base de cette dynamique ont été recherchés à travers la littérature et les travaux de terrain. Il en ressort que différentes catégories de facteurs interviennent dans la dynamique de l'occupation du sol dans la zone d'étude. Ces facteurs agissent de façon très complexe et permet de sortir du cliché croissance démographique = dégradation environnementale. Cela n'exclut pas pour autant le facteur démographique des causes de l'occupation du sol. Les principaux facteurs identifiés sont :

- les facteurs biophysiques : le relief, les sols et l'hydrographie ;
- les facteurs spatiaux : la disponibilité de terres cultivables, la localisation des unités d'occupation exploitables ;
- les facteurs humains : ils sont d'ordre social (la taille des ménages par exemple influe sur la taille des champs) et culturel (les spéculations les plus importantes sont fonction du groupe socioculturel) ;
- les facteurs économiques : l'agriculture en tant qu'activité économique, la rentabilité des différentes spéculations ;
- les facteurs institutionnels : les mesures incitatives ou accompagnatrices, les projets visant telle spéculation ou telle autre.

Ces différentes facteurs ainsi que la dynamique des principales unités d'occupation font partie des paramètres principaux nécessaires pour la connaissance des trajectoires potentielles desdites unités d'occupation. L'étude de la variabilité climatique permettra de connaître les tendances thermométriques et pluviométriques du bassin.

Chapitre 5 : Variabilité climatique, facteur de dynamique dans le bassin de l'Alibori

Cette partie du travail présente les résultats des traitements et des analyses des donnés climatiques. Ces résultats permettent de caractériser la variabilité climatique dans la zone d'étude. Pour caractériser cette dynamique, une série d'indices décrivant la variation des différents paramètres (pluie, température et ETP) étudiés sur la période 1965-2004 a été élaborée.

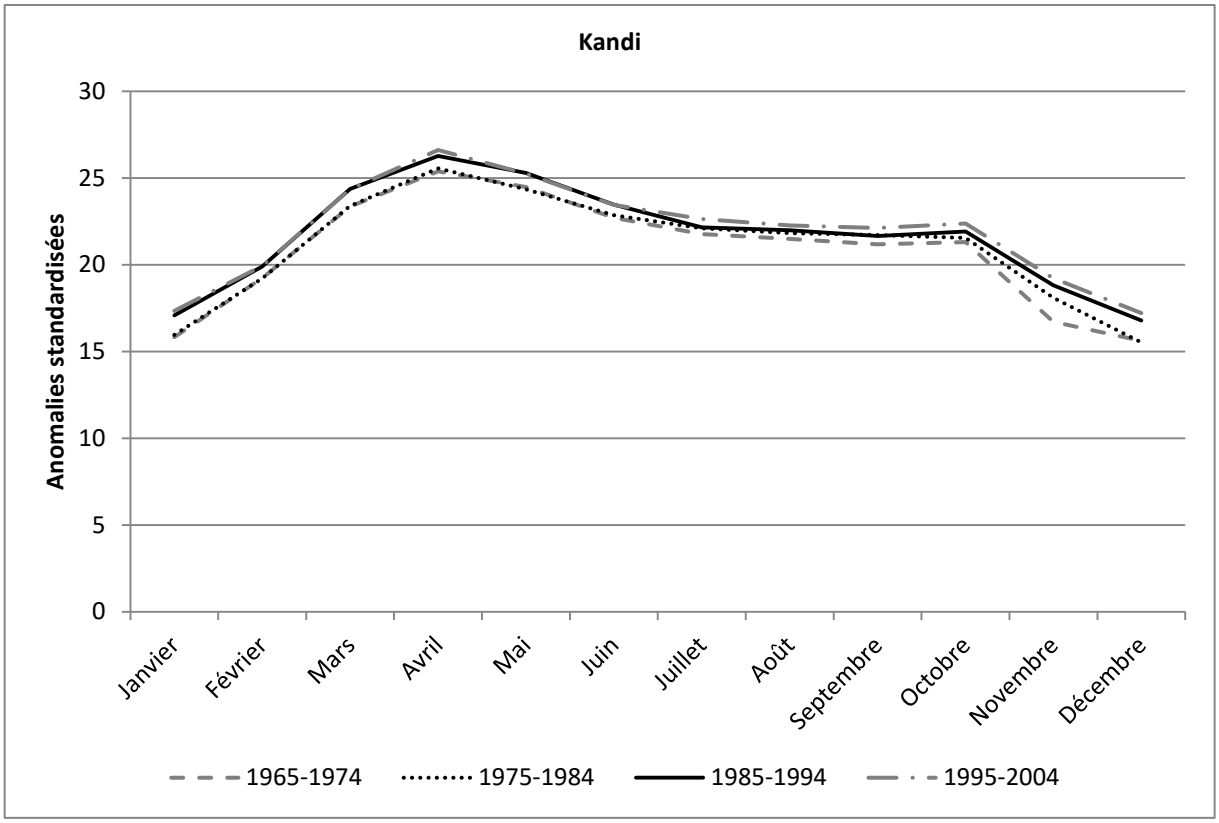
Une des nouveautés de ce travail est l'introduction de l'aspect climatique dans les paramètres de la modélisation. Des études antérieures (Soepboer, 2001, Engelsman, 2002, Orékan, 2008, Fotsing, 2009, etc.) ont déjà pris en compte la pluviométrie dans les facteurs pour la modélisation de l'occupation du sol.

La différence ici réside plutôt dans l'intégration de la variabilité spatiotemporelle de cette pluviométrie comme potentiel facteur à la base de la dynamique de l'occupation du sol.

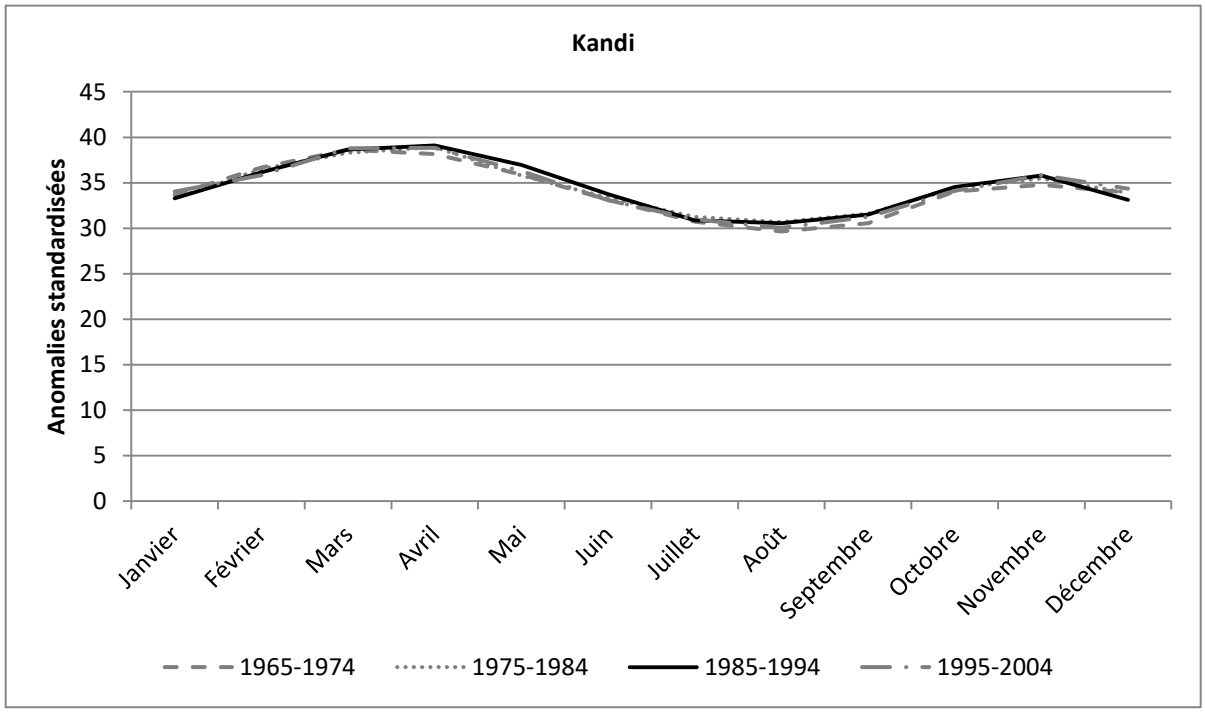
Ce chapitre aborde l'évolution des données thermométriques et leurs tendances sur la période de référence à une échelle stationnelle du fait de la présence d'une seule station synoptique dans le milieu. Ensuite les tendances pluviométriques et leur variabilité spatiotemporelle sont étudiées aussi bien à l'échelle du bassin qu'à l'échelle stationnaire. Enfin, le bilan climatique du bassin-versant de l'Alibori a été élaboré.

1. Evolution et tendances thermométriques

Pour caractériser les minima et maxima des températures dans le bassin de l'Alibori, les données recueillies à la station de Kandi sur la période 1965-2004 ont été divisées en quatre sous-périodes de 10 années. Ces sous périodes sont : 1965-1974, 1975-1984, 1985-1994 et 1995-2004. Les moyennes mensuelles des températures minima et maxima ont été calculées pour ces différentes périodes. La figure 41 illustre les résultats obtenus.



a



b

Figure 41 : Variabilité des températures minimales (a) et maximales (b)

Sur la figure 41a, deux décennies (1965-1974 et 1975-1984) s'écartent nettement des deux autres. L'allure des quatre courbes restent toutefois les mêmes avec deux pics : le premier en avril au cours de ce qui est appelée « *période de chaleur* » et le second en octobre, à la fin de la période d'hivernage. Entre les deux pics, on observe une légère baisse des différentes courbes de mai à septembre, où les courbes ont une allure de pente douce. L'écart constaté entre les deux décennies permet d'affirmer que de 1965 à 2004 les températures minimales moyennes ont connu une augmentation variant de 0,5 à 1°C. D'une manière générale, les populations riveraines sont d'avis pour reconnaître qu'il fait moins froid et que l'harmattan n'est plus aussi rigoureux qu'autrefois. En effet, il n'est pas rare au cours de cette période d'entendre les plus âgés répondre aux plus jeunes qui se plaignent de la fraîcheur « *qu'ils ont de la chance car il y a quelques années, c'était pire* » (Boko, 2010, travaux de terrain).

Les courbes des températures maximales (figure 41b) ont une allure similaire à celles des minima. Avec cette différence qu'on n'observe pas d'écart marqué entre les différentes décennies. Les moyennes mensuelles les plus élevées sont constatées au cours des mois de mars et avril. Les températures décroissent ensuite jusqu'en septembre avant un nouveau pic entre septembre et novembre avant de décroître à nouveau. Il faut noter qu'ici la baisse des températures maximales entre mai et septembre est plus prononcée avec une allure en forme de cuvette (figure 41b).

L'évolution annuelle des maxima et minima des températures étant connue, il s'agit de voir par la suite quelles sont les tendances de ces deux variables sur l'ensemble de la période d'étude.

1.1. Tendances des températures maximales et minimales

Afin de caractériser les tendances des températures maximales et minimales dans le secteur d'étude, les paramètres tels que l'écart centré réduit et la moyenne mobile sur cinq ans ont été calculés. Une courbe de tendance linéaire y a ensuite été ajoutée.

La figure 42 présente les tendances des températures maximales sur la période 1965-2004.

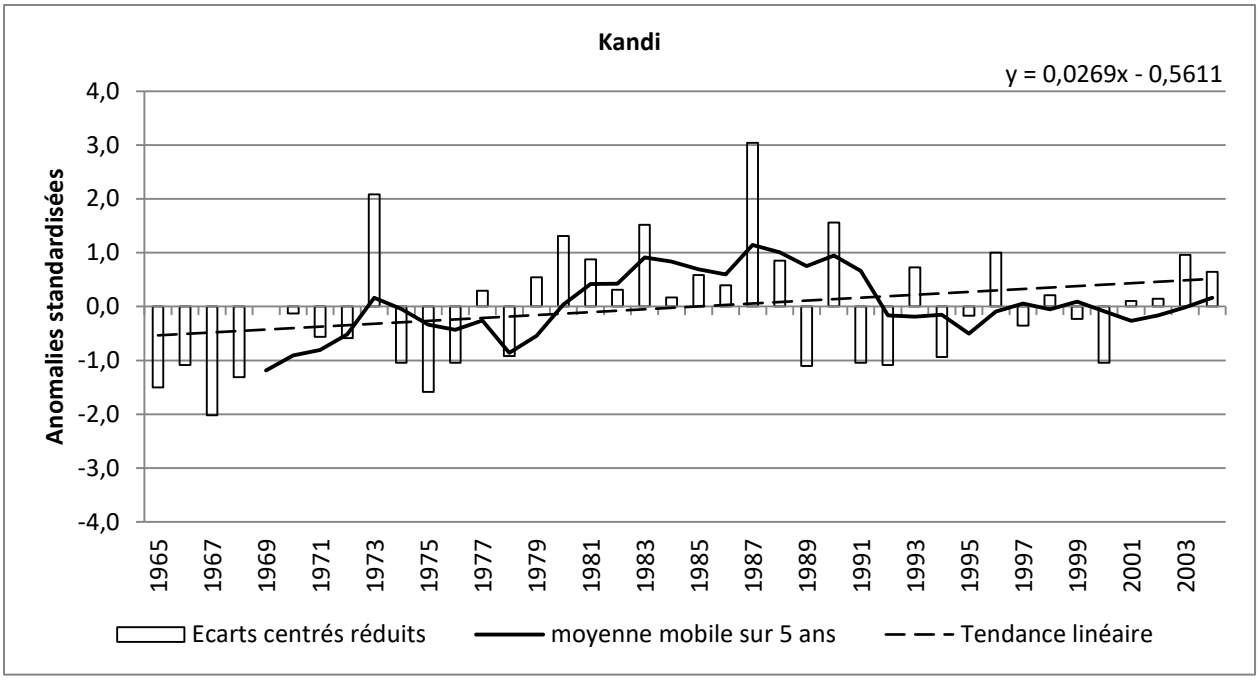


Figure 42 : Anomalies des températures maximales à la station de Kandi (1965-2004)

A l'analyse de la figure 45, on distingue au niveau trois différentes périodes. Une première période allant de 1965 à 1978 où les indices sont tous négatifs excepté 1973 avec une anomalie de 2,1. A cette période qu'on pourrait qualifier de « moins chaude » succède une période plus chaude qui va de 1979 à 1990. A l'image de la période précédente elle est marquée par une exception, l'année 1989. Cette période est la plus chaude de toute la période retenue avec l'année 1987 où les anomalies culminent à +3. La troisième est marquée par une relative irrégularité dans les indices même si la tendance est globalement à la hausse. L'allure courbe de la moyenne mobile sur cinq ans confirme d'ailleurs cette évolution. La courbe de tendance indique une augmentation sur toute la période. L'équation de la droite de régression, avec un *a* positif en est la preuve.

La figure 43 relative à l'évolution décennale des températures maximales sur la période d'étude confirme l'existence des trois périodes constatées au niveau des écarts à la moyenne et de la moyenne mobile. De 1965 à 1984, la moyenne des maximales a crû de 0,31°C, passant de 34,15 à 34,46°C en vingt ans. Soit 0,015° par an. Cette augmentation continue au cours de la décennie suivante, mais de façon moins marquée. La moyenne passe à 34,52° C, soit une augmentation de 0,06°C. La dernière décennie marque la rupture avec les précédentes. La moyenne des maxima décroît et atteint celui de la décennie 1975-1984, soit 34,45°C.

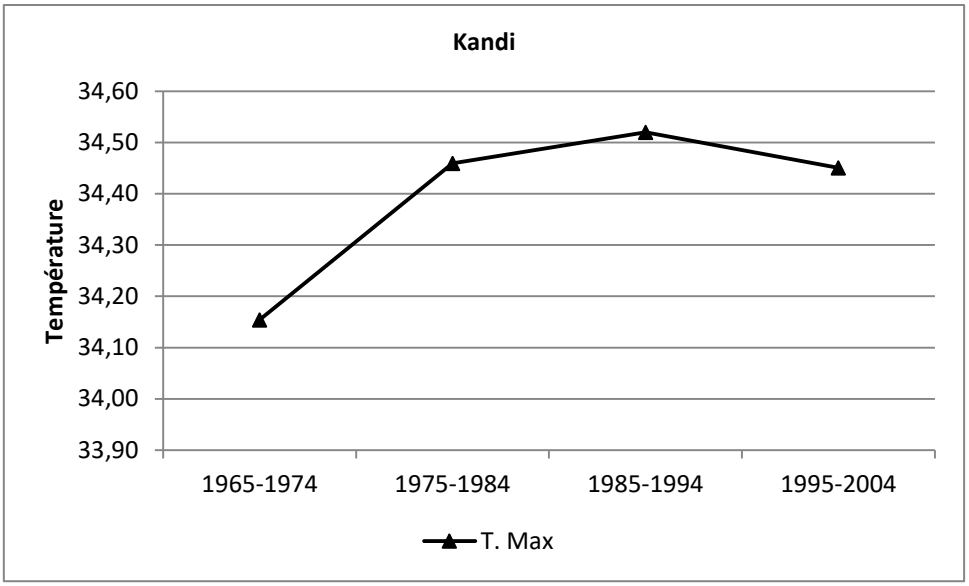


Figure 43 : Evolution décennale des températures maximales (1965-2004)

Toutefois, si on se fie aux écarts centrés réduits et à la moyenne mobile, on tend vers un nouveau réchauffement, les valeurs devenant positives à partir de l'année 2003.

Les températures minimales ont été aussi étudiées sur la même période afin de caractériser leur évolution. La figure 44 représente pour les minima de température, les écarts à la moyenne, la moyenne mobile sur cinq ans ainsi que la courbe de tendance linéaire.

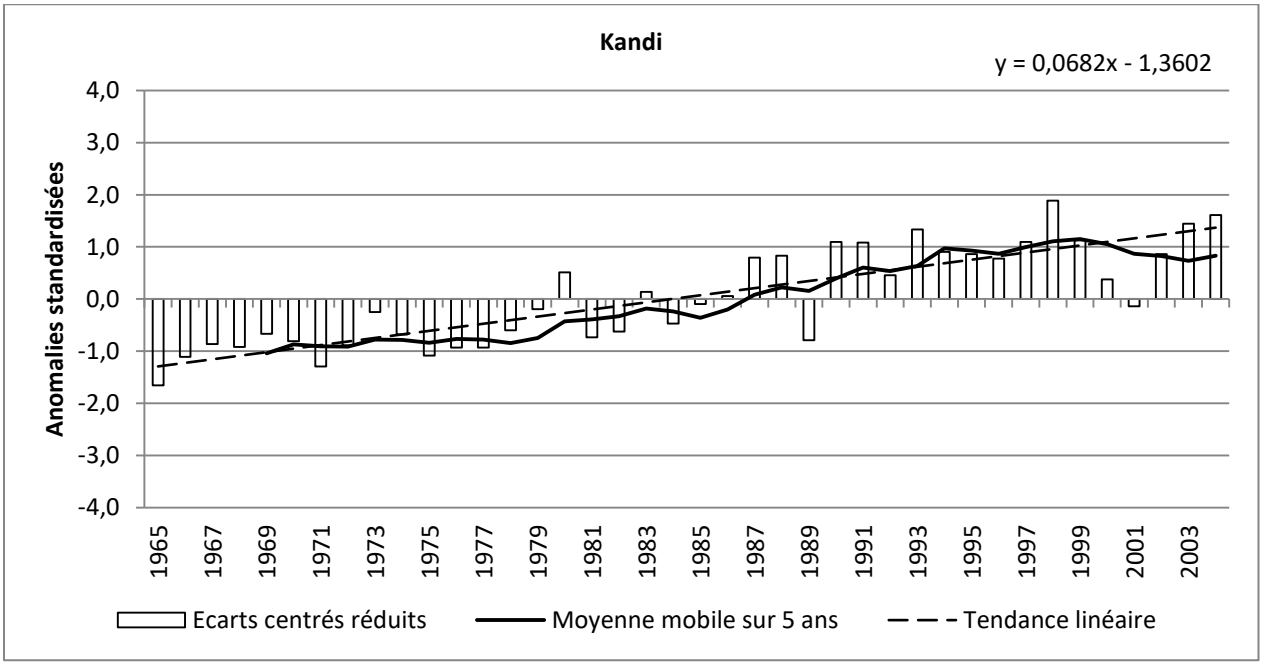


Figure 44 : Anomalies des températures minimales (1965-2004)

Les minima ne décrivent pas la même allure que les maxima. Deux grandes périodes peuvent être observées ici. La première période dure 21 ans, allant de 1965 à 1985. Au cours de cette période tous les indices sont négatifs à l'exception de l'année 1950 avec une valeur positive de 0,5. De 1986 à 2004 les indices sont tous positifs sauf pour les années 1989 et 2001 où ils ont une valeur négative. L'année 1998 se distingue même par un pic exceptionnel à 1,9. Les courbes de moyenne mobile et de tendance linéaire ont une similaire, décrivant toutes les deux une tendance à la hausse même si la moyenne mobile connait un léger fléchissement. Tendance confirmée par l'équation de la droite où *a* est positive.

Une subdivision en décennies permet de mieux détailler l'évolution des températures minimales.

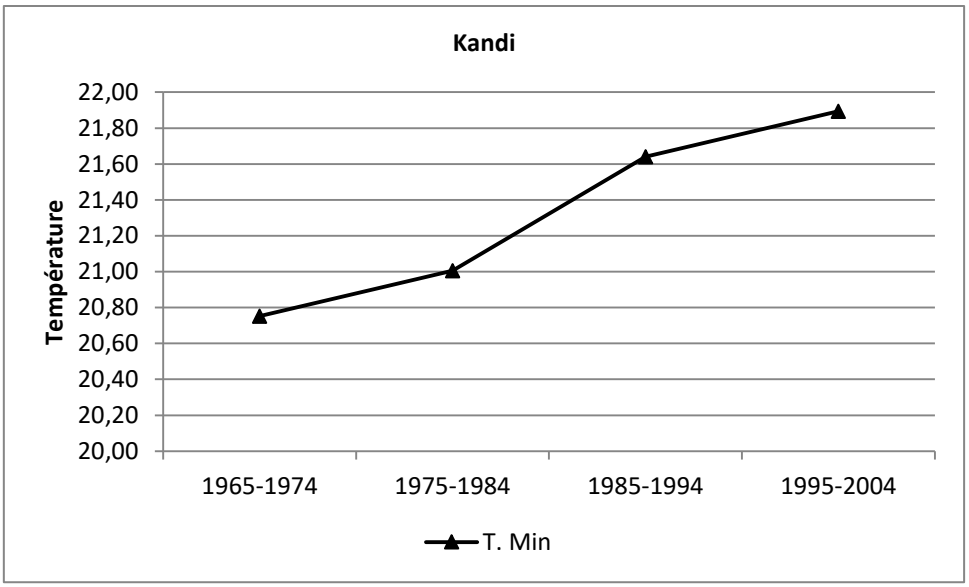


Figure 45 : Evolution décennale des températures minimales (1965-2004)

L'évolution décennale des minima de températures confirme l'augmentation constatée plus haut avec les valeurs des écarts à la moyenne. La courbe a une allure ascendante marquée par une pente légère de la première à la seconde décennie (1965-1974 à 1975-1984) suivi d'une croissance plus marquée au cours de la troisième décennie (1985-1994). L'augmentation de température continue au cours de la dernière décennie avec une augmentation moins prononcée. La moyenne passe de 20,75°C à 21,01°C en 1984, soit une augmentation de 0,26°C. Cette augmentation est plus forte la décennie suivante, montant jusqu'à 21,64°C, soit 0,06°C de plus par an.

La dernière décennie confirme cette augmentation des minima avec une température moyenne de 21,89°C.

Au total, les températures minimales sont passées de 20,75°C à 21,86°C connaissant ainsi une hausse de 1,16°C en 40 ans, soit environ 0,03°C par an.

Les tendances des températures minimales et maximales étant connues, il s'agit de savoir quelle est la tendance moyenne des températures au niveau de la station de Kandi.

1.2. Evolution et tendances des températures moyennes

Les valeurs moyennes de la température sur de la période 1965-2004 à la station de Kandi sont consignées dans le tableau XVI.

Tableau XVI : Températures moyennes mensuelles à la station de Kandi (1965-2004)

Mois	***Janv.***	***Févr.***	***Mars***	***Avril***	***Mai***	***Juin***	***Juil.***	***Août***	***Sept.***	***Oct.***	***Nov.***	***Déc.***
Valeurs	*25,06*	*27,93*	*31,23*	*32,36*	*30,54*	*28,22*	*26,56*	*26,06*	*26,45*	*28,02*	*26,84*	*25,05*

Les températures moyennes mensuelles à la station de Kandi varient entre 25,05°C en décembre et 32,36°C. Les températures moyennes varient substantiellement au cours de l'année. L'écart entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud est de 7°C. Les températures moyennes maximales s'observent au cours des mois de mars et avril. Cette période correspond à ce qui est appelé la « période de chaleur » par les habitants. Ces derniers vont parfois jusqu'à distinguer cette période comme une saison à part qu'ils appellent la saison de chaleur. Quant aux températures moyennes minimales, elles sont relevées entre novembre et décembre au cours de la période d'harmattan, réputée très froide dans le secteur d'étude.

L'étude de la variation interannuelle de la température de l'air montre qu'elle connait une hausse régulière sur toute la période 1965-2004 (figure 46).

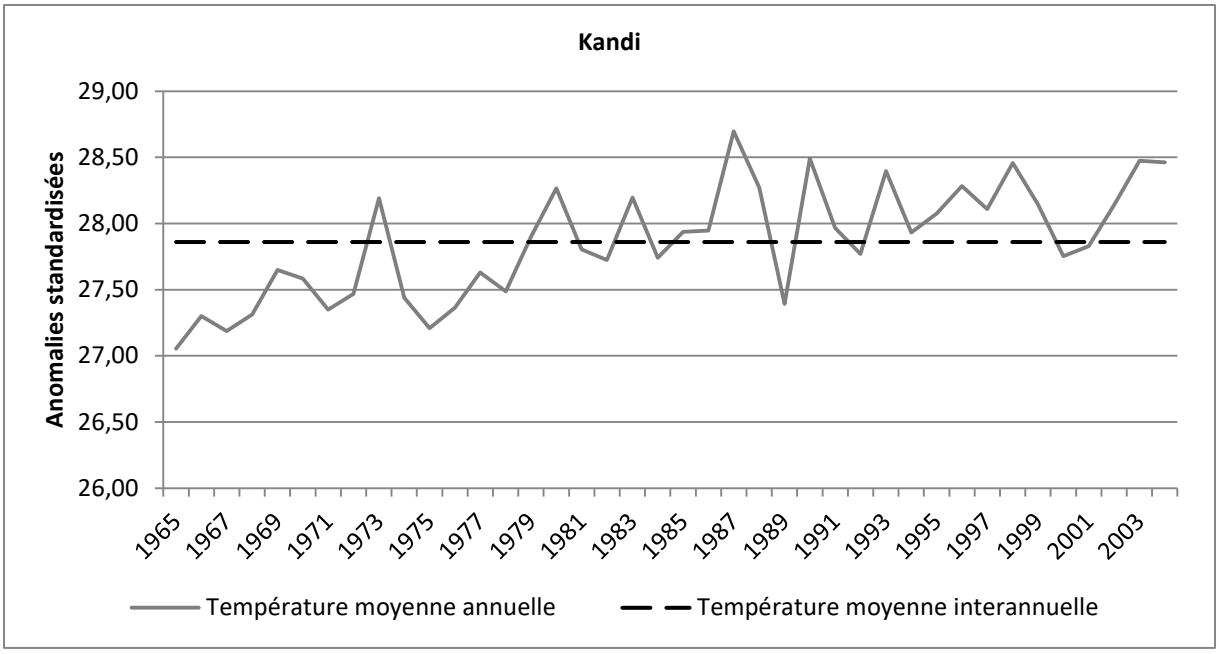


Figure 46 : Variation interannuelle de la température moyenne (1965-2004)

La lecture de la figure 46 permet de remarquer que 1965 à 1978, la température moyenne est restée inférieure à la moyenne (27,86°C) excepté en 1973 avec un pic à 28,19°C. Par la suite elle croît plus ou moins régulièrement jusqu'en 2004. Il faut toutefois signaler trois années (1989, 1992 et 2000) où elle passe en dessous de la moyenne (respectivement 27,39°C et 27,77°C et 27,75°C).

On constate que les températures sont de plus en plus élevées à la station de Kandi et ne semblent pas régresser. Cette tendance a été accentuée à partir des années 1990 comme le confirme la figure 47 ci-après.

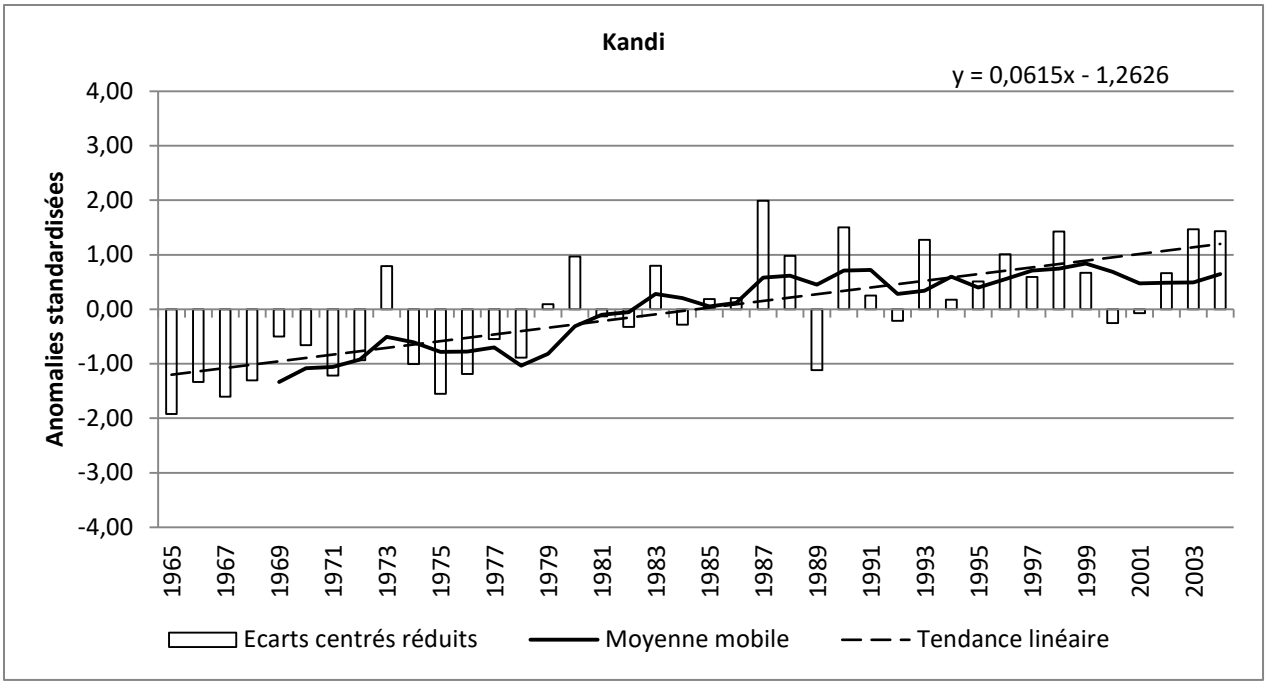


Figure 47 : Anomalies des températures moyennes (1965-2004)

La courbe de la moyenne mobile et celle des tendances indiquent toutes les deux une croissance à la hausse des températures moyennes. A l'image des minima, deux grandes périodes. La première va de 1965 à 1984 et est marquée par des écarts centrés réduits inférieurs à la moyenne. Toutefois trois années, 1976, 1680 et 1983 se différencient de cette période "déficitaire" par des écarts supérieurs à la moyenne. La seconde période qui va de 1985 à 2004 est marquée par une augmentation des températures moyennes à l'exception des années 1989, 1992 et 2000.

Cette tendance générale à la hausse cache des disparités qu'il est utile de ressortir en se basant sur une analyse à l'échelle décennale. La figure 48 illustre les rythmes décennaux des températures moyennes à la station de Kandi.

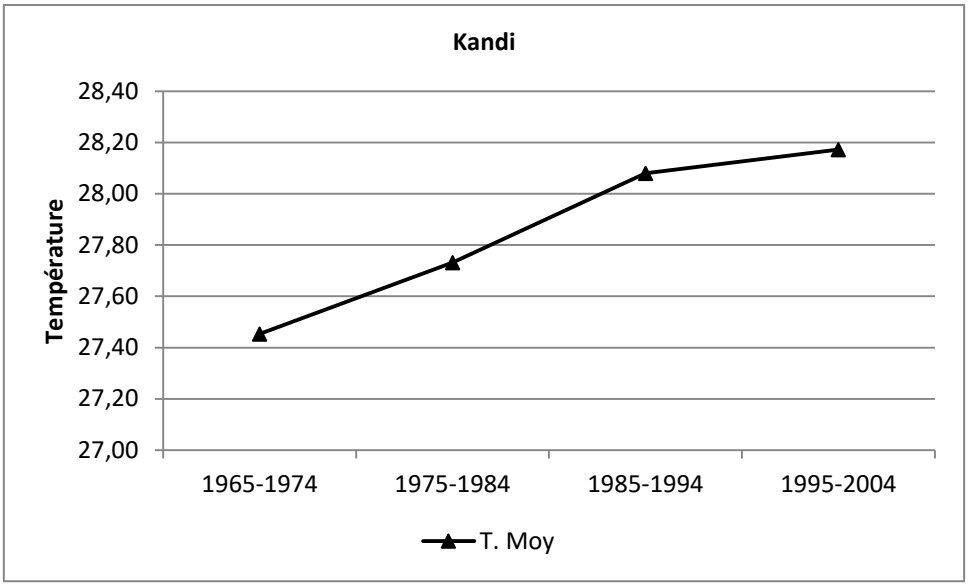


Figure 48 : Rythmes décennaux des températures moyennes

L'allure de la courbe confirme le constat du réchauffement établi précédemment. La pente entre les décennies 1975-1984 et 1985-1994 est plus prononcée. De façon générale, la courbe croît de 1965 à 2004 mais pas de manière identique. On observe une pente plus ou moins rectiligne de 1965 à 1994, les moyennes croissant de 27,45°C à 28,08°C, soit une augmentation de 0,63°C. Cette pente s'adoucit ensuite légèrement et la température moyenne décennale passe à 28,17°C soit une augmentation de 0,09°C. En trente années, les moyennes décennales ont augmenté de 0,021°C par an pour la période 1965-1994, et de 0,009°C pour les dix dernières années (1995-2004).

On pourrait donc en déduire que si on assiste à une augmentation des températures à la station de Kandi, cette augmentation n'est pas constante et n'est pas non plus due à une croissance des maxima mais plutôt des minima.

Les diagrammes reliant pluies et températures ou diagrammes ombrothermiques de la station de Kandi sur la période 1965-2004 permettent d'observer que, d'une façon générale, de faibles valeurs de température sont observées pendant les mois de fortes pluviométries et des températures élevées pendant les mois de faibles pluviométries. La figure 49 illustre ce constat.

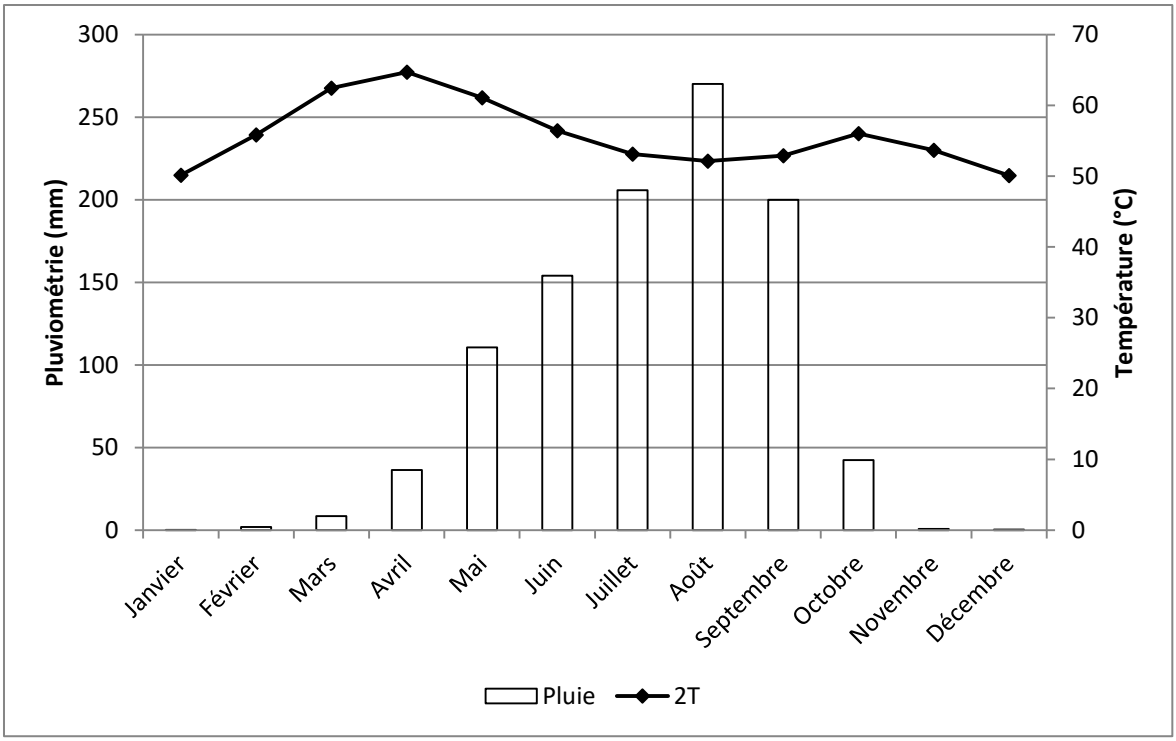


Figure 49 : Diagramme ombrothermique de la station de Kandi

L'analyse de la figure 49 permet de se rendre compte que les températures moyennes les plus faibles sont enregistrées au mois d'août. Ce même mois d'août enregistre les pluviométries moyennes les plus élevées avec un pic à 270 mm. Le reste de l'année, la courbe des températures reste au-dessus de la pluviométrie.

2. Tendances pluviométriques dans le bassin de l'Alibori

Le traitement des données pluviométriques a permis de calculer les indices annuels pour chaque station présente dans le bassin. Ces indices ont permis d'avoir une meilleure idée de la variabilité spatio-temporelle des hauteurs de pluie dans la zone d'étude au cours de la période retenue. Avant d'aborder la variabilité des hauteurs de pluie au niveau du bassin, le phénomène sera étudié d'abord à l'échelle des différents secteurs climatiques identifiés dans la zone d'étude. D'après ce découpage, les stations situées entre 10° et 11°N appartiennent au domaine soudanien typique (Bembèrèkè et Kérou) tandis que les stations localisées entre 11°N jusqu'à la limite du bassin se situent dans le domaine soudano-sahélien caractérisé par une saison sèche plus longue.

2.1. Le domaine soudano-sahélien

Les figures 50, 51 et 55 représentent la variabilité pluviométrique interannuelle pour les stations de Kandi, Malanville et Banikoara. Une analyse de ces figures fait ressortir de façon globale, trois grandes périodes, deux excédentaires et une déficitaire. Une première période légèrement excédentaire démarre de 1965 à la fin des années 70 (1978 pour Banikoara et Malanville, 1979 pour Kandi). Il faut toutefois préciser qu'à la station de Malanville, l'excédent pluviométrique n'est pas très marqué. Cette période pourrait même être qualifiée de normale au vu des années 1971 à 1973 marquées par un déficit prononcé.

Cette décennie excédentaire est suivie par une longue période déficitaire qui s'étend sur quinze années ou plus selon les stations. C'est la station de Malanville qui présente la plus longue période. De 1976 à 2001, les indices pluviométriques annuels seront globalement négatifs. Il en va de même pour les deux autres stations à la différence que la période déficitaire s'arrête en 1997 pour Kandi et en 1994 pour Banikoara.

La troisième période voit une légère reprise de la pluie sur les trois stations. Mais l'ampleur de cette reprise n'est pas identique au niveau de ces stations. Ainsi, le nombre d'années excédentaires enregistrées au cours de cette période varie selon les stations. Il est vrai que la variation constatée dans l'année de reprise est à la base de cette inégalité dans le nombre d'années excédentaires.

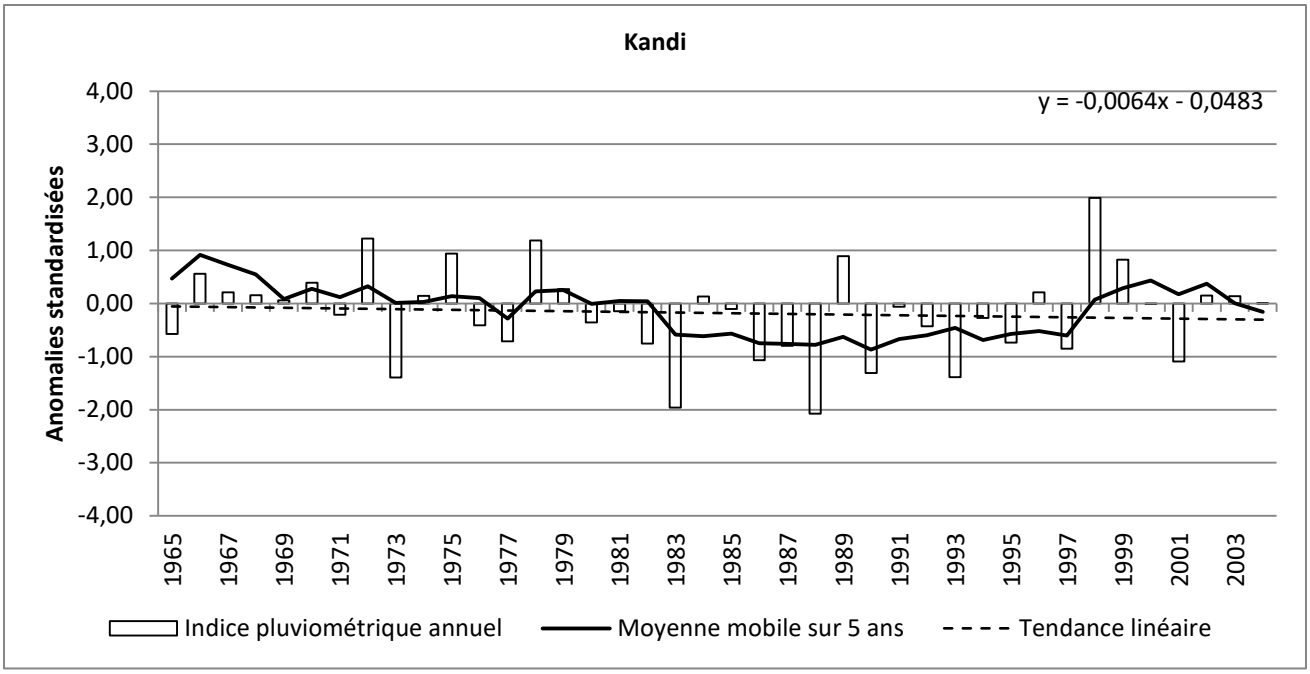


Figure 50 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Kandi (1965-2004)

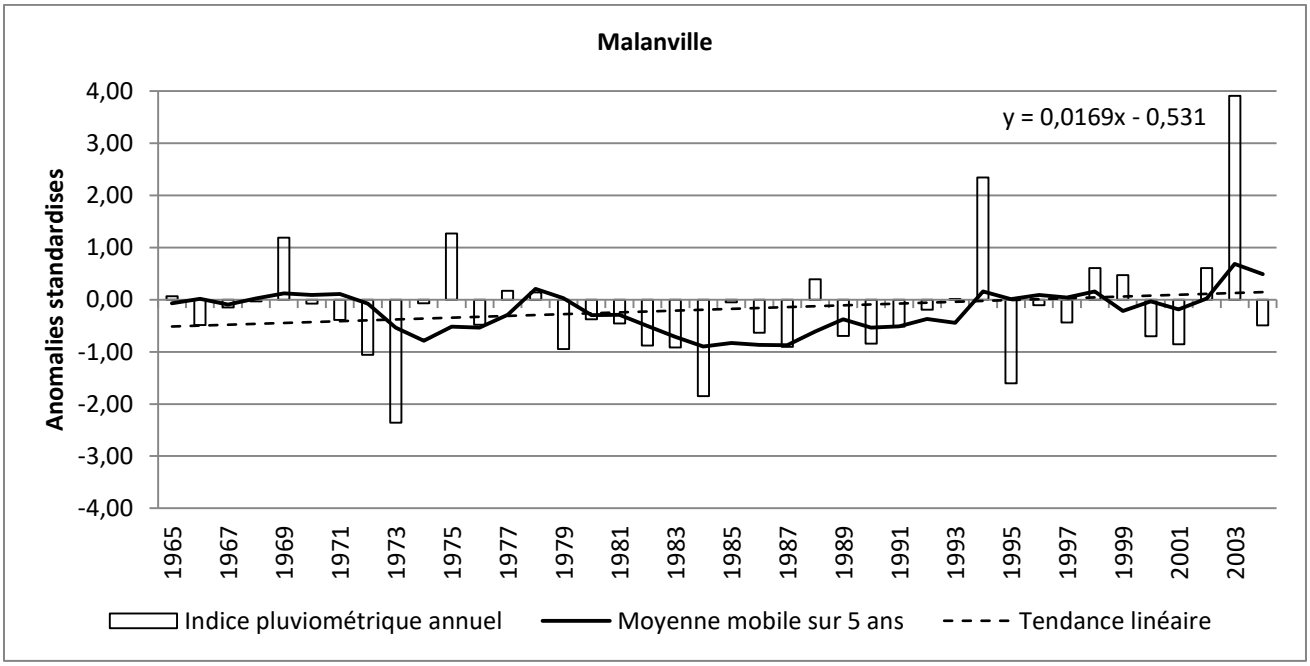


Figure 51 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Malanville (1965-2004)

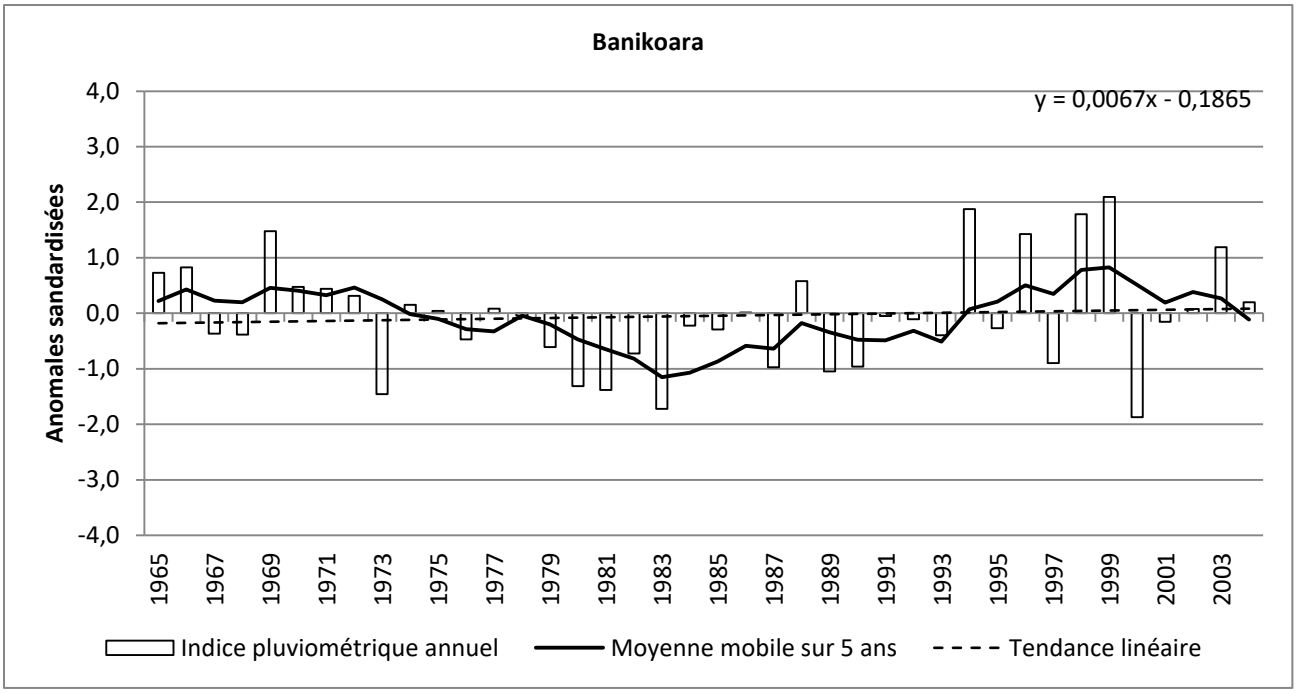


Figure 52 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Banikoara (1965-2004)

Il faut remarquer que si la moyenne mobile calculée sur cinq années confirme ce constat, ce n'est pas le cas pour la courbe de tendance linéaire. En effet, pour les stations de Banikoara et Malanville, la tendance est clairement à la hausse, même si elle est encore faible. A Kandi par contre, la tendance est à une légère baisse.

2.2. Le domaine soudanien typique

Les figures 53 et 54 illustrent la variabilité interannuelle des hauteurs de pluie aux stations de Bembèrèkè et Kérou.

A l'image du domaine soudano-sahélien, trois périodes sont aussi enregistrées ici. Ces trois périodes sont réparties en une période déficitaire et deux périodes excédentaires. A Bembèrèkè la période de 1970 à 1997 est marquée par un déficit pluviométrique très prononcé avec un indice négatif qui dépassant -2 en 1978, 1984 et 1987. A Kérou, cette « sécheresse » a duré plus longtemps, la période déficitaire allant de 1974 à 2000. Au niveau des deux stations, cette période déficitaire est encadrée par des périodes où les années excédentaires alternent avec les déficitaires, mais avec une moyenne globalement excédentaire. Les courbes de moyenne mobile des deux stations décrivent une allure similaire à l'exception de la période 1999-2003. Les deux stations se différencient à cette période. Tandis que Kérou marque une

légère reprise après une brève période déficitaire, c'est le contraire qui est constaté à Bembèrèkè. La moyenne mobile amorce plutôt une chute après une période excédentaire (1998-2002).

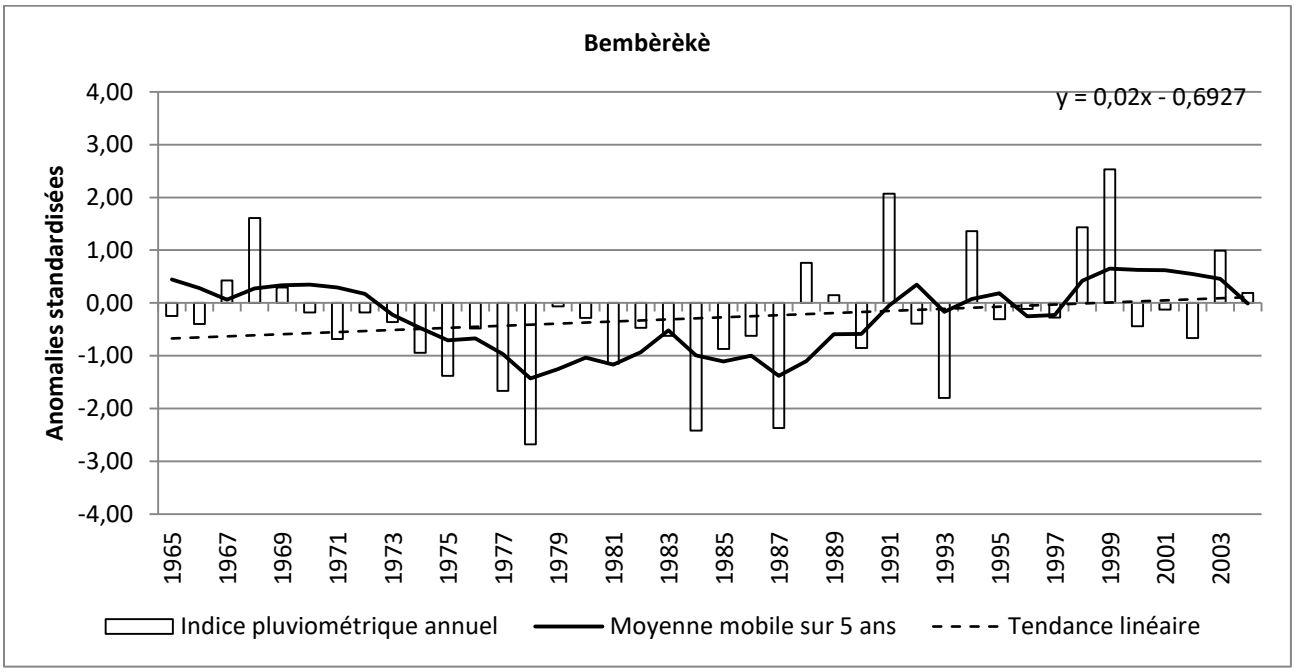


Figure 53 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Bembèrèkè (1965-2004)

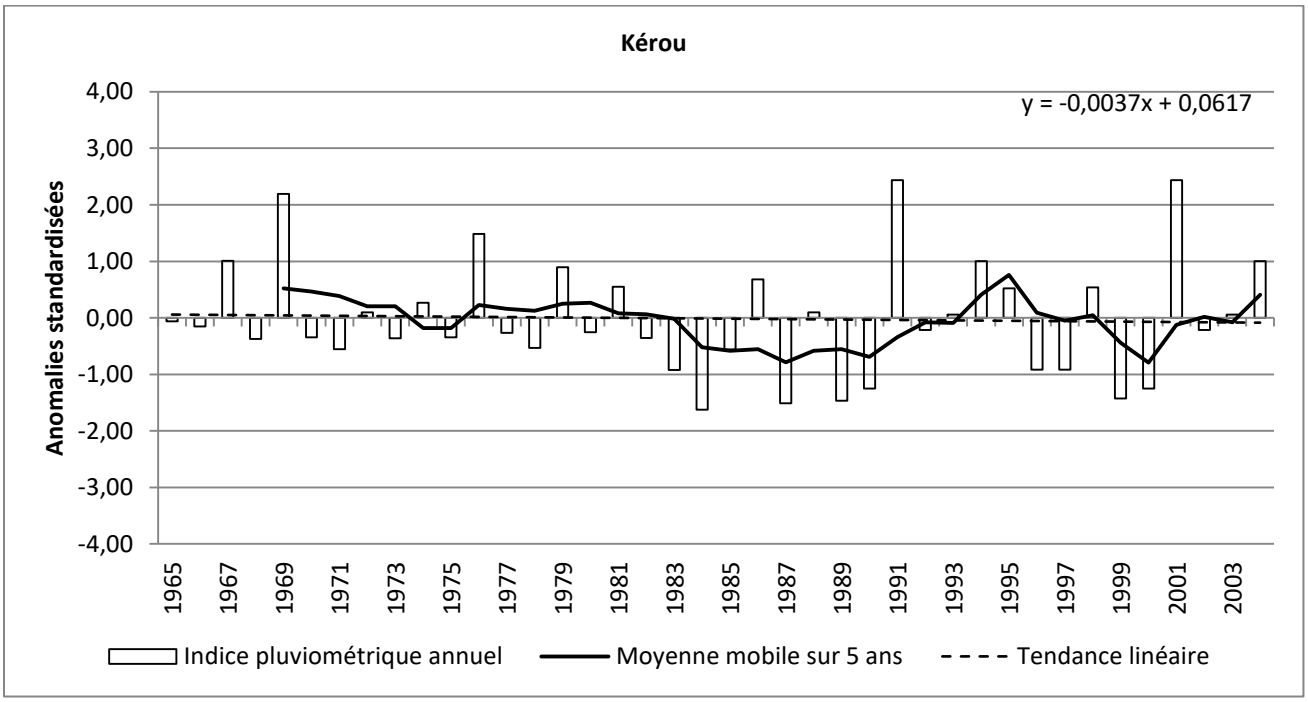


Figure 54 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Kérou

Les courbes de tendance ne sont pas identiques sur les deux stations. A Bembèrèkè, la tendance est à une hausse très légère alors qu'à Kérou, la courbe amorce une légère baisse après s'être longtemps confondu avec la normale.

En considérant les quatre stations dans leur ensemble, il ne se dégage pas une tendance unique. Les périodes excédentaires et déficitaires révélées par les indices pluviométriques ne s'étalent pas non plus sur les mêmes périodes. Il est donc nécessaire d'observer le phénomène à l'échelle du bassin afin d'avoir une idée plus globale de la variabilité pluviométrique de la région.

2.3. Tendances pluviométriques moyennes dans le bassin de l'Alibori

Afin de mieux cerner les tendances pluviométriques pour tout le bassin de l'Alibori, les indices moyens ont été calculés en se basant sur les indices pluviométriques précédemment établis pour les différentes stations. La figure 55 ci-dessous illustre le résultat obtenu.

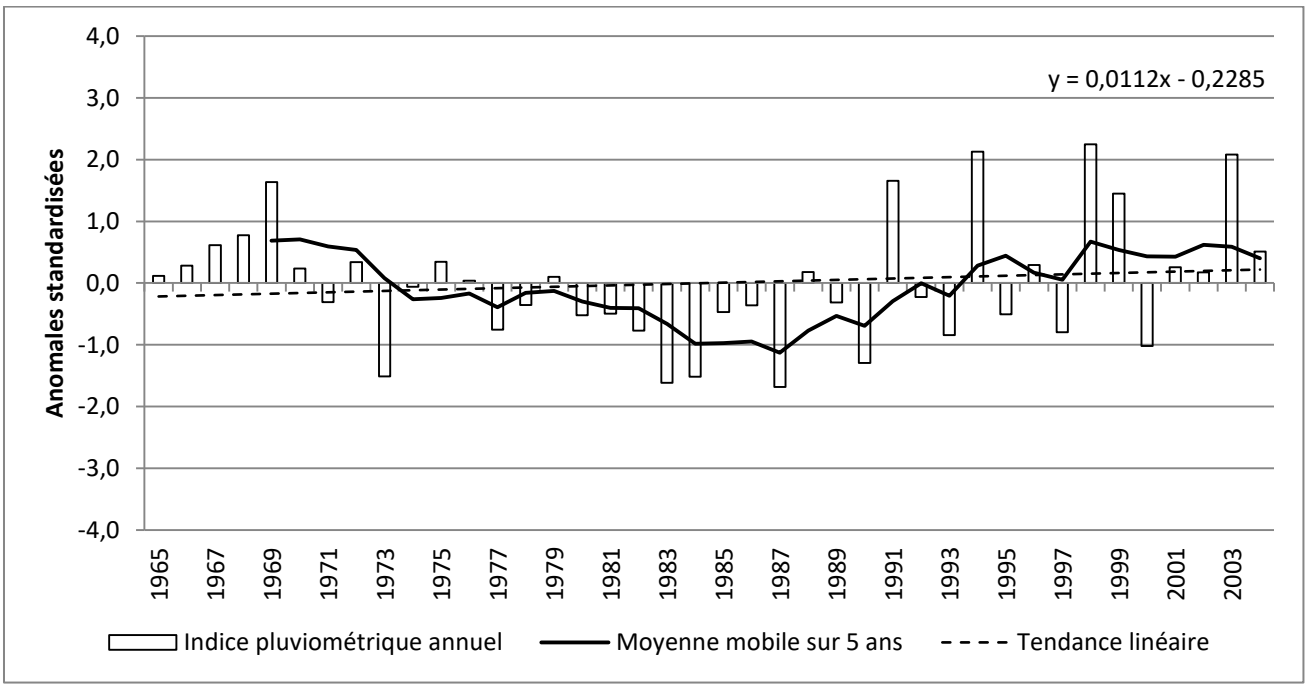


Figure 55 : Variabilité pluviométrique interannuelle dans le bassin-versant de l'Alibori

De l'analyse de la figure, il ressort que les trois périodes identifiées pour les différentes stations se reflètent aussi au niveau du bassin, mais de façon plus tranchée. A l'échelle du bassin, on distingue trois périodes.

La première période va de 1965-1972 et correspond à une période d'excédents pluviométriques. Tous les indices calculés pour cet intervalle sont positifs. Ils culminent en 1969 avec un pic à 1,6.

La seconde couvre les années 1973 à 1993, caractérisée par un déficit pluviométrique marqué. Ce déficit est plus ressenti pendant les années 80, plus précisément entre 1980 et 1987. Il faut attendre 1991 pour voir une année exceptionnelle au cours de cette période. Cette année marque le début de la reprise.

Enfin, une période de reprise qui va de 1994 à 2004, caractérisée par des excédents pluviométriques très élevés.

Le tableau XVII présente la répartition des années excédentaires, déficitaires et normales enregistrées dans le bassin-versant de l'Alibori.

Tableau XVII : Répartition des années enregistrées dans le bassin de l'Alibori par catégorie (1965-2004)

Années déficitaires	***Années normales***	***Années excédentaires***
1971, 1973, 1977, 1978, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1989, 1990, 1993, 1995, 1997, 2000	1965, 1966, 1970, 1974, 1976, 1979, 1988, 1992, 2002	1967, 1968, 1969, 1972, 1975, 1991, 1994, 1996, 1998, 1999, 2001, 2003, 2004
45%	***22,5%***	***32,5%***

On peut déduire de ce tableau que le bassin de l'Alibori a connu plus d'années déficitaires que d'années de pluviométrie excédentaire. Ainsi, 45% des années enregistrées au cours de la période de travail sont déficitaires, contre seulement 32,5% des années excédentaires.

Ceci n'implique pas systématiquement une tendance à la « sécheresse » dans la zone d'étude. En effet, la plupart des années déficitaires sont survenues dans la période 1977-1990. De plus, les années excédentaires et normales font 55% du tot*al*. Autrement dit, la probabilité d'avoir une année normale ou excédentaire dans le bassin de l'Alibori est plus élevée que celle de la survenue d'une année déficitaire. Enfin, de 2001 à 2004 on a enregistré que des années excédentaires (à l'exception de 2002 qui est une année normale).

Afin d'établir l'évolution des hauteurs de pluie dans le bassin, les moyennes

indiciaires décennales ont été calculées à l'échelle stationnaire. Les valeurs ont ensuite subi une interpolation spatiale par la méthode du plus proche voisin.

La figure 56 présente une cartographie de la moyenne par décennie des indices pluviométriques

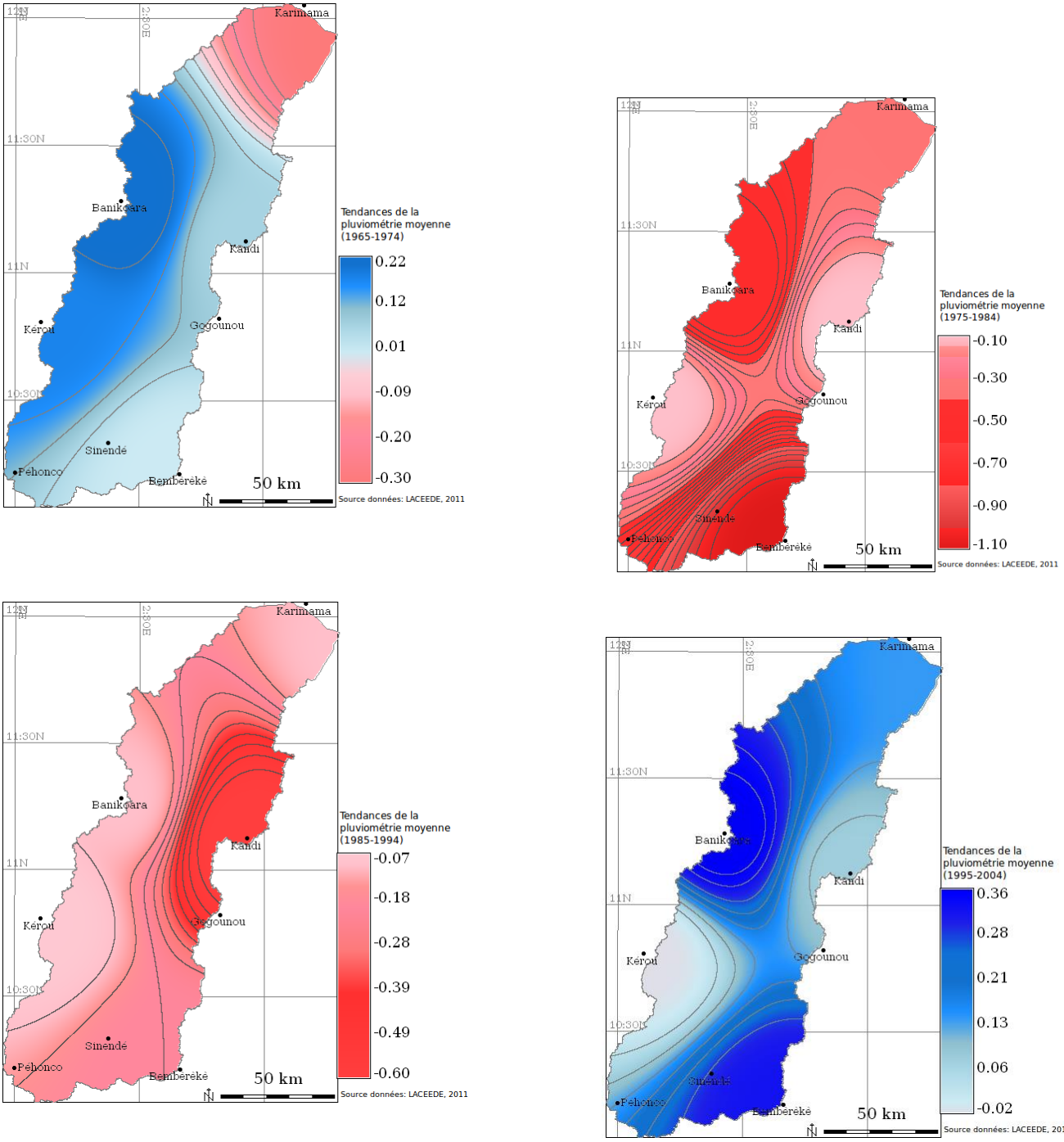


Figure 56 : Variabilités pluviométriques décennales dans le bassin du Niger

L’analyse de cette figure permet de distinguer :

- une décennie (1965-1974) globalement excédentaire à l’exception de la région de Malanville-Karimama marquée par un déficit relativement faible, les valeurs indiciaires sont, cependant, faibles en valeurs absolues ; à l’exception de l’extrême-nord, soudano-sahélien qui a connu une légère récession (-0,30) ;
- une première décennie (1975-1984) déficitaire ; le déficit déjà remarqué précédemment au nord est maintenant généralisée à toute la région ; si les indices sont relativement faibles à Kandi et Kérou, à Banikoara et Bembèrèkè par contre ils sont très élevés, variant de -1,10 à -0,1 ;
- une seconde décennie (1985-1994) déficitaire, surtout à la station de Kandi, où les indices atteignent la valeur de -0,6 ; sur l’ensemble du bassin, le déficit est moins prononcé que lors de la décennie précédente ; les valeurs des indices globalement négatifs varient de -0,07 à -0,6 ;
- une décennie (1995-2004) globalement positive même si des indices négatifs sont encore relevés à Kérou et Kandi ; les indices restent faibles en valeur absolue mais révèlent une reprise de pluviométrie après deux décennies de récession.

L'examen des données antérieures à la période de référence, disponibles pour quelques postes uniquement (Kandi, Malanville, Bembèrèkè), révèle un épisode excédentaire entre 1950 et 1965. Il est possible que la première décennie excédentaire observée (1965-1974) soit donc la fin de cet épisode relevé à ces stations.

Les différentes représentations utilisées, et particulièrement la figure 59, soulignent donc l'existence d'une alternance de périodes sèches et humides depuis la création de ces stations, sans, pour autant, que l'on puisse parler de cycle compte tenu de sa forte irrégularité.

Le calcul du bilan climatique a permis de mettre en évidence les périodes saisonnières dans le bassin de l’Alibori.

3. Evolution du bilan climatique

Le bilan climatique du bassin-versant de l'Alibori a été calculé sur deux pas de temps différents, mensuel et annuel. Les données d'ETP et de hauteurs de pluie de la station de Kandi ont été utilisées à ce propos.

3.1. Bilan climatique mensuel

Le bilan climatique permet donc de mettre en évidence l'évolution du climat donné par la différence entre les apports pluvieux et les pertes partielles par évaporation. Il permet de mettre en évidence les périodes sèches et celles où la demande en eau est comblée. La figure 57 représente le résultat de ce calcul.

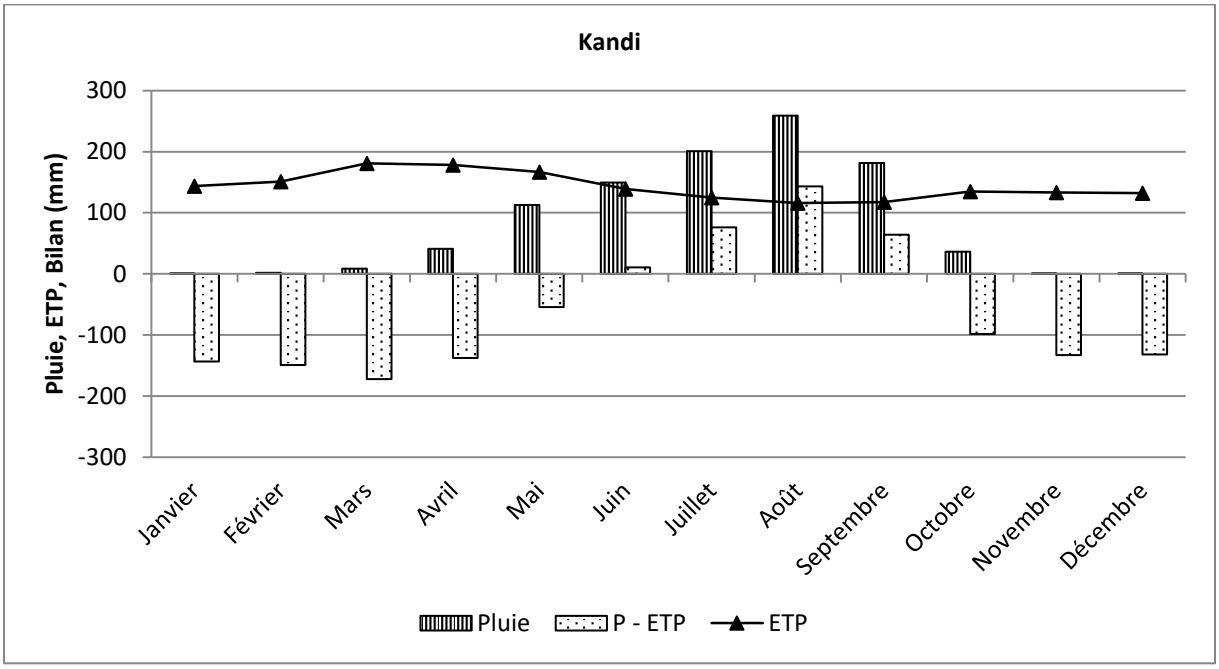


Figure 57 : Variabilité saisonnière du bilan climatique mensuel de la station de Kandi (1965-2004)

De la lecture de la figure, il ressort que la demande en eau liée à l'ETP est supérieure à la pluviométrie pendant toute l'année, excepté les mois de juin, juillet, août et septembre. Quant au bilan P-ETP, il est négatif pendant huit mois, d'octobre à mai. Le reste de l'année, il est positif. Le mois d'août est le seul mois de l'année où le bilan est supérieur à l'ETP.

On peut déduire de l'analyse de la figure qu'il existe :

- une période humide de trois mois qui va de juillet à septembre où l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle est inférieure à la pluviométrie mensuelle ; elle correspond au pic de la saison pluvieuse, où les abats pluviométriques sont à leur maximum ; c'est une période favorable à l'alimentation des aquifères ; c'est la période où les formations végétales naturelles et les cultures atteignent leur climax ;
- une période sèche de 9 mois (janvier, février, mars, avril, mai, juin, octobre, novembre et décembre) ; pendant cette période, l'évapotranspiration potentielle est largement supérieure aux hauteurs de pluie mensuelles ; c'est la période propice à la récolte et à la préparation des champs.

3.2. Bilan climatique annuel

Le bilan climatique du bassin établi au pas de temps annuel est illustré par la figure 58.

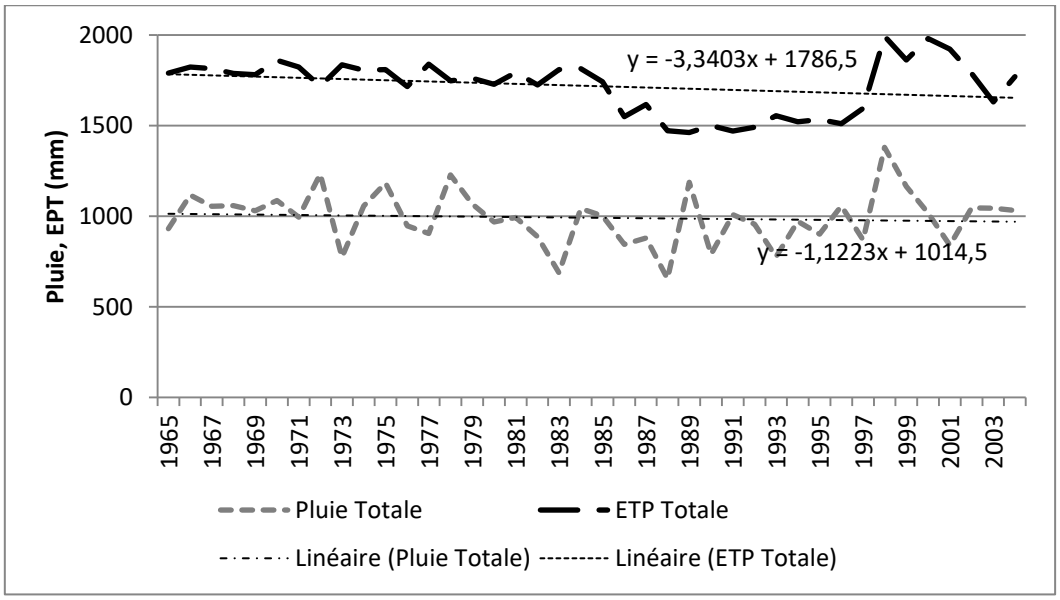


Figure 58 : Bilan climatique annuel de la station de Kandi (1965-2004)

Le bilan climatique annuel est déficitaire sur toute la période d'étude, la courbe de l'ETP totale annuelle est supérieure à la courbe des précipitations annuelles. L'écart entre les deux courbes semble même se maintenir tout le long de la période, décrivant une allure presque parallèle. Les droites de régression des deux courbes indiquent une tendance à la baisse. La baisse de l'ETP, si elle est confirmée, pourrait être due à la baisse du couvert végétal constaté dans le milieu.

4. Discussion des résultats

La variabilité climatique et spécifiquement pluviométrique au Bénin a fait l'objet de plusieurs études (Afouda, 1990 ; Boko M., 1988 ; Bokonon-Ganta, 1987 ; Houndénou, 1999, etc.). Si la plupart des travaux cités ont été réalisés à l'échelle du Bénin, d'autres existent à des échelles plus réduites (bassin-versant, département, communes ou même stationnelle). A ce titre, on peut citer les travaux de Agli (1995), Ogouwalé (2006), Vissin (2007), Yabi (2008), Amoussou (2010) ou Issa (2012). Peu de travaux couvrent le bassin de l'Alibori (Agli, 1995 ; Boko et *al.*, 1997 ; Houndénou et *al.*, 2002 ; Houndénou et *al.*, 2004 ; Vissin, 2007). Il faut aller à l'échelle sous-régionale ou parfois continentale pour trouver des travaux prenant en compte la zone d'étude dans une certaine mesure. De même, peu de travaux scientifiques actuels prennent en compte les données couvrant intégralement la série chronologique utilisée ici. Ces travaux s'arrêtent souvent aux années 1990, rarement 2000.

Toutefois, on peut déjà mentionner les travaux de Boko P. (2009) portant sur les tendances thermométriques au Bénin. Les résultats obtenus à partir des données des 6 stations synoptiques confirment pour la station de Kandi la tendance à la hausse observée au niveau des températures moyennes. Il constate aussi une rupture de stationnarité en 1985 pour cette même station.

Pour en revenir à la pluviométrie, les résultats de Vissin (2007) portant sur la période 1955-1992, basés sur les indices pluviométriques de 9 stations situées dans le bassin du Niger, montrent une baisse de la pluviométrie sur tout le bassin du Niger, confirmant ainsi l'existence de la période de récession pluviométrique annoncée ci-dessus. A l'échelle du sous-bassin de l'Alibori, cette récession dure de 1970 à 1990. A l'échelle stationnelle, Vissin (2007) fait le même constat à propos des stations de Kandi, Malanville, Bembèrekè et Banikoara, que les années 1960 sont plus arrosées que les décennies 1970 et 1980. La récession présente quelques disparités selon les stations. Ainsi, à Bembèrèkè et Kandi, la récession serait intervenue réellement au cours des années 1980. Il annonce également une reprise pour le début des années 90. Cette reprise n'est pas confirmée par nos résultats, qui situent la reprise au milieu des années 90. Pour l'ensemble du bassin béninois du Niger, Houndénou et *al.* (2002) ont aussi confirmé cette récession pluviométrique au cours de la période 1960-1990.

A l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, les avis sont moins tranchés sur la tendance actuelle de la pluviométrie.

Servat et *al.* (1999) en utilisant une approche statistique couplée à la cartographie ont démontré à partir d'une série chronologique (1950-1989) de données pluviométriques issues de stations réparties dans 15 pays d'Afrique de l'Ouest et Centrale l'existence d'une nette et brutale fluctuation dans toute la zone. Les auteurs situent cette baisse à la fin des années 60 et au début des années 70, ce qui est similaire aux résultats que nous avons obtenus à l'échelle du bassin de l'Alibori. Une étude approfondie de variables supplémentaires permettra aux auteurs de montrer que la variabilité pluviométrique se traduit à différents niveaux (durée des saisons pluvieuses, quantités précipitées hors saison des pluies, etc.).

Gauthier et *al.* (1998) ont aussi montré à partir des données pluviométriques de 1950 à 1989 que le régime pluviométrique dans certains pays d'Afrique de l'Ouest, dont le Nord du Bénin ont connu une modification qui s'est manifestée dès 1966. Si L'Hôte et *al.*(2002) semblent abonder dans le même sens en affirmant que la sécheresse constatée en zone sahélienne ouest-africaine depuis les années 1970 dure encore jusqu'aux années 2000, Ozer et *al.* (2003) sont de l'avis contraire. En effet, selon ces derniers auteurs, la récession pluviométrique serait statistiquement finie et une période humide aurait débuté aux alentours des années 1990. Ces derniers résultats vont dans le même sens que ceux obtenus dans cette étude, puisque la décennie 1995-2004 est excédentaire sur quasiment toutes les stations du bassin de l'Alibori. Ozer et *al.* nuancent toutefois ces résultats en affirmant qu'il faudra attendre une dizaine d'années pour une confirmation statistique de cette tendance.

Enfin, en cherchant les causes potentielles des phases d'anomalies pluviométriques positives et négatives, Nicholson et Kim (1997) ont étudié les réponses des précipitations en Afrique aux épisodes d'El Niño dans l'Océan Pacifique sur la période 1901-1990. Ils en déduisent qu'on observe une forte tendance à l'occurrence d'anomalies, positives au cours de la première phase d'ENSO, négatives lors de la seconde phase. Plus précisément, les pluviométries ont tendance à augmenter au cours des phases froides, et à décroître durant les phases chaudes. Les auteurs en arrivent à la conclusion que l'Océan Atlantique régule les pluviométries pendant les phases froides, rôle qui revient à l'Océan Indien pendant celles froides. Si ces constats

sont avérés, que ENSO soit la cause des différentes phases de récession et d'excédent pluviométriques reste très discutable. Ce serait écarter d'autres causes sous-jacentes telles que les actions humaines, dont la déforestation.

Conclusion partielle

L'étude de la variabilité climatique dans le bassin-versant de l'Alibori a permis de mettre en évidence les différentes tendances au niveau de la température et de la pluviométrie sur la période allant de 1965 à 2004.

Au niveau de la température, la présence d'une seule station synoptique dans le milieu ne permet pas d'avoir une idée plus précise de la tendance thermométrique dans la zone d'étude. Toutefois, les données obtenues à la station de Kandi ont permis de constater :

- une tendance à la baisse des températures maximales – à 34,45°C – après trois décennies de croissance (passant de 34,15 à 34,5°C) entre 1965 et 1994,
- une croissance continue des températures minimales (de 20,8 à 21,9°C) sur l'ensemble de la période d'étude.

Les courbes des moyennes mobiles de ces deux variables illustrent ce constat en décrivant pour les maxima, une allure en dents de scie, et pour les minima, une allure linéaire. Sur l'ensemble de la période, la température moyenne annuelle connaît une hausse plus ou moins constante. Entre 1965 et 2004, elles sont passées de 27,45 à 28,17°C, soit une croissance de 0,021°C par an. Si cette tendance est confirmée, on s'achemine vers une croissance de 2,1°C par siècle.

Les traitements des données pluviométriques issues des stations de Banikoara, Bembèrèkè, Kandi, Kérou et Malanville sur la même période montrent que :

- dans le domaine soudano-sahélien, la tendance n'est pas unique ; les stations de Malanville et Banikoara décrivent une légère tendance à la hausse alors celle de Kandi décrit une tendance à la baisse ;
- dans le domaine soudanien typique, les hauteurs de pluie à la station de Bembèrèkè sont à la hausse tandis qu'à Kérou, elles décrivent une baisse très légère.

Pour l'ensemble du bassin de l'Alibori, la tendance pluviométrique générale est à la

hausse après deux décennies de récession (1975 – 1994) encadrées par deux décennies excédentaires (1965 – 1974 et 1995 – 2004). Si ce constat se poursuit, on se dirigerait à court terme plutôt vers une hausse de la pluviométrie et non vers une péjoration.

La variabilité climatique (plus précisément, pluviométrique) du bassin-versant de l'Alibori étant connue, elle pourra être ajoutée aux autres paramètres identifiés antérieurement afin de pouvoir projeter les potentielles trajectoires de l'occupation du sol dans le milieu.

Chapitre 6 : Trajectoires potentielles de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori

Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux ont permis d'avoir une meilleure compréhension des causes des changements dans l'utilisation et l'occupation du sol. Ces travaux ont aussi permis l'élaboration de modèles de prédiction du phénomène. Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de la modélisation de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori, en utilisant un de ces modèles, Dyna-CLUE. Les paramètres utilisés et la raison de leur choix sont présentés de même que les résultats de la régression logistique. Les cartes issues de la modélisation et une discussion des résultats y figurent aussi.

1.- Paramètres utilisés

Il s'agit des différents facteurs identifiés précédemment comme étant à la base de la dynamique de l'occupation du sol. Comme décrit plus haut, le modèle Dyna-CLUE n'est pas capable de prendre en compte des facteurs non spatialisables (facteurs institutionnels, ou socioéconomiques). De ce fait, seuls les facteurs dont les cartes peuvent être réalisées ont été prises en compte pour la simulation de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori. Au-delà des facteurs biophysiques et humains déjà cités plus haut, d'autres facteurs supplémentaires ont été pris en compte. Il ne s'agit pas à proprement parler de facteur supplémentaire. C'est essentiellement le facteur de localisation qui a été plus détaillé afin de faciliter sa spatialisation. Trois nouveaux « paramètres » ont été obtenus : la distance par rapport aux localités, la distance par rapport aux cours d'eau et la distance par rapport aux routes. La figure 59 présente les cartes des différents facteurs utilisés.

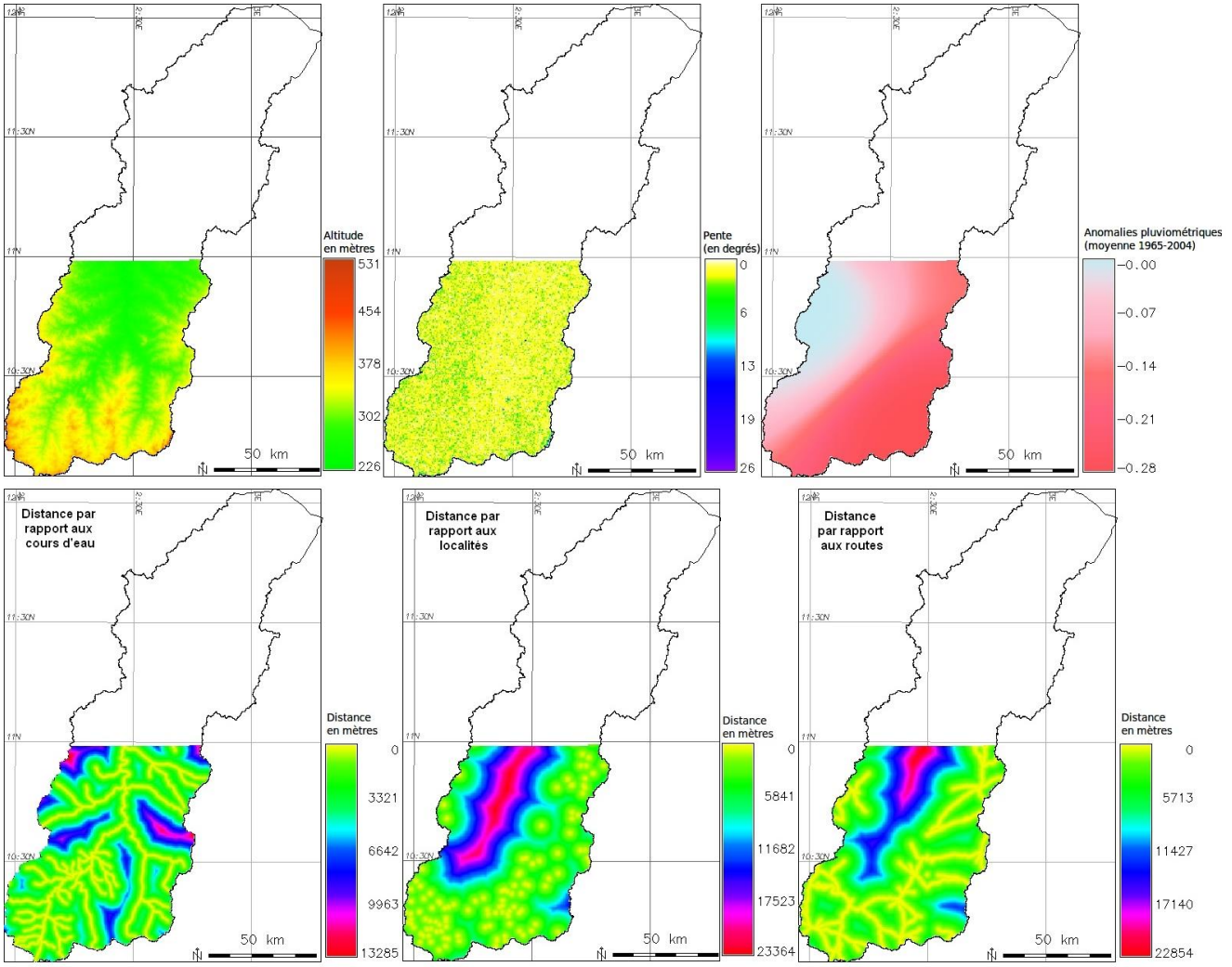


Figure 59 : Cartes de quelques facteurs utilisés pour la modélisation

Plusieurs raisons ont conduit à la réduction de la zone d'étude telle qu'on peut le voir sur la figure 59. La principale est la limitation par le modèle, de la superficie maximale modélisable. Cette limitation implique de fait une limitation du nombre maximal de pixels à introduire. La résolution initiale de 30 m a dû être ramenée à 500 m. Le temps de calcul des différents modèles de régression, de conversion au format ASCII et la taille des différents fichiers obtenus sont aussi autant de raisons qui ont conduit à la réduction de la zone d'étude afin de pouvoir réaliser les différentes simulations.

Au total, dix paramètres initiaux ont été retenus aux fins de modélisation de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori. Ces paramètres ont été choisis en fonction i) des résultats des travaux de terrain et ii) de la littérature scientifique en la matière. Ces paramètres ont donc d'abord été introduits systématiquement, que leur effet sur l'occupation ait été prouvé dans la zone d'étude ou pas. Le principe de base était de partir sans idée préconçue afin de ne pas prendre le risque d'omettre un quelconque facteur. Les paramètres choisis sont l'altitude, la topographie, la pente (en degrés), les sols, la distance par rapport aux cours d'eau, la distance par rapport aux localités, la distance par rapport aux routes, la densité de population, la pluviométrie moyenne annuelle, la tendance pluviométrique sur la période d'étude.

A ces dix paramètres ont été ajoutées les trois unités d'occupation obtenues après généralisation. On part du principe que l'évolution (ou la régression) d'une unité d'occupation peut être fonction d'une autre unité d'occupation. Les forêts, les champs et les installations humaines ont été donc pris en compte au même titre que les autres paramètres. Par contre, les plans d'eau et les unités d'occupation qui restent stables n'ont pas été inclus dans les paramètres. Leur superficie initiale a été reconduite tout au long du processus de modélisation.

2.- Résultats de la régression logistique

Le tableau XVIII montre les résultats des régressions logistiques entre variables dépendantes (unités d'occupation du sol) et variables explicatives (facteurs ou paramètres).

Tableau XVIII : Modèles de régression pour les différentes unités d'occupation

Facteurs	Forêts		Champs		Localités	
	Beta	Exp (Beta).	Beta	Exp. (Beta)	Beta	Exp. (Beta)
Constante	1069,63	-	639,832	-	1941,29	-
Distance au cours d'eau le plus proche	-	-	-	-		
Distance à la localité la plus proche	-	-	-	-	-	-
Distance à la route la plus proche	-	-	-	-		
Champs	38,569	5,630	-	-	-	-
Altitude	-0,033	0,967	0,014	1,014	0,054	1,056
Densité de population	-0,760	0,468	-0,712	0,490	-	-
Moyenne pluviométrique	-0,980	0,375	-0,591	0,554	-1,849	0,157
Tendance pluviométrique moyenne	124,210	-	-33,254	-	855,125	0
Pente	-	-	-	-	-	-
Sols	0,033	1,033				
ROC	0,939		0,791		0,842	

Toutes les valeurs sont significatives à 0,05

Les exposants (Exp (B)) sont calculés pour montrer que la probabilité d'une unité d'occupation augmente (Exp(B) >1) ou diminue (Exp(B) <1) si la variable explicative croît d'une unité. Si Exp(B)=1 alors, la probabilité reste stable.

Le tableau précédent montre l'importance des différents facteurs par rapport aux unités d'occupation. On constate que le modèle de régression pour les forêts comporte six coefficients. De ces six, seulement deux ont une forte influence : les champs et la tendance pluviométrique moyenne. Cette relation est confirmée en ce qui concerne les champs par l'exposant (Exp(B)) qui a une valeur de 5,63. Cette valeur implique que plus on s'éloigne des champs, plus on a la chance de trouver une forêt. Cette relation est valable aussi pour les autres paramètres. Ainsi, pour la densité de population, le coefficient est faible, dénotant une influence peu marquée de ce paramètre sur les forêts. Exp(B) a une valeur de 0,468, ce qui signifie qu'une croissance de la densité entrainera une (faible) réduction des forêts. En plus des champs, seuls les sols ont un Exp(B) supérieur à 1.

Le modèle de régression des champs comporte quatre coefficients. Ici aussi, c'est la tendance pluviométrique qui a la plus forte influence, mais négative dans ce cas.

L'influence négative signifie que si les pluies ont une tendance à la baisse, la probabilité de trouver des champs est plus faible. Il s'agit ici d'une (forte) corrélation négative. Ce constat est valable aussi pour la moyenne pluviométrique qui a un coefficient négatif (-0,591). Ces relations s'expliquent par le fait que l'agriculture de la zone d'étude est de type essentiellement pluvial. L'altitude a une valeur de Exp(B) ~1, ce qui implique que son influence sur les champs est faible. Puisque, que l'altitude croisse ou décroisse, les champs restent stables. Ceci est confirmé par le constat sur le terrain, où l'altitude n'a pas été citée comme un facteur limitant dans l'extension des champs. Il faut préciser que ceci est lié au fait que la portion du bassin pris en compte présente dans l'ensemble une altitude relativement homogène.

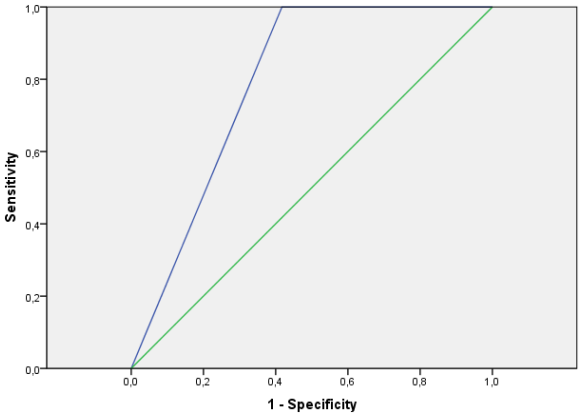
Enfin, le modèle de régression établi pour les localités comporte aussi cinq coefficients. La plus forte valeur est celle de la tendance pluviométrique (855,125). Elle traduit la logique selon laquelle les (nouvelles) installations humaines sont fonction de la pluviométrie. Si la tendance pluviométrique en un lieu est à la hausse, il est probable que ce lieu soit favorable à l'implantation de nouvelles installations humaines, très probablement dans le but d'y mener des activités agricoles.

En dehors des forêts, les deux autres unités d'occupation n'ont pas de corrélation avec les sols. Ceci peut être expliqué par le fait que la plupart des sols de la zone d'étude sont favorables à l'agriculture. Il s'agit des sols de type ferrugineux. De plus, le type de sols n'intervient pas comme facteur lors de la création de nouvelles localités. Aucun facteur de distance ne présente de corrélation avec les unités d'occupation. Ce constat est aussi vérifié par les travaux de terrain. Les populations n'ont mentionné aucun de ces facteurs de façon spécifique. On a aussi remarqué que la plupart des localités sont desservies par des routes secondaires, voire des pistes en très mauvais état à praticabilité limitée. Les distances entre le lieu de résidence et les champs fluctuent en fonction de la disponibilité des terres et de la localité et ne constituent pas un facteur limitant.

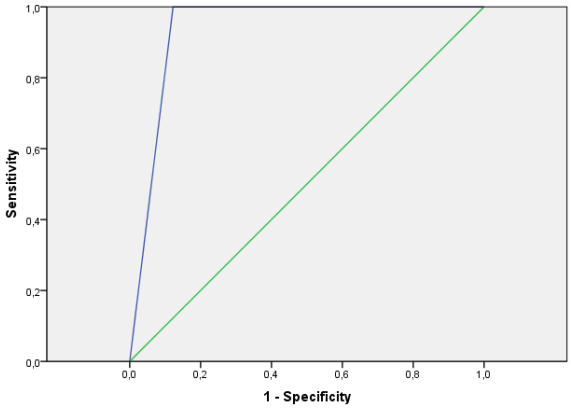
Aucune analyse de régression n'a été faite pour les unités d'occupation considérées comme stables (plans d'eau, surfaces cuirassées, etc.) et classées « surfaces non cultivables ».

Les modèles de régression obtenus ont été évalués avec la méthode ROC. Les valeurs obtenues pour chaque modèle figurent dans la dernière ligne du tableau XX. Le

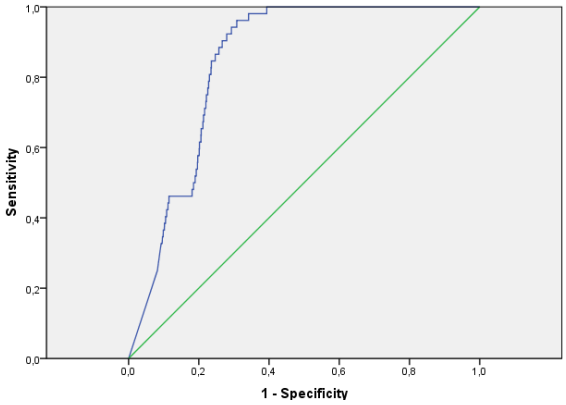
modèle de régression des forêts est celui qui offre la fiabilité la plus élevée (0,93), par comparaison aux deux autres (0,84 et 0,79 respectivement pour les localités et les champs). La figure 60 illustre les courbes ROC pour chacun des modèles.



Forêts



Champs



Localités

Figure 60 : Courbes ROC des modèles de régression finaux

3.- Validation du modèle

Lorsqu'on dispose de l'occupation du sol sur au moins deux différentes années pour la zone d'étude, il est possible d'exécuter un processus de validation du modèle. Ce processus consiste à simuler l'évolution de l'occupation du sol entre deux années connues et comparer l'occupation du sol simulée avec celle de l'année de référence.

Une fois cette première simulation effectuées, l'utilisateur dispose de plusieurs méthodes de validation au nombre desquelles la valeur ROC, l'évaluation de la précision par usage de résolution multiple, etc. Comme précisé dans la méthodologie, c'est l'indice Kappa qui a été préféré pour la validation des résultats obtenus.

Dans la cadre de ce travail, une simulation de l'occupation du sol a été effectuée entre 1990 et 2008. Cette première simulation est effectuée en utilisant exactement les

mêmes paramètres que pour celle de la simulation définitive. Le résultat obtenu a permis de comparer la carte de l'occupation du sol réelle en 2008 à celle simulée pour la même année. La figure 61 représente les deux cartes utilisées pour la validation.

Le tableau XIX présente les statistiques de l'occupation du sol pour les deux cartes.

Tableau XIX : Comparaison de l'occupation simulée et de l'occupation réelle

Superficie	Réelle		Simulée	
Unité d'occupation	en hectare	%	en hectare	%
Forêts	349125	52,93	358 425	54,35
Champs	306250	46,43	296 800	45
Localités	1325	0,20	1325	0,20
Surfaces non cultivables	2975	0,45	2975	0,45

On constate que les superficies simulées sont relativement proches des superficies réelles. Mais pour autant, cela ne suffit pas pour affirmer la validité du modèle. La lecture des figures 64 et 65 permet de constater que même lors que les prédictions pourraient s'avérer juste, il peut y avoir des erreurs liées à la localisation Ainsi, en 2008, les forêts sont encore présentes aux limites est et ouest de la zone d'étude. Mais dans la simulation, les forêts sont surtout présentes à l'ouest et au sud. On distingue même un massif au nord-ouest de la Forêt Classée de l'Alibori. Mais dans l'ensemble, les prédictions peuvent être considérées comme exactes. L'indice Kappa calculé pour ces deux cartes donne une valeur de 0,73775, venant ainsi confirmer cette assertion. Le processus de simulation peut donc être considéré comme valide.

Le modèle ayant passé la phase de validation avec succès, l'étape suivante a été la conception du scenario à appliquer lors de la simulation.

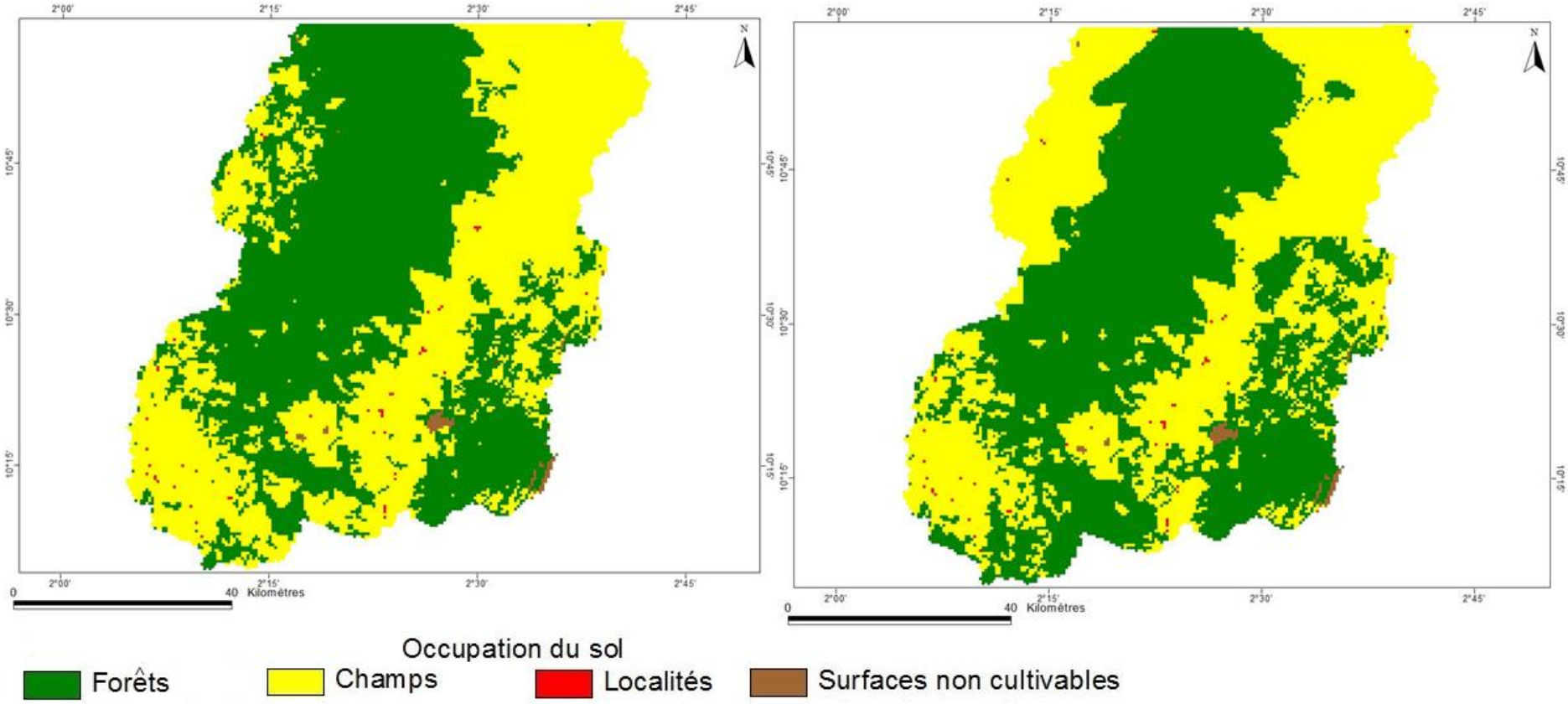


Figure 61 : Occupation du sol réelle en 2008

4.- Scenario de simulation

Afin de simuler l'occupation du sol, en plus des paramètres déterminés antérieurement, un scenario de base a été choisi. En effet, il est nécessaire d'établir un scenario qui dictera au modèle la manière dont les éventuelles restrictions spatiales doivent être prises en compte. La période retenue pour l'exécution de la simulation va de 2008 à 2050.

Les aires protégées de l'Alibori supérieur et de Ouénou Bénou constituent la principale restriction spatiale de la zone retenue pour la simulation. Le scenario adopté part du principe optimiste de la conservation des aires protégées. Par conséquent, les domaines classés ont été considérées comme des zones de restriction complète. Aucune modification ne peut y avoir lieu et leurs superficies doivent rester stables tout au long de la simulation

Outre les restrictions spatiales, les autres critères à fixer sont la tendance, l'élasticité et la matrice des changements autorisés. La tendance est le résultat obtenu en calculant l'évolution de la superficie d'une unité d'occupation sur deux années différentes. Le tableau suivant présente les tendances des forêts, des champs et des localités.

Tableau XX :Tendances en matière d'évolution future des différentes unités d'occupation

Unités d'occupation	Forêts	Champs	Localités
Taux d'évolution (%)	-0,78	1,06	0,41
Croissance en superficie (en ha)	-3136,68	2677,23	5,20

Ce tableau rend compte du constat déjà effectué au niveau de la dynamique de l'occupation du sol. Les formations végétales naturelles (forêts) régressent annuellement de 0,78%. Les unités d'occupation d'origine anthropique connaissent des progressions annuelles. Les champs croissent de 1,06%. Cette valeur est de 0,41% pour les localités. Ces taux d'évolution ont permis d'estimer la superficie que chaque unité d'occupation gagnait ou perdait (cas des forêts) chaque année. Ces données ont servi au calcul de la demande annuelle en terre de chaque unité d'occupation. Il avait déjà été mentionné que les superficies des surfaces non cultivables étaient considérées comme stables. Ce qui justifie leur absence de ce tableau. La figure 62 montre l'évolution de la demande en terres des différentes unités d'occupation.

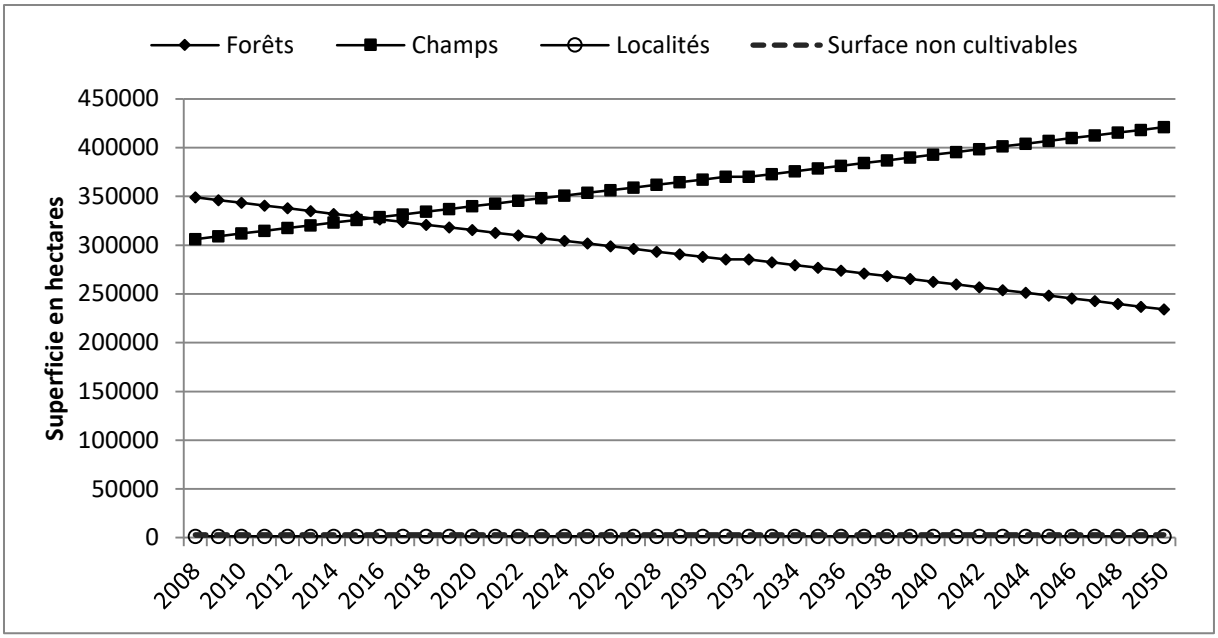


Figure 62 : Evolution de la demande en terres des différentes unités d'occupation

La figure 62 présente deux groupes de courbes. Un groupe constitué des localités et des surfaces non cultivables, dont les valeurs restent faibles durant toute la période de simulation et n'atteignent même pas 5000 hectares. Les localités connaissent une évolution très faible. En 2030, leur superficie probable (si la tendance se maintient) est de 1440 ha et de 1544ha en 2050. Ce qui est très faible à l'échelle du secteur d'étude. Le second groupe est constitué des forêts et des champs qui occupent l'essentiel de la zone d'étude. La demande en terres des forêts a une allure décroissante, du fait de son évolution régressive. La courbe des champs présente une allure croissante. Les forêts qui étaient plus représentées vont décroître progressivement, si bien qu'à partir de 2016, ce sont les champs qui domineront.

La valeur de l'élasticité illustre la stabilité d'une unité d'occupation. Le tableau XXI ci-dessous présente les valeurs d'élasticité utilisées pour la simulation.

Tableau XXI : Valeurs d'élasticité utilisées pour la simulation

Unités d'occupation	Forêts	Champs	Localités	Surfaces non cultivables
Elasticité	0,4	0,6	1	1

Deux unités d'occupation sont considérées comme stables ou peu élastiques. Il s'agit des surfaces non cultivables et des localités dont l'élasticité est égale à 1. Les localités sont considérées comme peu élastiques, parce qu'on part du principe qu'il est très

peu probable qu'un village ou une ville soit remplacée par un champ ou une forêt. Les rares cas d'abandon enregistrés sont marginaux et ne peuvent pas être pris en compte. Les forêts sont les plus élastiques. Elles peuvent être converties en champs ou en localités. Alors que les cas de conversion de champs en forêts sont très rares à l'échelle du bassin. En réalité, ce cas de figure n'a pas été enregistré lors des travaux de terrain. Enfin, les champs ont une valeur de 0,6 car ils sont plus stables que les forêts. Les champs ne peuvent qu'être convertis en localités, et seules les forêts peuvent devenir des champs.

La matrice des changements autorisés est introduite dans le modèle pour préciser les différentes conversions autorisées entre les unités d'occupation. Elle est représentée par le tableau XXII.

Tableau XXII : Matrice de conversion utilisée

Futures / Actuelles	Forêts	Champs	Localités	Surfaces non cultivables
Forêts	1	1	1	0
Champs	0	1	1	0
Localités	0	0	1	0
Surfaces non cultivables	0	0	0	1

Cette matrice est en étroite relation avec l'élasticité. Elle illustre la trajectoire probable de l'occupation du sol.

Les conversions des forêts vers les autres unités d'occupation sont toutes possibles, à l'exception des surfaces non cultivables. La conversion des champs en localités est aussi possible. Enfin, aucune conversion n'est autorisée pour les localités et des surfaces non cultivables.

5.- Résultats de la simulation

Le modèle Dyna-CLUE a permis de simuler l'évolution de l'occupation du sol dans la zone d'étude en utilisant les modèles de régression logistique des différents facteurs identifiés, l'occupation du sol en 2008, les demandes en terres de chaque unité d'occupation, les valeurs d'élasticité, la matrice de conversion, etc.

Les résultats obtenus sont les cartes de l'occupation du sol pour chaque année de la simulation, soit 43 cartes (de 2008 à 2050). Etant donné que les modifications sur ce genre de carte ne sont pas visibles en comparant des cartes au pas de temps annuel, seules les cartes des années 2020, 2030, 2040 et 2050 sont présentées ici (figure 64).

Le constat qui se dégage de ces quatre figures est que les champs progressent relativement rapidement au détriment des forêts. A un tel rythme qu'en 2050, l'essentiel des formations végétales naturelles se retrouvent uniquement au sein des domaines classés (Alibori supérieur au centre et Ouénou Bénou au sud-est). De rares massifs sont encore observés au nord-est de la forêt classée de l'Alibori supérieur et au nord de celle de Ouénou Bénou. La figure 63 fait la synthèse de l'évolution probable des différentes unités d'occupation de 2008 à 2050.

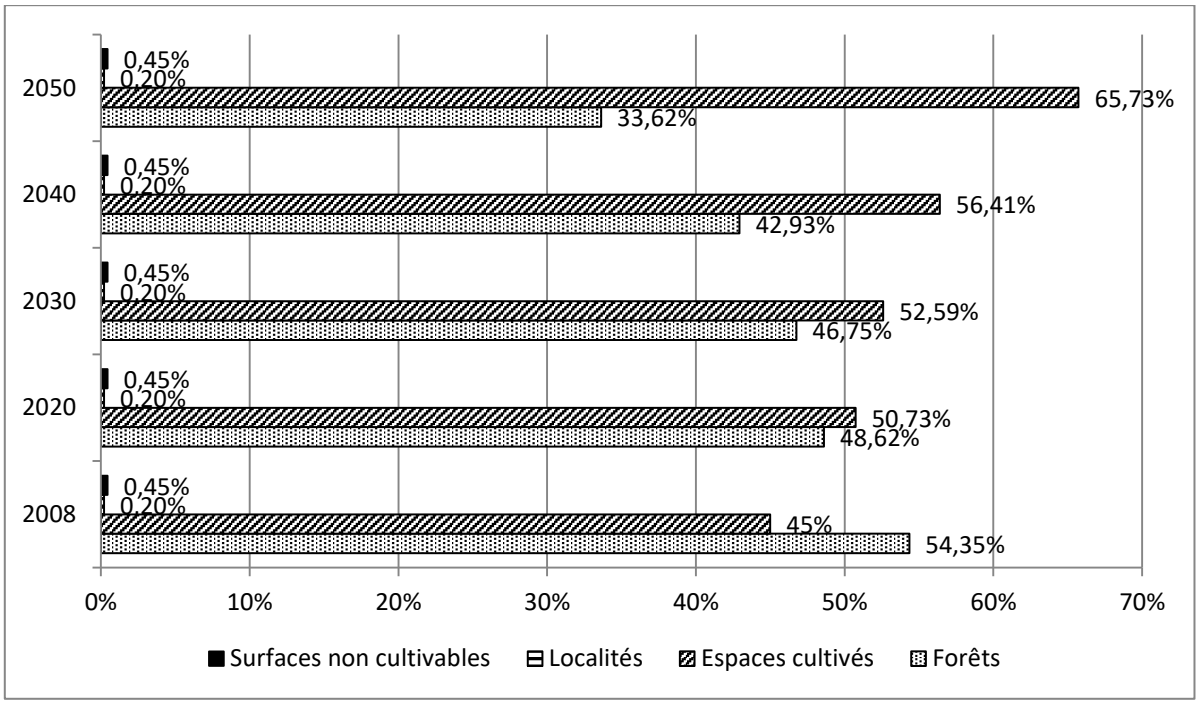


Figure 63 : Evolution des pourcentages de chaque unité d'occupation de 2008 à 2050

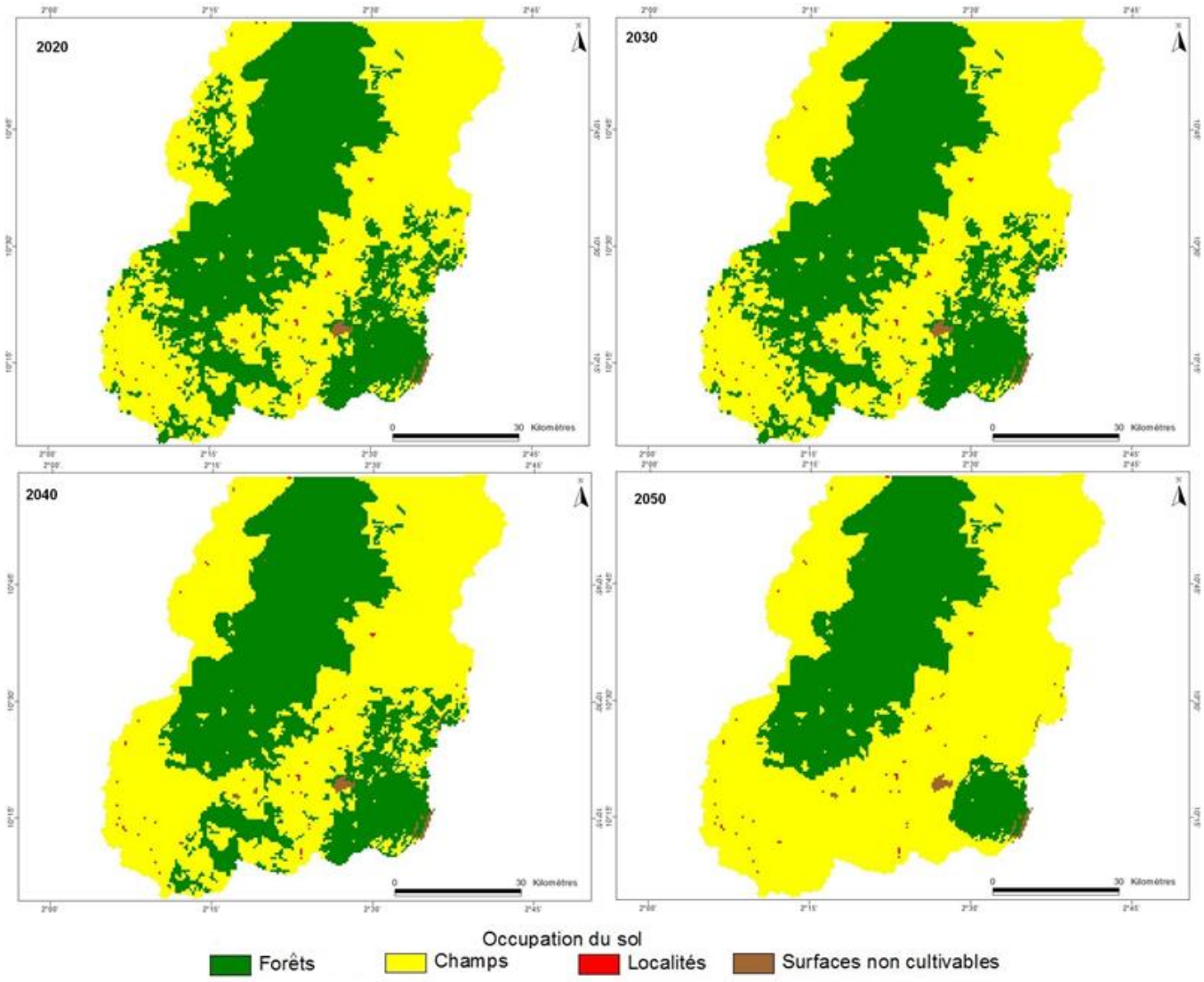


Figure 64 : Occupation du sol simulée de 2020 à 2050

En 2008, les forêts étaient présentes sur plus de la moitié de la région de travail (54%). Elles vont graduellement décroître, en passant à 48% en 2020, 46% en 2030 et 42% en 2040. En 2050, les forêts ne représentent que le tiers de la surface totale de la zone. Pendant ce temps, les champs connaîtront un phénomène exactement inverse. Comme prévu dans l'estimation de la régression, à partir de 2020, les superficies occupées par les champs dépasseront celles des forêts. Les champs occuperont à ce moment plus de la moitié de la superficie totale. Cette progression va se poursuivre au cours du reste de la simulation jusqu'à atteindre près des deux tiers (65,73%) de la superficie totale en 2050. Etant donné que les deux autres unités d'occupation sont restées stables (ou ont connu une très faible progression), chaque recul enregistré par les forêts est entièrement reconverti en champs. Ce constat fait croire que l'agriculture est le facteur principal à la base de la déforestation dans la zone d'étude. Par ailleurs, au vu de l'évolution de la tendance (et de la figure 64), on peut avancer sans grand risque de se tromper qu'avant 2060, la simulation se serait arrêtée faute d'espace à allouer à l'évolution des champs.

Des trois unités d'occupation dynamiques, les superficies des localités n'ont pas cru autant que prévu par l'estimation de la demande annuelle en terres. Plusieurs raisons potentielles peuvent expliquer cet état de choses :

- la densité de population est considérée comme stable dans la région ; cela a probablement conditionné l'évolution de cette unité d'occupation ;
- la résolution utilisée : la taille d'un pixel est de 25 hectares, ce qui, à l'échelle de la zone d'étude représente une superficie considérable en matière d'installations humaines. A titre d'exemple, l'agglomération de Bembèrèkè couvre une superficie de 336 hectares, soit 36 pixels ;
- les facteurs à la base de l'évolution de cette unité d'occupation, établis par le modèle de régression ;
- la concurrence avec les autres unités d'occupation : le modèle calcule les superficies pour toutes les unités et procède à l'attribution sur la base des unités les plus compétitives.

Le secteur d'étude étant essentiellement à vocation agricole, les villes n'exercent pas encore un attrait particulier sur les populations. La création de nouvelles installations se fait surtout à une échelle réduite. Et les installations ainsi créées n'ont pas pour

vocation de s'agrandir à court terme, car cela augmenterait la pression sur les terres. Alors que c'est l'effet contraire qui est recherché.

Les résultats montrent que les changements dans l'occupation du sol dans le bassin de l'Alibori sont essentiellement liés à l'agriculture et tous les autres facteurs qui y sont liés directement ou indirectement. Ils prouvent aussi que si la dynamique actuelle est conservée, en 2030, l'essentiel des formations végétales naturelles seraient localisées dans les aires protégées. A la condition que ces dernières soient effectivement protégées et exemptes de toutes activités humaines. Autrement, les conséquences pourraient être dramatiques pour la biodiversité animale et végétale dans le milieu. La protection effective des domaines classés devient une véritable urgence dans la zone où la simulation a été effectuée.

Le modèle permet de montrer aux décideurs les impacts potentiels d'une pression sur les formations végétales naturelles à long terme et démontrer l'importance et l'utilité des domaines classés. Il rend aussi possible la planification des actions nécessaires afin de prévenir d'éventuels impacts sur les milieux fragiles ou pour gérer la pression sur les ressources naturelles.

6.- Limites et discussion des résultats

Si les résultats obtenus permettent de connaître la trajectoire probable de l'occupation du sol au sud du bassin de l'Alibori, ils connaissent plusieurs limites. Au nombre de ces limites, on distingue celles liées à la méthode (et au modèle) et celles liées aux données.

6.1.- Limites inhérentes à la méthode

Du fait de la spécificité de la zone d'étude, les facteurs de voisinage n'ont pas été pris en compte dans la simulation. Ces facteurs reposent sur la théorie selon laquelle la conversion d'une unité d'occupation pourrait être fonction de sa localisation par rapport à une autre unité d'occupation. Par exemple en milieu urbain, il y a une probabilité très élevée d'avoir de nouvelles installations humaines au voisinage de celles préexistant. Dans un milieu agricole, la même logique pourrait être appliquée aux champs, mais cette logique n'est pas entièrement avérée de la zone d'étude. Mais pour autant, elle est valable pour certains cas (les champs surtout).

Il aurait aussi été intéressant de tester un second scenario moins optimiste où les domaines classés ne seraient pas considérés comme des restrictions spatiales, afin d'avoir une idée de la trajectoire. De même, des méthodes de validation plus pointues existent pour tester les résultats du modèle. Pour autant, ceux utilisés ne sont pas moins efficaces, et leurs résultats restent tout à fait valables.

Les paramètres introduits dans le modèle CLUE-S sont obtenus à partir de travaux à l'échelle locale. Mais la demande spatiale et les règles de décision (élasticité, matrice de conversion, itération) sont définies à l'échelle de toute la zone d'étude, ce qui implique que ces règles sont uniformes sur l'ensemble de la zone d'étude. Il est possible de contourner cette faiblesse en créant des régions où ces règles seront définies de manière spécifique.

Il n'y a pas une méthode spécifique pour le choix des paramètres d'itération. Il faut procéder par tâtonnements (en augmentant ou en diminuant les valeurs d'itération) jusqu'à l'exécution complète de la simulation ou à l'obtention d'un résultat satisfaisant.

Le choix de considérer la distribution spatiale de la population comme un facteur stable et non dynamique pourrait être vu comme une limite. Mais, s'il est possible d'estimer l'évolution de la population, il est quasi-impossible de prédire où seront créées les nouvelles localités (Engelsman, 2002).

Parlant de la population, il est important de mentionner que de façon plutôt surprenante, les modèles de régression des champs et des localités n'aient pas une forte corrélation avec la population. Ce résultat prend le contrepied de la plupart des travaux sur les causes des changements dans l'occupation du sol.

6.2.- Limites liées aux données et au modèle

La résolution spatiale des images (28,5 m) n'a pas permis de distinguer les différents types de cultures. Il aurait en effet été intéressant de simuler l'occupation des champs par spéculation, plutôt qu'une simulation généralisée.

La résolution utilisée pour la simulation (500 m) a entraîné l'élimination de tous les éléments linéaires tels que les routes et les cours d'eau. La présence de ces éléments auraient permis de constater visuellement l'existence ou non de corrélation entre ces

facteurs et l'occupation du sol. L'utilisation de cette résolution est liée à une autre limite, celle du modèle. La configuration du logiciel exécutant le modèle limite la superficie maximale (en nombre de pixels) que celui-ci est capable de gérer.

Le modèle ne prend en compte que les données spatialisables. Tous les facteurs considérés doivent être intégrés sous forme de carte. L'impossibilité de réaliser les cartes des facteurs économiques (rentabilité, prix des spéculations, par exemple) et surtout des facteurs institutionnels empêche leur prise en compte au cours de la modélisation. Mais au-delà de ces facteurs, c'est l'absence de l'élevage – du fait de cette limite du modèle – qui constitue une véritable faiblesse, surtout au vu de son importance dans le milieu. Si l'élevage ne constitue pas une forme d'occupation du sol, il contribue à l'utilisation du sol. L'usage de fumures organiques participe à une forme d'intensification de l'agriculture et est une réponse aux changements dans l'occupation du sol. C'est un aspect technologique qui est ainsi ignoré.

De même, il n'est pas possible d'envisager des scenarios optimistes comme l'intensification de l'agriculture ou des cas de suppression de localités (comme par exemple les agriculteurs installés dans la forêt classée de Ouénou Bénou). Le type de modèle est plus dépendant des données que des processus. L'indisponibilité de données spatiales explicites représentant les processus étudiés ou le mode de représentation de ces données constitue également une limite. Les variables d'utilisation de l'espace utilisées sont plus des occupations de l'espace que des formes d'utilisation qui traduisent des pratiques comme par exemple le niveau d'intensification ou des types d'aménagement de l'espace (Fotsing, 2009).

La question de l'approche empirique utilisée par le modèle constitue en elle-même constitue une limite. C'est cette approche qui est à la base de l'utilisation de relation logistique, pas toujours en adéquation avec les réalités locales (Briassoulis, 2000), même si les modèles de régression logistique empêchent d'obtenir une simple évolution linéaire et permettent de garder toute la complexité des liens existant entre l'occupation du sol et ses facteurs déterminants (Verburg, 2002, Engelsman, 2002).

6.3.- Discussion

Du fait de l'absence de travaux antérieurs sur la modélisation de l'occupation du sol dans la zone d'étude, la discussion sera essentiellement centrée sur l'utilisation des modèles pour la projection des futures trajectoires de l'occupation du sol.

La plupart des modèles utilisés pour l'estimation spatiale de l'évolution de l'occupation du sol, basés sur la télédétection, ne prennent pas en compte tous les aspects de la déforestation parmi les facteurs à la base. Ces modèles utilisent les variables explicatives « visibles » sur les images utilisées ou calculables au moyen des SIG, telles que les distances ou d'autres variables biophysiques d'ordre spatial (sols, pente, altitude, etc.) et accessoirement quelques « facteurs » socioéconomiques comme la démographie ou des mesures du Produit Intérieur Brut. Si ces modèles obtiennent des résultats globalement satisfaisants, ils arrivent très difficilement à prévoir le comportement humain dont résultent les changements constatés dans l'occupation du sol (Irwin et Geoghegan, 2001). La dynamique temporelle est aussi peu prise en compte dans la conception de ces modèles. Il existe des facteurs qui peuvent évoluer dans le temps (et pas seulement dans l'espace) comme les prix des produits agricoles, le régime foncier, les subventions, la politique économique nationale qui peuvent affecter les choix individuels au niveau de l'utilisation du sol. L'inexistence de données amène souvent l'omission de ces aspects dans les modèles spatiaux. Mais le fait de ne pas les prendre en compte reste une cause de biais dans les résultats obtenus. Un autre aspect aussi ignoré par ces modèles est la technologie. Les éventuels progrès et les changements dans les technologies d'exploitation des ressources naturelles ne sont pas pris en compte. La question de leur intégration dans les modèles reste un défi majeur (Briassoulis, 2000, Rounsevell et *al.*, 2005). La présence de ces variables endogènes (c'est-à-dire qui évoluent de façon temporelle du fait des changements dans l'occupation du sol) peut mener à l'utilisation de paramètres inconsistants et conduire à des décisions erronées. Une approche de solution serait le couplage avec des modèles socioéconomiques (Geoghegan et *al.*, 2001).

Une autre faiblesse des modèles spatiaux est que l'unité d'analyse est soit un pixel ou une agrégation de différentes unités d'occupation. Alors que dans les modèles socioéconomiques, c'est l'individu qui constitue le point de départ de l'analyse, car c'est lui qui prend les décisions à la base des différents changements. A titre

d'exemple, les producteurs qui emblavent de grandes superficies ne réagiront pas de la même manière que ceux qui emblavent de petites superficies. Distinguer les effets d'une décision politique sur les producteurs ne peut se faire qu'à partir de pareilles données (Irwin et Geoghegan, 2001). Overmas et *al.* (2007) proposent comme solution l'orientation vers des modèles utilisant des approches déductives qui présentent l'avantage de conduire aux meilleures chaînes de causalité et d'explication que les approches empiriques de type inductives. Pour Parker et *al.* (2003), c'est plutôt la modélisation multi-agents couplée aux systèmes d'information géographique qui semble l'approche appropriée pour répondre aux questions concernant notamment la modélisation des processus de prise de décision individuelle et collective.

La modélisation des changements dans l'occupation/l'utilisation du sol visent en général deux objectifs : quelle est la localisation des changements probables, et, quel est le rythme potentiel de progression de ces changements ? La première question est souvent résolue à travers les modèles car elle requiert l'identification de caractéristiques naturelles et culturelles des unités d'occupation. Ces caractéristiques constituent souvent les déterminants spatiaux des éventuels changements, autrement dit, les facteurs locaux directs. Les plupart des travaux scientifiques ont tendance à confondre ces déterminants spatiaux avec les causes indirectes, conduisant ainsi à accorder trop d'importance à des facteurs tels que les types de sol ou la topographie comme causes de la déforestation (Veldkamp et Lambin, 2001). Les causes profondes des facteurs indirects, sources des changements, sont souvent plus éloignées dans le temps et dans l'espace et opèrent à un niveau hiérarchique supérieur. Il s'agit souvent de transformations macroéconomiques ou de décisions politiques. Modéliser ces facteurs nécessite souvent une combinaison de systèmes et d'approches narratives ou centrées sur les acteurs (Lambin et *al.*, 1999).

Veldkamp et Lambin (2001) ajoutent que les modèles de simulation de l'occupation/ l'utilisation du sol sont souvent utilisés pour évaluer l'impact de l'occupation du sol sur les processus biophysiques comme la variabilité climatique, la dégradation des terres, la stabilité des écosystèmes ou encore la biodiversité. Les réponses de ces processus biophysiques aux changements, trouvent leurs origines dans les facteurs de l'occupation du sol, appelant ainsi à un couplage dynamique et endogène entre les modèles d'occupation du sol et les modèles biophysiques.

Conclusion partielle

Le logiciel Dyna-CLUE qui est la version 2.0 du modèle CLUE-S a été utilisé pour projeter l'évolution probable de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori. Pour y parvenir, les facteurs spatiaux comme la distance aux routes, la distance aux cours d'eau, la distance aux localités et les éléments biophysiques comme l'altitude, la pente, les sols et la variabilité pluviométrique ont été utilisés. Une régression logistique entre ces différents facteurs et les unités d'occupation a permis d'établir les modèles de régression pour chacune de ces unités. Les résultats obtenus, cumulés avec des paramètres supplémentaires comme la matrice de conversion, ou l'élasticité ont été introduits dans le logiciel pour une simulation de l'évolution de l'occupation du sol entre 1990 et 2008 afin de valider le modèle. Par ailleurs, les modèles de régression ont été validés avec les courbes ROC. Sur la base d'un scenario optimiste de conservation des aires classées présentes dans la zone d'étude, la projection de l'occupation du sol de 2008 à 2050 a été réalisée. Les résultats montrent que d'ici 2050, si la tendance observée continue, toutes les formations végétales naturelles présentes dans le bassin seront converties en zones de cultures. A l'exception de celles localisées dans les aires protégées, qui seront conservées. Ces résultats prouvent aussi que, malgré ses limites, le modèle CLUE-S est efficace pour la simulation de l'évolution future de l'occupation du sol. Au nombre de ces limites, on peut citer l'impossibilité de prendre en compte les facteurs non-spatialisables. Cette limite est la cause de l'absence de facteurs tels que ceux socioéconomiques ainsi que les facteurs institutionnels qui jouent un rôle primordial dans les décisions relatives à l'utilisation du sol. Une autre limite est la contrainte spatiale liée à la conception du logiciel qui ne permet pas de travailler à des résolutions fines, ni sur des régions étendues.

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il a été possible de simuler les trajectoires probables de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori de 2008 à 2050 en fonction de sa dynamique et des différents facteurs à la base de cette dynamique avec un accent particulier sur la variabilité pluviométrique.

Dynamique de l'occupation du sol et facteurs à la base.

La dynamique de l'occupation du sol a été étudiée à partir des scènes Landsat de 1973, 1990 et 2008. Ces images ont subi des corrections radiométriques, puis différents traitements qui ont permis d'en extraire l'information nécessaire. Les cartes de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori ont donc pu être réalisées pour les trois différentes années afin de caractériser les changements dans l'utilisation et l'occupation des terres dans ce milieu.

De 1973 à 2008, l'occupation du sol dans le bassin a été caractérisée par une régression des formations végétales naturelles et une progression des formations d'origine anthropique, essentiellement les mosaïques de cultures et les jachères. D'une végétation quasi-tropicale en 1973, le bassin est devenu un domaine dominé par les savanes et les champs. Toutes les forêts situées en zone libre ont été remplacées soit par des savanes soit par des champs. Les seules formations arborées sont rencontrées principalement dans les domaines classées. En 1973, les formations végétales naturelles occupaient 86% de la superficie totale du bassin. Les espaces cultivés étaient présents sur seulement 13% de cette superficie. En 2008, la tendance a complètement changé. Les formations naturelles n'occupent plus que 54% du bassin alors que les champs ont triplé leur couverture, passant à 45% de taux d'occupation.

Des travaux de terrain réalisés avec la méthode de focus group, des visites de sites et la revue de la littérature existante ont permis d'identifier les facteurs probables à la base de cette dynamique.

Les changements dans l'occupation/ l'utilisation des terres dans le bassin de l'Alibori sont dus à cinq types de facteurs. Il s'agit des facteurs biophysiques (le relief, l'hydrographie et la pédologie), des facteurs spatiaux (la disponibilité d'espaces cultivables et leurs localisations), des facteurs humains (taille du ménage, facteurs

culturels, etc.), des facteurs économiques (l'agriculture, la rentabilité des diverses spéculations) et des facteurs institutionnels (prise de décision politique, existence de projets, etc.).

Variabilité climatique

Les données des hauteurs de pluie de cinq stations (Banikoara, Bembèrèkè, Kandi, Kérou et Malanville), de température et de l'évapotranspiration potentielle de la station de Kandi, de 1965 à 2004 ont été traitées afin de détailler la variabilité climatique dans la zone d'étude. Pour connaître les tendances thermométriques et pluviométriques, les anomalies annuelles ont été calculées. La variabilité de la température a été étudiée à travers les rythmes annuels et décennaux de températures maximales, minimales et moyennes. La variabilité pluviométrique é été aussi calculée à l'échelle décennal.

Les résultats obtenus montrent que les températures minimales ont augmenté entre 1965 et 2004, confirmant les hypothèses de réchauffement. Sur l'ensemble du bassin on observe une tendance à la baisse des températures maximales après avoir augmenté pendant les trois premières décennies. Au niveau des températures minimales, la tendance est à la hausse, passant de 20,8 à 21,9°C. Dans l'ensemble, la température moyenne annuelle a crû passant de 27,45 à 28,17°C. Soit une croissance annuelle de 0,021°C.

En ce qui concerne les hauteurs de pluie, au niveau stationnaire, il ne se dégage pas une tendance globale. Sur les quarante années, Kandi et Kérou ont une tendance à la baisse alors que c'est le contraire sur toutes les autres stations. La moyenne établie pour tout le bassin montre une tendance à la hausse, mais qu'il faut nuancer. En effet, de 1965 à 2004, la zone d'étude montre deux facettes. Deux décennies excédentaires (1965 – 1974 et 1995 – 2004) encadrent deux décennies déficitaires (1975 – 1995). Cette période déficitaire correspond à la récession pluviométrique constatée dans toute la région soudano-sahélienne et sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. L'existence d'une nouvelle décennie excédentaire ne marque pas forcément la fin de cette période de récession.

Simulation de l'occupation du sol

Le modèle CLUE-S, les cartes d'occupation du sol et les différents facteurs identifiés ont été utilisés pour la simulation de l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori. À cette fin la méthodologie utilisée a consisté d'abord en une agrégation des unités d'occupation en quatre unités plus génériques. Ensuite, des régressions logistiques ont été réalisées entre les facteurs identifiés et les unités d'occupation susceptibles de connaître une évolution spatio-temporelle. Les modèles de régression ont été validés avec les courbes ROC. Ces modèles de régression permettent de connaître avec quel(s) facteur(s) une unité d'occupation est corrélée. Autrement dit quels sont les facteurs potentiels influant sur l'évolution d'une unité d'occupation.

Les cartes d'occupation du sol de 1990 ont servi à valider le modèle. Du fait de la configuration du modèle, tous les facteurs identifiés ne pouvaient être pris en compte. Seuls ceux dont les cartes pouvaient être réalisées ont été considérés dans les paramètres.

Le modèle CLUE-S été ensuite utilisé avec les différents paramètres tels que l'itération, la demande en terre de chaque unité d'occupation, l'élasticité, la matrice de conversion, les cartes des facteurs spatialisables pour projeter l'occupation du sol entre 2008 et 2050. Le scenario utilisé est celui de la continuité des tendances observées entre 1990 et 2008 avec une protection des domaines classés.

Les résultats montrent que les champs vont continuer à s'étendre au rythme de la demande. Cette extension se fera au détriment des forêts. En 2050, l'occupation du sol dans le bassin-versant de l'Alibori sera constituée de 65% de champs et 33% de forêts. Ces forêts seront toutes localisées dans les aires protégées. Selon la projection, à partir de 2020, la superficie des champs aura déjà dépassé celle des forêts. Ces résultats montrent une tendance à l'accélération de la perte du couvert forestier qui aura régressé beaucoup plus entre 2008 et 2050 qu'entre 1973 et 2008.

D'une façon générale, on peut retenir qu'il est essentiel de prendre en compte le climat dans les projections de l'occupation du sol. Non seulement les moyennes pluviométriques, mais aussi la variabilité pluviométrique. Les modèles de régression logistique obtenus ont tous indiqués une forte corrélation entre la variabilité et les

unités d'occupation alors que des facteurs « classiques » comme la population n'étaient pas toujours présents dans ces modèles.

Au terme de ce travail, il importe de savoir que toute projection de l'occupation du sol sans la prise en compte du comportement humain et de la prise de décision n'atteindra jamais une précision réaliste en termes de prédiction. Le modèle CLUE-S ou d'autres approches similaires contribuent à la recherche sur le changement global en appliquant les mécanismes d'interactions connus entre l'occupation du sol, le climat (et d'autres paramètres biophysiques), la démographie et les systèmes économiques. Seul ce genre d'approche intégrée peut atteindre une vision plus ou moins complète des systèmes du monde réel. Bien que l'objectif visé soit une description réaliste de la dynamique de l'occupation du sol, les résultats ne doivent pas être vus comme la prévision de futurs événements. Ils indiquent plutôt de possibles formes de changements dans l'occupation du sol. Les modèles n'ont pas vocation à prédire la réalité mais peuvent aider à mieux comprendre des changements spatio-temporels environnementaux et sociaux complexes. Dans ce sens, l'interprétation des résultats des modélisations doit tenir compte des limites des modèles. La modélisation de l'occupation du sol signifie une simulation de ce que la réalité pourrait être, un scénario raisonné et quantifiable dans le contexte d'aide à la décision.

La modélisation de l'occupation du sol est un domaine de recherche très dynamique, avec beaucoup de nouveaux développements.

Beaucoup de scientifiques, surtout du domaine des sciences naturelles, assumaient que générer des projections allant de 100 ans à plusieurs siècles, à l'échelle locale ou globale serait facile. Cette présomption partait du principe simpliste que les changements dans l'occupation du sol consistaient généralement en la conversion de forêts en des zones agricoles (déforestation) ou la destruction de la végétation naturelle par le surpâturage, créant des conditions favorables à la désertification. Ces conversions étaient supposées linéaires, irréversibles et spatialement homogènes.

Par ailleurs, l'élément critique dans l'occupation du sol est l'agent humain. Ce sont les agents tels que les individus, les ménages et les firmes qui agissant selon leurs propres décisions, agissent ainsi sur l'occupation du sol. Ces différents agents sont impliqués dans un jeu très complexe dans lequel ils évaluent les alternatives

bénéfiques et non profitables. Malheureusement, le modèle utilisé n'a pas permis la prise en compte totale de la dimension humaine dans la dynamique de l'occupation du sol.

Avec les interactions Homme-environnement caractérisées par un degré élevé de complexité, il serait naturel de se demander si la construction de modèle reste justifiée, surtout quand on part déjà du principe que le modèle ne donnera pas une représentation exacte du monde réel. Mais la vraie question est plutôt de savoir ce qu'il est possible d'apprendre de ces modèles et si ces leçons contribuent à l'amélioration du bien-être humain et à la durabilité des ressources naturelles.

Au vu de ces différents constats, les axes suivants ont été dégagés pour être explorés au cours de travaux ultérieurs :

- Prise en compte de la température dans les facteurs potentiels de l'occupation du sol. Cela suppose une augmentation du nombre de stations synoptiques, mais ouvre aussi la voie à de nouvelles perspectives, à savoir par exemple : quelle serait la réaction des acteurs de la dynamique de l'occupation dans un contexte d'augmentation de la température ?

- Travailler à une échelle plus fine, ce qui nécessitera des données adéquates comme des images de meilleure résolution, mais aussi des données socioéconomiques allant jusqu'au niveau du ménage et des données climatiques à l'échelle journalière. Cela permettra probablement de percevoir les changements potentiels au niveau des localités ;

- La conception de scenarii supplémentaires, allant par exemple dans le sens d'une amélioration technologique ou des infrastructures, ou simplement à l'absence de domaine classés. Comment évolueraient alors les unités d'occupation, et à quel horizon assisterait-on à une destruction complète des formations végétales naturelles ?

Références bibliographiques

1. ADJINACOU C., 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.
2. AFOUDA F., 1990. *L'eau et les cultures dans le Bénin central et méridional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leur relation avec le milieu rural de la savane africaine*. Thèse de Doctorat nouveau régime, Paris IV-Sorbonne, 428 p.
3. AGARWAL C., GREEN G. M., EVANS T. P., SCHWEIK C. M., 2000. *A Review and Assessment of Land-Use Change Models : Dynamics of Space, Time, and Human Choice*. CIPEC Collaborative Report Series No. 1, 90 p.
4. 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.
5. AGONYISSA D., 2004. *Impacts de l'utilisation des terres sur la végétation dans les zones agropastorales au Bénin : cas de la région de Péhunco*, Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, 82 p.
6. AGRESTI, A., FINLAY B., 1997. *Statistical methods for the social sciences* (3rd edition). Upper Saddle River, New Jersey. Prentice-Hall, 706 p.
7. AIFAN H., 1993. *Climat, ressources en eau et développement agricole dans le Moyen-Bénin*, Mémoire de D.E.A "Climats et Contraintes Climatiques". Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon. 161 p.
8. AKINDELE G. S., 2000. *Aménagement durable de la Forêt Classée de l'Alibori Supérieur : Structure, dynamique des principaux groupements végétaux et périodicité d'exploitation*. Thèse d'ingénieur agronome, Université Nationale du Bénin, 186 p.
9. AKOEGNINOU, A., 2004. *Recherches botaniques et écologiques sur les forêts actuelles du Bénin*. Thèse de Doctorat, Laboratoire de Botanique et d'écologie végétale, Abidjan, Université de Cocody-Abidjan, 326 p.
10. ALIDOU S., 1983. *Etude sédimentologique, paléogéographique du bassin intracratonique paléozoïque mésozoïque de Kandi (Nord-Est du Bénin - Afrique de l'Ouest)*, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, 245 p.
11. AMBASSADE ROYALE DES PAYS-BAS, 1998a. *Programme de Gestion des Espaces "Forestiers" et d'Aménagement du Territoire (PGEFAT) dans le nord-est du Bénin, Volet étude de la faune sauvage et de son habitat dans les forêts classées des 3 rivières, de Ouénou-Bénou et de l'Alibori Supérieur*, Cotonou, Février 1998, 47 p. + annexes.
12. AMBASSADE ROYALE DES PAYS-BAS, 1998b. *Programme de Gestion des Espaces "Forestiers" et d'Aménagement du Territoire (PGEFAT) dans le nord-est du Bénin, Volet étude de la flore et de la végétation des forêts classées des 3 rivières, de Ouénou-Bénou et de l'Alibori Supérieur*, Cotonou, Février 1998, 35 p. + annexes.
13. 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 de l'Université de Bourgogne, Dijon. 315 p.

14. AZONTONDE H.A., 1991. *Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin, Soil Water Balance in the SudanoSahelian Zone* (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. no. 199.

15. BAGLO A. M., 1992. *Les écosystèmes de la région Nord Bénin*. SERHAU-SEM, Cotonou, 325 p.

16. BARIOU R., LE CAMUS D., LE HENAFF F., 1986. *Corrections atmosphériques*. Dossier de Télédétection, n°7. Costel, Presses Universitaires de Rennes 2, 116 p.

17. BATTY M., LONGLEY P., 1994. *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, Academic Press, San Diego, CA and London, 433p.

18. BAUD P., BOURGEAT S., BRAS C., 2008. *Dictionnaire de Géographie*, Ed. Hatier, Paris, 608 p.

19. BELKHERI O., 2003. *Utilisation des images satellites pour le suivi de l'état des territoires steppiques en Algérie : région de Djelfa. Organisation spatiale et gestion des terroirs ruraux,* Actes du colloque international, Montpellier, France, 8 p.

20. BIO BIGOU L.B., 1987. *La vallée bénino-nigérienne du fleuve Niger : Population et développement économique*. Thèse de Doctorat (nouveau régime), 2 volumes. Université de Bourgogne, Dijon, 917 p.

21. BOKO G. J., 2009. *Cartographie du risque érosif en utilisant l'USLE et les SIG : cas du bassin béninois du Niger*, Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, 96p.

22. BOKO M., 1987. *Etude sur la variabilité pluviométrique au Bénin*. In Climat et Climatologie. Volume d'Hommage offert au Professeur Pierre PAGNEY, Centre de Recherches de Climatologie, URA 909 du CNRS, Dijon, pp. 41-50.

23. BOKO M., 1988. *Climats et communautés rurales du Bénin. Rythmes climatiques et rythmes de développement*. Thèse d'Etat, Paris IV, 2 volumes, 608 p.

24. BOKO M., GUIWA C. et PERARD J., 1997. *Récessions pluviométriques et dynamique des paysages végétaux dans le bassin du Niger au Bénin (Afrique de l'Occidentale)*. Publication de l'association Internationale de Climatologie, vol 10, pp. 297-303.

25. BOKO P., 2009. *Tendances thermométriques au Bénin*, Mémoire de maîtrise, DGAT/FLASH, UAC. 64 p.

26. BOKONON-GANTA E. B., 1987. *Les climats de la région du Golfe du Bénin*. Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Institut de Géographie, Université de Paris-Sorbonne, Paris, 248 p. + annexes.

27. BOKONON-GANTA E.B., 1986. *Les sécheresses africaines récentes. Le cas du Bénin et du Togo*. Communication aux journées climatologiques de France, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne.

28. BOSERUP E., 1965. *The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure*. Allen and Unwin, London.

29. BOSERUP E., 1981. *Population and Technological Change: A Study of Long-Term Trends*. The University of Chicago Press, Chicago.

30. BOULAHOUAT N., NAERT B., 1996. E*tude méthodologique sur la télédétection des sols en milieu aride. Région de Djelfa- Algérie*. Montpellier, France, Etude et gestion des sols,

3 (1) : pp. 7-26.

31. BOX, G., 1979. *Robustness in the strategy of scientific model building*. In: Launer, L., Wilkinson G.N., (Eds.) Robustness in Statistics, 202 p.

32. BRIASSOULIS H., 2004. *Factors influencing Land-use and Land-cover change*, In Land use, Land Cover and Soil Sciences, Vol. 1, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Developed under the auspices of the UNESCO, EOLSS publishers, Oxford, UK. http://www.eolss.net.

33. BRIASSOULIS, H., 2000. *Analysis of Land-use Change: Theoretical and Modeling Approaches*. The Web Book of regional Science, Scott LOVERIDGE, ed. Regional Research Institute, West Virginia University, Morgantown, USA, http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm.

34. BRICQUET J. P., MAHE G., BAMBA F., 1995. *Changements climatiques et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali)*. In Hydrologie tropicale. géoscience et outil pour le développement, Mélange à la mémoire de JEAN Rodier. Actes de conférence de Paris, *IAHS Publ*, .n° 238, pp 113-124.

35. BRUMBY P. S., THEILER J., BLOCH J. J., HARVEY R. N., PERKINS S., SZYMANSKI J. J., YOUNG A. C. 2001. *Evolving land cover classification algorithms for multi-spectral and multi-temporal imagery*. Proc. SPIE 4480 (2001) pp. 120-129.

36. BRUNET R., 2000. *Des modèles en géographie ? Sens d'une recherche*. Bulletin de la Société de Géographie de Liège n°2, pp. 21-30.

37. BRUNET R., FERRAS R., THERY H., 1992. *Les mots de la géographie, dictionnaire critique*. Reclus/ La Documentation Française, Montpellier/Paris. 470 p.

38. CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING, *Fundamentals of Remote Sensing*, Natural Resources Canada, 258 p.

39. CASENAVE A. et VALENTIN C., 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, Paris, Didactiques, 230 p+ 196 photos.

40. CASTELLA J-C., KAM S. P., QUANG D. D., VERBURG P. H., HOANH C. T., 2007. *Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam*. Land Use Policy 24 (2007) pp. 531–545.

41. CENATEL & PGRN, 1995. *Carte de végétation du Bénin: Données de base et méthodologie*: 15 p.

42. CHANDER G., MARKHAM B. L., HELDER L. D., 2003. *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors*. Remote Sensing of Environment 113. Pp. 893–903.

43. CHAVEZ Jr., P. 1996. *Image-based atmospheric corrections – revisited and improved*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 62 (9): 1025–1036 p.

44. CORNEVIN R., 1981. *La république populaire du Bénin, des origines dahoméennes à nos jours*. Editions Maisonneuve et Larose-Paris, 584 p.

45. DANKO N., 2006. *Ressources végétales et économie domestique à Tobré (commune de Ouassa Pehunco), Nord Bénin*, Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, 83 p + annexes.

46. DAVENPORT M. L., NICHOLSON S. E. 1993. *On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in east Africa*. Inter. J. Remote Sensing, 14, pp 2369-2389.

47. DE HAAN L., 1997. *Genres de vie et Ecologie au Nord du Bénin : vers une utilisation plus durable de l'environnement, résultats, conclusions et recommandations*. In De Haan (éds) 1997. Agriculteurs et éleveurs au Nord du Bénin : Ecologie et genres de vie.

48. De SHERBININ A., 2002. *A CIESIN thematic guide to Land-Use and Land-Cover Change (LUCC),* Columbia University, New York. 67p.

49. DHONNEUR G., 1978. *Nouvelles approches des réalités météorologiques de l'Afrique Occidentale et Centrale*. ASECNA, Université de Dakar, pp. 385-487.

50. DHONNEUR G., 1979. *Traité de météorologie tropicale, application au cas particulier de l'Afrique Occidentale centrale*, 151 p.

51. DHONNEUR G., 1985. *Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale*. Direction de la météorologie.151p.

52. DJENONTIN J. A., WENNINK B., DAGBENONGBAKIN G., OUINKOUN G., 2002. *Pratiques de gestion de fertilité dans les exploitations agricoles du Nord-Bénin*. Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque. CIRAD, Montpellier, France, 9p.

53. DJENONTIN T., AMIDOU M., BACO N., 2003. *Diagnostic sur la gestion du troupeau : gestion des ressources pastorales dans l'Alibori et le Borgou*. Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque. CIRAD, Montpellier, France, 12 p.

54. DUBROEUCQ D., 1978. *Carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200 000. Feuille de Parakou*, OSTOM, 38 p.

55. DUNGLAS E., 1952. *Contribution à l'histoire du moyen-Dahomey*, numéros xix et xx des Etudes Dahoméennes.

56. ECOPAS, 2004. *Inventaire et cartographie des ressources de la zone tampon du Parc national du W – Composante du Bénin*. Rapport de mission, Kandi, 122 p.

57. ENGELSMAN W., 2002. *Simulating land use changes in an urbanizing area in Malaysia : An application of the CLUE-S model in the Selangor river basin*. Master of Sciences Thesis, Wageningen University. 67p.

58. FANGNON B., 2008. *Impacts des activités agricoles et de concassage de pierre sur l'environnement et la santé des populations de la commune de Bembèrèkè,* Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, 81 p.

59. FAO, 2000. *Global Forest Resources Assessment 2000, Main Report*. FAO Forestery paper, N°140, pp. 115-120.

60. FAO., 1985. *FAO Watershed Management Field Manual.* FAO Conservation Guide, vol. 13. UN Food and Agriculture Organization, Rome.

61. FAO., 1996. *Digital Soil Map of the World*. Revised legend. FAO, Rome, 119 p.

62. FAURE P., 1977. *Carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200 000. Feuille de Djougou* ORSTOM, 50 p.

63. FOTSING E., 1999. *Contribution de la morphologie mathématique à la cartographie de l'occupation du sol à partir d'images SPOT, région de l'extrême nord Cameroun*. Mémoire de DEA, Université de Yaoundé, IRD, 90 p.

64. FOTSING E., 2009. SMALL SAVANNAH : *Un Système d'Information pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace à l'Extrême Nord du Cameroun*. Thèse de Doctorat, Université de Leiden, 376 p.

65. FOTSING E., CHEYLAN J-P., VERBURG P. H., 2006. *From images to patterns: a step toward the identification and modelling of land change processes in a savannah landscape*. 6th International Conference on Earth Observation & Geoinformation Sciences in Support of Africa's Development, Cairo, Egypt. 9 p.

66. FOTSING E., VERBURG P., de GROOT W. T., CHEYLAN J-P., TCHUENTE M., 2009. *Un modèle intégré pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace en zone de savanes sèches du Cameroun*. Actes du colloque « Savanes africaines en développement : innover pour durer », 20-23 avril 2009, Garoua, Cameroun. Prasac, N'Djaména, Tchad ; Cirad, Montpellier, France, 17 p.

67. FOX J., VOGLER J.B., SEN O. L., ZIEGLER A. L., GIAMBELLUCA T. W., 2009. *Simulating land-cover change in Montane Mainland Southeast Asia*, 19 p.

68. 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.

69. GARSON, J., 2001, *Quantification in Modal Logic*, in GABBAY, D., and GUENTHNER, F. (eds.) Handbook of Philosophical Logic, second edition, volume 3, Dordrecht: D. Reidel, pp. 267-323.

70. GAUTIER F., LUBES NIEL H., SABATIER R., MASSON J-M., PATUREL J.E., SERVAT E., 1998. *Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989*. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 43(6) December 1998, pp 921-935.

71. GEIST H. J., LAMBIN E., 2003. *What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. Collection: LUCC Report Series; 4, 136 p.

72. GEIST H.J., LAMBIN E.F. 2002. *Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation*. *BioScience* 52(2):143–150.

73. GEOGHEGAN, J., Jr. L. PRITCHARD, Y. OGNEVA-HIMMELBERGER, R. R. CHOWDHURY, S. SANDERSON, B. L. TURNER II. 1998. *'Socializing the pixel' and 'pixelizing the social' in land-use and land-cover change*. Pp 51–69. In: D. LIVERMAN, E. F. MORAN, R. R. RINDFUSS, and P. C. STERN (eds.) People and pixels: Linking remote sensing and social science. National Academy Press, Washington.

74. GEOGHEGAN, J., VILLAR, C.S., KLEPEIS, P., MENDOZA, M., OGNEVA-HIMMELBERGER, Y., CHOWDHURY, R., TURNER II, B.L. VANCE, C., 2001. *Modeling tropical deforestation in the Southern Yucatán Peninsular Region: Comparing survey and satellite data*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 85, pp. 25-46.

75. GEORGES P., VERGER A., 2006. *Dictionnaire de la Géographie*. Paris, *Quadrige,* 521 p.

76. GEROUDET C., 2004. *Démographie et histoire agraire du bassin-versant de Merguellil*.

Bibliographie et Lexique. Institut National Agronomique, Paris-Grignon. 11p.

77. GIBIGAYE M., 2003. *Impact socio-économique et environnemental de l'introduction de nouvelles technologies agricoles dans le monde rural : cas des coopératives d'utilisation des machines agricoles de Bembèrèkè,* Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, 75p. + annexes.

78. GOLUBIEWSKI, N., GALAL H., GALAL H., 2007. *Remote sensing's functional role in studies of land-use/land-cover change*. In: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [Published in the Encyclopedia of Earth March 15, 2007; http://www.eoearth.org/article/Remote_sensing's_functional_role_in_studies_of_land-use/land-cover_change

79. GRASS Development Team, 2012. GRASS 6.5 *User's Manual.* Electronic document: http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/html64_user/

80. GRASS Development Team, 2012. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.5.2.* Open Source Geospatial Foundation. http://grass.osgeo.org.

81. GRASS Development Team, 2012. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Programmer's Manual.* Open Source Geospatial Foundation. Electronic document: http://grass.osgeo.org/programming6/.

82. GREGOIRE J-M., FERRARI G., 1990. *Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins-versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987 – décembre 1988).* Télédétection et sécheresse, Paris, pp. 81-93.

83. GROUPE CHADULE., 1994. *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*, Masson, Paris, 203 p.

84. GUILLET F., 1997. *Description et cartographie des états de surface d'un petit bassin-versant soudano-sahélien, région de Bidi, Nord Yatenga, Burkina Faso*. Télédétection et ressources en eau, Actes de l'atelier international, Montpellier, 16 p.

85. HAGETT P., 1973. *L'analyse spatiale en géographie humaine*. Ed. Armand Colin, 390 p.

86. HORN B. K. P., WOODHAM J. R., 1979. *Destriping LANDSAT MSS images by Histogram Modification*, Computer Graphics and IMAGE Processing 10, pp. 69-83.

87. HOSMER D., LEMESHOW S., 1989. *Applied Logistic Regression*, NewYork; Wiley, 392 p.

88. HOUETO F.O., 2007. *Capitalisation des référentiels techniques et méthodologiques en matière de lutte contre l'ensablement dans le bassin du Niger : Synthèse des résultats*, 28 p.

89. HOUGHTON R.A., 1994. *The worldwide extent of land-use change*. Bioscience 44: 305–313.

90. HOUNDENOU 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 p.

91. HOUNDENOU C., HOUSSOU C. S., VISSIN E.W., BOKO M., PERARD J., 2004. *Recherches de tendance dans les séries pluviométriques du bassin béninois du fleuve*

Niger, (Afrique de l'Ouest) : Actes du XVIIème Colloque International de Climatologie, Caen. pp. 171-175.

92. HOUNDENOU C., PERARD J., BOKO M., HERNANDEZ K., 2002. *Mise en évidence du rôle des précipitations tardives dans la variabilité pluviométrique du bassin béninois du Niger (Afrique de l'Ouest)*. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, vol 14, pp.127-133.

93. HUDAK A.T., LEWIS S., ROBICHAUD P., MORGAN P., BOBBITT M., LENTILE L., SMITH A., HOLDEN Z., CLARK J., MCKINLEY R., 2006. *Sensitivity of Landsat image-derived burn severity indices to immediate post-fire effects*. 3rd International Fire Ecology and Management Congress Proceedings. CD-ROM. 3 p.

94. HUETE A. R., JACKSON R. D., POST D. F., 1985. *Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds*. Remote Sensing of Environment, 17, n°1, pp. 37-53.

95. HUIGEN M. G. A., OVERMARS K.P., de GROOT W. T., 2006. *Multi-actor modeling of settling decisions and behavior in the San Mariano watershed, the Philippines: a first application with the MameLuke framework*. Ecology and Society 11(2): 33. [online] URL http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art33/.

96. HUSSIEN A. O., 2009. *Land use and land cover change, drivers and its impact: a comparative study from Kuhar Michael and Lenche Dima of Blue Nile and Awash basins of Ethiopia*. Master of Professional Studies, Cornell University. 139 p.

97. IDIETI E. M., 2009. *Variabilité hydro-climatique dans le bassin-versant de la Pendjari au Bénin (Nord-Ouest du Bénin)*, Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, 60 p.

98. INSAE, 1988a. RGPH1. *La population de l'Atacora : Villages et quartiers de ville (cartes de districts)*, 38 p.

99. INSAE, 1988b. RGPH1. *La population du Borgou : Villages et quartiers de ville (cartes de districts)*, 35 p.

100. INSAE, 1994a. *La population de l'Atakora : Villages et quartiers de ville (cartes de sous-préfectures)*, 50 p.

101. INSAE, 1994b. RGPH2. *La population du Borgou : Villages et quartiers de ville (cartes de sous-préfectures)*, 53 p.

102. INSAE, 2004a. *Cahiers de villages et quartier de ville, Département de l'Atacora*, 28 p.

103. INSAE, 2004b. *Cahiers de villages et quartier de ville, Département de l'Alibori*, 21 p.

104. INSAE, 2004c. *Cahiers de villages et quartier de ville, Département du Borgou*, 27 p.

105. IRWIN E. G., GEOGHEGAN J., 2001. *Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change*. Agriculture, Ecosystems and Environment 85 (2001), pp. 7–23.

106. ISSA, M-S, 2012. *Changements climatiques et agrosystèmes dans le Moyen-Bénin : impacts et stratégies d'adaptation*. Thèse de doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, 278 p.

107. JANEAU J-L., RUZ DE ESPERARZA VILLARREAL R., 1992. *Cartographie des*

états de surface d'une toposéquence représentative du bassin-versant de San Ignacio. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., (4), pp. 161-175.

108. JANICOT S., 1989. *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.

109. JANSEN, L. J. M., 2006. *Harmonization of land use class sets to facilitate compatibility and comparability of data across space and time*. Journal of Land Use Science, 1: 2, 127 — 156

110. JARLAN L., TOURRE Y. M., MOUGIN E., PHILIPPON ., MAZZEGA P., 2005. *Dominant patterns of AVHRR NDVI interannual variability over the Sahel and linkages with key climate signals (1982-2003)*. Geophysical Research Letters, vol. 32, L04701, DOI: 10.1029/2004GL021841.

111. JUDEX M., THAMM H-P., MENZ G., 2002. *Modelling of land-use changes in a West African catchment*. 6p.

112. JUNG Hui-Cheul, LEE Dong-Kun, JEON Seong-Woo, SONG Won-Kyong, 2005. *Analysis of deforestation patterns in the Baekdudaegan preservation area using land cover classification and change detection techniques; the feasibility of restoration*. Landscape Ecology Engineering 1: 177-194.

113. KISSEZOUNON V. C., 1978. *Elevage, culture attelée et développement rural au Borgou. Contribution à l'étude des transformations économiques et sociales dans le Nord-Est du Bénin*. Thèse de doctorat de troisième cycle. Université de Paris X. 337 p + annexes.

114. KOK, K., 2001. *Scaling the land use system. A modelling approach with case studies for Central America*. Thesis Wageningen University, 168 p.

115. KÖNIG, K., RUNGE J., SCHMIDT M., HAHN-HADJALI K., AGONYISSA D., AGBANI P., WIECKHORST, A. (in press) *The impact of land use on species distribution changes in North Benin*. - In: Runge, J.: Dynamic of forest ecosystems in Central Africa during the Holocene. Past – Present – Future. Palaeoecology of Africa, 28: 199-206.

116. KOUASSI A. M., KOUAME K. F., KOFFI Y. B., DJE B. K., PATUREL J. E.et OULARE S., 2010. *Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin-versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire*, *Cybergeo : European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, article 513. url : http://cybergeo.revues.org/23388.

117. L'HOTE Y., MAHE G., SOME B., TRIBOULET J.P., 2002. *Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues*. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 47(4) August 2002. Pp 563-572.

118. LAI P. C., MAK A. S. H., 2007. *GIS for Health and Environment. Development in the Asia-Pacific Region*; Springer, Berlin, 317 p.

119. LAMACHERE J. M., 1994. *Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zone sahélienne et soudanienne (Burkina-Faso) : effet sur les ruissellements*. X^{e} journée hydrologique, ORSTOM, Montpellier, pp. 91-103.

120. LAMBIN E. F., BAULIES X., BOCKSTAEL N., GÜNTER F., KRUG T. LEEMANS R., MORAN E. F., RINDFUSS R. R., SATO Y., SKOLE D., TURNER II B. L., VOGEL

C., 1999. *Land–Use and Land-Cover change: Implementation strategy*. IGBP report N°48, IHDP Report N°10, 132 p.

121. 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.

122. LAMBIN E. F., TURNER B. L., GEIST H. J., AGBOLA S. B., ANGELSEN A., BRUCE J. W., COOMES O. T., DIRZO R., FISCHER G., FOLKE C., GEORGE P. S., HOMEWOOD K., IMBERNON J., LEEMANS R., LI X., MORAN E. F., MORTIMORE M., RAMAKRISHNAN P. S., RICHARDS J. F., SKANES H., STEFFEN W., STONE G. D., SVEDIN U., VELDKAMP T. A., VOGEL C., XU J., 2001. *The causes of land-use change: Moving beyond myths*. Global Environmental Change 11 (2001) 261–269.

123. LAMBIN E., GEIST H. J., ELLIS E., 2007. *Causes of land-use and land-cover change*. In: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [First published in the Encyclopedia of Earth August 7, 2007; Last revised Date August 7, 2007; http://www.eoearth.org/article/Causes_of_land-use_and_land-cover_change

124. LANDIS J. R., KOCH G.G., 1977. *The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data*. Biometrics, 33. pp. 159–174.

125. LATE V., 1995. *Ressources en eau et développement agricole sur le bassin de Kandi*. Mémoire de maîtrise, Université Nationale du Bénin, FLASH/DGAT, 93 p.

126. LE BARBE L., ALE G., MILLET B., TEXIER H., BOREL Y., 1993. *Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*. Paris, ORSTOM, 540 p.

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

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

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

130. LIU J. G., MASON J. P., 2009. *Essential image processing and GIS for remote sensing*. Wiley-Blackwell, Chichester, 462 p.

131. LONG H., WU X., WANG W., DONG G., 2008. *Analysis of Urban-Rural Land-Use Change during 1995-2006 and Its Policy Dimensional Driving Forces in Chongqing, China*. Sensors 2008, 8, 681-699 p.

132. LOVELAND T., SOHL T., STEHMAN S., GALLANT A., SAYLER K., NAPTON D., 2002. *A strategy for estimating the rates of recent United States land-cover changes*. Photogramm Eng Rem S 68:1091–1099.

133. MAHE G., OLIVRY J.C., 1991. *Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel a l'interannuel*. Hydrology for the Water Management of Large River Basins (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991). IAHS Publ. no. 201. 163-171.

134. MAMA, J.V., HOUNDAGBA, J., 1991. *Document préparatoire pour la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement. Rapport du Bénin*: 116 p.

135. MANE L., BOIVIN P., SEGUIS L., 1995. *États de surface des sols non cultivés dans*

la cuvette de Nianga. description, radiométrie de terrain et imagerie Spot. " Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal", ORSTOM, Paris, pp 23-35.

136. MARTY P., 1926. *Etudes sur l'Islam au Dahomey*. Ed. Leroux, Paris 295 p.

137. MAS J-F., 2004. M*apping land use/cover in a tropical coastal area using satellite sensor data, GIS and artificial neural networks*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 59 (2004) pp. 219-230.

138. 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 de 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), 147 p. + Annexes.

139. MEYER, W.B., TURNER II B. L., eds. 1994. *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.

140. MEYER, W.B., TURNER II, B. L. 1996. *Land-Use/Land-Cover Change: Challenges for Geographers*. Geojournal 39(3): 237-240.

141. MINISTERE DE L'INTERIEUR, DE LA SECURITE ET DE L'ADMINISTRATION TERRITORIALE., 1997. *Atlas monographique des circonscriptions administratives du Bénin*, Projet trilatéral Bénino-Franco-Allemand d'appui à la déconcentration/décentralisation, Direction de l'Administration Territoriale et des Collectivités, Cotonou, Bénin.

142. MINISTERE DU DEVELOPPEMENT RURAL, 1993. *Rapport de zonage et sondage-diagnostic du département du Borgou*. FIDA, Direction de la Recherche Agronomique, Cotonou, Bénin, 111 p.

143. MITASOVA H., NETELER M., 2008, *Open Source GIS. A GRASS approach, third edition*, Springer, 410 p.

144. MORAN, M., JACKSON, R., SLATER, P., et TEILLET, P. 1992. *Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output*. Rem. Sens. Env. 41: 169–184 p.

145. MORON V., 1992. *Variabilité spatio-temporelle des précipitations en Afrique sahélienne et guinéenne (1933-1990)*. La Météorologie VII ^{e} série, Paris, pp. 24-30.

146. MORON V., 1993. *Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'Equateur (1933-1990) et relation avec les températures de surface océaniques et de la dynamique de l'atmosphère*. Thèse de doctorat, Centre de Recherche de Climatologie, université de Bourgogne, Dijon, tome 1, 225 p.

147. 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.

148. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2001. *Landsat Science Data Users Handbook*, Ed. NASA 186 p.

149. NEW M., HEWITSON B., STEPHENSON D. B., TSIGA A., KRUGER A., MANHIQUE A., GOMEZ B., COELHO C. A. S., MASISI D. N., KULULANGA E.,

MBAMBALALA E., ADESINA F., SALEH H., KANYANGA J., ADOSI J., BULANE L., FORTUNATA L., MDOKA M. L., LAJOIE R., 2006. *Evidence of trends in daily climate extremes over Southern and West Africa*. J. Geophys. Res., 111, D14102, doi:10.1029/2005JD006289.

150. NICHOLSON S. E., KIM J., 1997. *The relationship of the El Niño–Southern Oscillation to African rainfall*. International Journal of Climatology, Vol. 17, pp. 117–135.

151. OFFICE BENINOIS DES MINES, 1989. *Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000. Feuilles de Karimama, Porga, Kandi et Malanville*. 1ère édition, Mémoire n°2, 77 p.

152. OFFICE BENINOIS DES MINES, 1995. *Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000. Feuilles de Sansané-Mango, Natitingou et Bembèrèkè*. 1ère édition, Mémoire n°4, 66 p.

153. OGOUWALE E., 2006. *Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire*. Thèse de doctorat unique de l'Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, 302 p.

154. OGOUWALE R., 2009. *Ressources hydro-pluviométriques : Etat et tendances dans le bassin supérieur de l'Okpara*. Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, 74 p.

155. OLOUKOÏ J., MAMA V., AGBO B., 2006. *Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le Département des Collines en République du Bénin*. Télédétection, vol. 6, n° 4, pp. 305-323.

156. OREKAN V. O. A., 2008, *Implementation of the local land-use and land-cover change model CLUE-s for Central Bénin by using socioeconomic and remote sensing data*, Thèse de doctorat unique, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 208 p.

157. OUINAKONHAN, C. M., 2004. *Importance du coton dans l'assolement des exploitations et dans la dégradation du paysage au Bénin : cas de la commune de Gogounou*, Mémoire pour l'obtention du DIT, EPAC, UAC, 55 p.+ annexes.

158. OVERMARS K.P., DE GROOT W.T., HUIGEN M.G.A., 2007. *Comparing inductive and deductive modelling af land use decisions : principles, a model and an illustration from the Phillipines*. Human Ecology, online first DOI 10.1007/s10745-9101-6.

159. OZER P., ERPICUM M., DEMAREE G., VANDIEPENBEEK M., 2003. *Discussion of "Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues"; The sahelian drought may have ended during the 1990s*. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 48 (3). Pp. 489-496.

160. PAEGELOW M., VILLA N., CORNEZ L., FERRATY F., FERRE L. SARDA P., 2004. *Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne,* Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 295, mis en ligne le 06 décembre 2004. http://cybergeo.revues.org/index2811.html

161. PARKER D. C., HESSL A., DAVIS S. C., 2008. *Complexity, land-use modeling, and the human dimension: Fundamental challenges for mapping unknown outcome spaces*. Geoforum 39 (2008) pp. 789–804.

162. PARKER D.C., MANSON S.M., JANSSEN M.A., HOFFMAN M., DEADMAN P., 2003. *Multi-agents systems for the simulation of Land-Use and Land-Cover Change : A*

review. Annals of the Association of American Geographers, 93 (2): 314-337.

163. PATUREL J. E, SERVAT E., KOUAME B., BOYER J. F., LUBES NIEL H., MASSON J-M., 1995. *Procédures d'identification de « ruptures » dans des séries chronologiques - modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne*. L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai 1995). IAHS Publ. no. 238,1996. Pp 99-110.

164. PATUREL J. E., SERVAT E., DELATTRE M. O. LUBES NIEL H., 1998. *Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique*. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 43(6) December 1998. Pp 937-946.

165. PATUREL J-E, SERVAT E., KOUAME B., BOYER J-F, 1995. *Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Bénin et du Togo*. Sécheresse 1995 – 6. Pp 95-102.

166. PIJANOWSKI B. C., BROWN D. G., SHELLITO B. A., MANIK G. A., 2002. *Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land Transformation Model*. Computer, Environment and Urban Systems, n°7. 23 p.

167. PONTIUS, R.G. Jr., 2000. *Quantification error versus location in comparison of categorical maps*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, n° 8, p. 1011-1016.

168. RAHMAN, M.M., CSAPLOVICS E., KOCH B., KÖHL M., 2004: *Interpretation of Tropical Vegetation Using Landsat ETM+ Imagery*, in: M.O. Altan (ed.): Proc. XXth International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, 12.-23.7.2004, Istanbul, ISPRS 2004, vol. XXXV, Pt. B8: pp. 157-162.

169. REID R. S.; KRUSKA R. L., MUTHUI N., TAYE A., WOTTON S., WILSON C. J., MULATU W., 2000. *Land-use and land-cover dynamics in response to changes in climatic, biological and socio-political forces: the case of southwestern Ethiopia*. Landscape Ecology 15: 339–355.

170. RIEBSAME W., MEYER W., TURNER II B. L., 1994. *Modeling land use and cover as part of global environmental change*. Climatic Change 28: pp.45-64, the Netherlands.

171. ROBIN M., 2002. *Télédétection. Des satellites aux SIG : une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique*, Nathan, 2ème édition entièrement revue et augmentée, Paris, 318 p.

172. ROUNSEVELL M.D.A., EWERT F., REGINSTER I., LEEMANS R., CARTER T. R., 2007. *Future scenarios of European agricultural land use II. Projecting changes in cropland and grassland*. Agriculture, Ecosystems and Environment 107 (2005) pp. 117–135.

173. SAKA S. G., 1985. *Elaboration d'une stratégie et d'un plan d'actions pour le sous-secteur de l'élevage*. *Volet zootechnie*, FAO, 59 p.

174. SATO Y., BREILING M., YOSHIKAWA N., 2003. *Comparative Model Evaluation in LUCC Research*. Working paper presented at LUCC and Environmental Problems Colloquium. Bogor, Indonesia, 14 p.

175. SCHOWENGERDT, R., 1997. *Remote Sensing: Models And Methods for Image Processing*. San Diego: Academic Press, 2nd edition.

176. SERVAT E., PATUREL J. E., LUBES-NIEL H., KOUAME B., MASSON J.M., TRAVAGLIO 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 / Journal of Water Science, vol. 12, n° 2, 1999, pp. 363-387.

177. SINGH A., 1989. *Digital change detection techniques using remotely sensed data*. International Journal of Remote Sensing 10(6): pp. 989-1003.

178. SINSIN. B., 1993. *Phytosociologie, écologie, valeur pastorale, production et capacité de charge des pâturages naturels du périmètre Nikki-Kalalé au Nord-Bénin*. Thèse de Doctorat. Université Libre de Bruxelles. Belgique. 390 p.

179. SKOLE, D.L. 1994. *Data on Global Land-Cover Change: Acquisition, Assessment, and Analysis*. In *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*, eds. W.B. Meyer and B.L. Turner II, 437-471. Cambridge: Cambridge University Press.

180. SOEPBOER, W., 2001. *The Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent CLUE-S. An application for the Sibuyan Island, The Philippines*. Wageningen University - Environmental Sciences: 45 p.

181. SOHL T., SAYLER K., 2008. *Using the FORE-SCE model to project land-cover change in the southeastern United States*. Ecological Modelling 219 (2008) 49–65.

182. SOUNON BOUKO B., SINSIN B., GOURA SOULE 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. Pp. 221-227.

183. STONEY W. E., 2008. *ASPRS Guide to land imaging satellites*, Nobilis Inc., Washington, 10 p.

184. TANG Z., ENGEL B.A., PIJANOWSKI B. C., LIM K. J., 2005. *Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale*. Journal of Environmental Management 76 (2005) pp. 35–45.

185. TENTE B., 2000. Dynamique actuelle de l'état de surface dans le massif de l'Atacora : Secteur Perma – Toucountouna. Mém. DEA /FLASH/UNB, Bénin, 83 p.

186. THEOBALD, D. M., HOBBS, N. T., 1998. *Forecasting rural land use change: A comparison of regression- and spatial transition-based models*. Geographical and Environmental Modelling 2(1), pp. 57-74.

187. TREITZ P. M., ROGAN J., 2004. *Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: an introduction*. Progress Plan 61:269–279.

188. 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, 132 p.

189. VELDKAMP A., FRESCO L.., 1996. *CLUE : a conceptual model to study the Conversion of Land-use and its Effects*. Ecological Modelling 85 (1996) pp. 253-270.

190. VELDKAMP A., LAMBIN E. F., 2001. *Predicting Land-use change*. Agriculture, Ecosystems and Environment 85 (2001) pp. 1–6.

191. VELDKAMP A., VERBURG P. H., KOK K., de KONING G. H. J., PRIESS J., BERGSMA A. R., 2001. *The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use modeling*. Environmental modeling and assessment 6 : 111-121. Kluwers Academic

Publishers, the Netherlands.

192. VERBURG P. H, VELDKAMP A. 2004. *Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales*. Landscape Ecology 19 (1): 77-98.

193. VERBURG P. H., CHEN Y., VELDKAMP T., 2000. *Spatial explorations of land use change and grain production in China*. Agriculture, Ecosystems and Environment 82, Elsevier. Pp. 333–354.

194. VERBURG P. H., de KONING G. H. J., KOK K., VELDKAMP A., BOUMA J. 1999b. *A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use*. Ecological Modelling 116: 45-61.

195. VERBURG P. H., SOEPBOER W., VELDKAMP A., LIMPIADA R., ESPALDON V., MASTURA S. A. S., 2002. *Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S Model*. Environmental Management Vol. 30, No 3, Springer Verlag New York. Pp 391-405.

196. VERBURG P. H., VELDKAMP A., BOUMA J., 1999a. *Land use change under conditions of high population pressure : the case of Java*. Global Environmental Change 9: 303-312.

197. VERBURG P. H., VELDKAMP A., FRESCO L. O. 1999. *Simulation of changes in the spatial distribution of land use in China*. Applied Geography 19: 211-233.

198. VERBURG P.H., de GROOT W.T. and VELDKAMP A. 2003. *Methodology for multi-scale land-use change modelling: Concepts and challenges*. In: DOLMAN A.J., VERHAGEN A. and ROVERS C.A. (eds), Global environmental change and land use. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.

199. VERBURG P.H., SCHOT P., DIJST M., VELDKAMP A., 2004. *Land use change modelling : current practice and research priorities*. GeoJournal 61: 309–324, 2004.

200. VERBURG PH, OVERMARS KP., 2009. *Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model*. Landscape Ecology 24(9): 1167-1181.

201. VERBURG, P. H., 2000. *Exploring the spatial and temporal dynamics of land use with special reference to China*. Thèse de doctorat, Wageningen University, 143 p.

202. VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZÉ, J., HERMAN, M., MORCRETTE, J. 1997. *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview*. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens. 35 (3): 675–686.

203. VISSER, H.(ed.), 2004. *The MAP COMPARISON KIT: methods, software and applications*. RIVM report 550002005/2004, 127 p.

204. 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 de l'Université de Bourgogne, Dijon. 310 p.

205. WIMBERLY, M. C., OHMANN J. L., 2004. *A multi-scale assessment of human and environmental constraints on forest land cover change on the Oregon (USA) coast range*. Landscape Ecology. 19: 631-646.

206. YABI F., 2008. *Etude de l'agroforesterie à base de l'anacardier et des contraintes climatiques à son développement dans le centre-Bénin*. Thèse de doctorat, Université

d'Abomey-Calavi, 240 p.

207. YOUNG, O. R., LAMBIN E. F., ALCOCK F., HABERL H., KARLSSON S. I., McCONNELL W. J., MYINT T., PAHL-WOSTL C., POLSKY C., RAMAKRISHNAN P., SCHROEDER H., SCOUVART M., VERBURG P. H., 2006. *A portfolio approach to analyzing complex human-environment interactions: institutions and land change*. Ecology and Society 11(2): 31. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art31/.

208. ZEKPETE E. I. E. S., 2009. *Transhumance et changement climatique : Utilisation des outils d'aide à la décision dans la gestion durable des ressources des écosystèmes pastoraux soudano-sahélien du Bénin*. Mémoire de DESS de la Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi. 78 p.

Sites web:

1. http://www.landsat.org
2. http://www.cluemodel.nl
3. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed
4. http://www.springerlink.com
5. http://academic.research.microsoft.com
6. http://cybergeo.revues.org
7. http://www.eoearth.org
8. http://www.ivm.vu.nl/CLUE
9. http://biodiversityinformatics.amnh.org/landsatkey/landsatkey.php
10. http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro00/ArcGIS/Chapter4/chapter4.pdf
11. http://www.archive.org/stream/landusechangemod06luij/landusechangemod06luij_djvu.txt
12. http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/guide_main.jsp.
13. http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp

Liste des figures

Figure 1 : Différents types de bassin-versant 23
Figure 2: Localisation de la zone d'étude 40
Figure 3: Situation administrative du bassin de l'Alibori 41
Figure 4: Mouvements du FIT en Afrique de l'Ouest 43
Figure 5 : Hauteurs de pluie moyennes mensuelles de 1965 à 2004 46
Figure 6 : Interpolation et spatialisation des hauteurs de pluie dans le bassin de l'Alibori 47
Figure 7 : Evolution mensuelle de la température à Kandi (1965 - 2004) 48
Figure 8 : Rythme moyen décadaire de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à la station de Kandi (1965-2004) 50
Figure 9: Hypsométrie du bassin de l'Alibori 52
Figure 10: Hydrographie du bassin de l'Alibori 54
Figure 11 : Géologie du bassin-versant de l'Alibori 57
Figure 12 : Les sols présents dans le bassin-versant de l'Alibori 60
Figure 13 : Les aires protégées dans le bassin de l'Alibori 67
Figure 14 : Evolution intercensitaire de la population dans les communes du bassin de l'Alibori 74
Figure 15 : Démographie du bassin-versant de l'Alibori 75
Figure 16 : Configuration d'une image sous forme de pixels 91
Figure 17 : Localisation des scènes Landsat utilisées 93
Figure 18 : Points GPS enregistrés au cours des travaux de terrain 98
Figure 19 : Bande 4 de l'image Landsat ETM+ du 24 octobre 2005 105
Figure 20 : Histogramme de la bande 4 de la scène Landsat 7 du 24 octobre 2005 107
Figure 21 : Processus de réétalement d'histogramme 107
Figure 22 : Résultat d'une amélioration par réétalement 108
Figure 23 : Signatures spectrales de quelques entités 109
Figure 24 : Extrait de la carte de la NDVI de la région de Kandi 110
Figure 25 : Compositions en 3-2-1 (vraies couleurs) de la région de Kandi 111
Figure 26 : Trois compositions colorées en fausses couleurs 113
Figure 27 : Processus de classification supervisée 116
Figure 28 : Struture du modèle CLUE-S 121
Figure 29 : Vue d'ensemble du flux de données dans le modèle CLUE 122
Figure 30 : Séquence probable de transition dans l'occupation du sol 123
Figure 31 : Processus d'allocation spatiale du modèle CLUE-S 129
Figure 32 : Interfaces du module File Converter 133
Figure 33 : Aperçus de l'interface du logiciel Dyna-CLUE 134
Figure 34 : Proportion des principales catégories d'unité d'occupation du sol en 1973 141
Figure 35 : Proportion des principales catégories d'unité d'occupation du sol en 1990 142
Figure 36 : Proportion des principales catégories d'unité d'occupation du sol en 2008 142
Figure 37 : Occupation du sol dans le bassin de l'Alibori en 1973, 1990 et 2008 143
Figure 38 : Evolution des pourcentages de chaque unité d'occupation de 1973 à 2008 146
Figure 39 : Evolution des superficies cultivées pour les principales spéculations agricoles (1987-2007) 155
Figure 40 : Evolution des emblavures, de la production et du rendement du coton dans les communes du bassin de l'Alibori 160
Figure 41 : Variabilité des températures minimales (a) et maximales (b) 170
Figure 42 : Anomalies des températures maximales à la station de Kandi (1965-2004) 172
Figure 43 : Evolution décennale des températures maximales (1965-2004) 173
Figure 44 : Anomalies des températures minimales (1965-2004) 173

Figure 45 : Evolution décennale des températures minimales (1965-2004) 174
Figure 46 : Variation interannuelle de la température moyenne (1965-2004) 176
Figure 47 : Anomalies des températures moyennes (1965-2004) 177
Figure 48 : Rythmes décennaux des températures moyennes 178
Figure 49 : Diagramme ombrothermique de la station de Kandi 179
Figure 50 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Kandi (1965-2004)..... 181
Figure 51 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Malanville (1965-2004) 181
Figure 52 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Banikoara (1965-2004) 182
Figure 53 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Bembèrèkè (1965-2004) 183
Figure 54 : Variabilité pluviométrique interannuelle à la station de Kérou 183
Figure 55 : Variabilité pluviométrique interannuelle dans le bassin-versant de l'Alibori 184
Figure 56 : Variabilités pluviométriques décennales dans le bassin du Niger 186
Figure 57 : Variabilité saisonnière du bilan climatique mensuel de la station de Kandi (1965-2004)..... 188
Figure 58 : Bilan climatique annuel de la station de Kandi (1965-2004) 189
Figure 59 : Cartes de quelques facteurs utilisés pour la modélisation 195
Figure 60 : Courbes ROC des modèles de régression finaux..... 199
Figure 61 : Occupation du sol réelle en 2008..... 201
Figure 62 : Evolution de la demande en terres des différentes unités d'occupation..... 203
Figure 63 : Evolution des pourcentages de chaque unité d'occupation de 2008 à 2050 205
Figure 64 : Occupation du sol simulée de 2020 à 2050 206

Liste des photos

Photo 1 : Vue d'une des collines de Sinendé 51
Photo 2 : Source de l'Alibori à Ouassa Kika 53
Photo 3 : L'Alibori en période d'étiage au pont de Banikoara (**a**) et Tobré (**b***)*..... 53
Photo 4 : Aperçus du sol à Kandi 59
Photo 5 : Savane arbustive à Tobré 62
Photo 6 : Galerie forestière le long de l'Alibori dans la commune de Karimama..... 63
Photo 7 : Savane à emprise agricole observée à Banikoara 64
Photo 8: Jachère à Yambérou (Banikoara) 65
Photo 9 : Plage dénudée à Fétékou (Kérou)..... 66
Photo 10 : Superficies emblavées dans la zone d'étude 78
Photo 11 : Troupeau de bovins dans la vallée du Niger 80
Photo 12 : Pêche artisanale dans l'Alibori..... 81
Photo 13 : Gravier issu d'une carrière à Niaro (commune de Sinendé) 84
Photo 14 : Réalisation d'un focus group à Pikiré 99
Photo 15 : Champ de mais à Yarra dans la Forêt Classée de l'Alibori 153
Photo 16 : Champs de coton et de maïs juxtaposés à Gogounou..... 162
Photo 17 : Coton récolté dans un champ à Ouara (Gogonou)..... 163

Liste des tableaux

Tableau I : Exemples d'occupation du sol et d'utilisation du sol 25
Tableau II : Stations situées à l'intérieur ou proches du bassin-versant de l'Alibori 87
Tableau III : Matrice de corrélation des stations retenues 87
Tableau IV : Résumé des missions Landsat et capteurs embarqués 92
Tableau V : Caractéristiques des images Landsat TM et ETM+ 92
Tableau VI : Scènes LANDSAT utilisées 93
Tableau VII : Localités visitées lors des travaux de terrain 97
Tableau VIII : Clé d'interprétation d'images satellites 117
Tableau IX : Forme générique de la matrice de confusion (matrice de contingence) 118
Tableau X : Exemple de matrice de conversion des quelques unités d'occupation 124
Tableau XI : Tableau de contingence deux à deux 127
Tableau XII : Méthode d'introduction des facteurs spatiaux dans le logiciel CLUE 135
Tableau XIII : Principaux paramètres 137
Tableau XIV : Dynamique des unités d'occupation entre 1973 et 1990 144
Tableau XV : Dynamique des unités d'occupation entre 1990 et 2008 144
Tableau XVI : Températures moyennes mensuelles à la station de Kandi (1965-2004) 175
Tableau XVII : Répartition des années enregistrées dans le bassin de l'Alibori par catégorie (1965-2004) 185
Tableau XVIII : Modèles de régression pour les différentes unités d'occupation 197
Tableau XIX : Comparaison de l'occupation simulée et de l'occupation réelle 200
Tableau XX :Tendances en matière d'évolution future des différentes unités d'occupation 202
Tableau XXI : Valeurs d'élasticité utilisées pour la simulation 203
Tableau XXII : Matrice de conversion utilisée 204

Annexes

ANNEXE 1 : Guide d'entretien destiné aux agriculteurs

Date : Village
Arrondissement Commune

II- Informations sur les formes d'exploitation des ressources naturelles par les agriculteurs
2.1- A part l'agriculture, avez-vous une autre activité liée à l'utilisation des ressources naturelles ? (cueillette, apiculture, fabrication de charbon, ramassage de bois mort, etc.)

Activités / Ressources naturelles	Cueillette	Apiculture	Fabrication de charbon	Ramassage de bois mort	Autres activités
Terres					
Eau					
Végétation					
Faune					

2.2- Quel type d'énergie utilisez-vous dans votre ménage ?

Bois	
Charbon	
Gaz	

2.3- Par quel moyen vous procurez-vous cette énergie ? (Achat, ramassage, Abattage, production, etc.)

	Achat	Ramassage	Abattage	Production
Bois				
Charbon				
Gaz				

III- Systèmes culturaux utilisés
3.1- Quels sont les outils que vous utilisez ?

Houe, coupe-coupe	
Charrue	
Tracteur	

Qu'est-ce qui justifie le choix de ces outils ?

Quels sont les impacts de ces outils sur l'environnement ?

3.2- Avez-vous conservé les mêmes outils ou ont-ils évolué avec le temps ?

Si oui, pourquoi ?

Coût (cher, pas cher)	
Accessibilité, disponibilité (existe ou n'existe pas dans le milieu)	
Efficacité (marche bien, donne de bons résultats)	
Autres raisons	

Quels en sont les impacts sur la production ?

3.3- Quels sont les types de fertilisants que vous utilisez dans la culture de vos champs ?

Qu'est-ce qui justifie le choix de ces fertilisants ?

Coût (cher, pas cher)	
Accessibilité, disponibilité (existe ou n'existe pas dans le milieu)	
Efficacité (marche bien, donne de bons résultats)	
Autres raisons	

3.4- Quels sont les techniques d'amélioration que vous utilisez ? (engrais chimique, engrais organiques, jachère, etc.)

Engrais chimiques	
Engrais organiques (compost, bouses de vache)	
Jachères	

Quels sont les impacts de ces techniques sur l'environnement ?

3.5- Dans le cas de la jachère, comment procédez-vous ? Evoluez-vous vers de nouveaux espaces naturels, ou retournez-vous vers d'anciens champs abandonnés ?

Quelle est, en mois, la durée moyenne d'une jachère ?

IV- Perceptions des changements climatiques

4.1- Avez-vous remarqué une (des) modification(?) des saisons au fil des années ?

4.2- Comment se présentent ces modifications ?

- La saison sèche dure plus longtemps
- Saison pluvieuse dure plus longtemps
- La saison sèche démarre plus tôt
- La saison des pluies démarre plus tôt
- Les saisons ont la même durée mais se décalent dans l'année
- Autres

V- Conséquences des changements climatiques

5.1- Quelles sont les manifestations de ces différents changements que vous observez ?

- Sur le sol (les terres)

- sur l'environnement

- votre vie quotidienne

5.2- Comment faites-vous face à ces différentes conséquences ?

VI Par rapport aux éleveurs

6.1- Y a-t-il des conflits entre vous et les éleveurs ?

6.2- Quels en sont les causes selon vous ?

6.3- Quels sont les conséquences de ces conflits ?

Merci pour votre participation

ANNEXE 2 : Guide d'entretien destiné aux éleveurs

I- Informations générales

Date …..... Nom .....
Arrondissement …..... Commune ….....

II- Informations sur les modes d'exploitation des ressources naturelles

2.1- Lors de vos déplacements, avez-vous recours au bois pour des usages quotidiens?

Lesquels?

Choisissez-vous des espèces végétales spécifiques?

Si oui, lesquelles?

2.2. Pratiquez-vous l'élagage pour nourrir vos animaux?

Si oui, pourquoi?

Ciblez-vous des espèces spécifiques?

Si oui, lesquelles?

2.3. Vous arrive-t-il de traverser des champs lors de vos déplacements?

Si oui, pourquoi?

2.4. Quels sont les préjudices causés aux cultures lors de ces traversées ?

2.5. Selon vous, quels sont les conséquences (positives et négatives) de ces traversées sur l'environnement

2.6. Quelles types de plan d'eau exploitez-vous pour abreuver vos animaux?

Fleuve, rivière	Barrage
Retenue d'eau	Mare (naturelle)

2.7. Pratiquez-vous des feux de végétation ?

Si oui, à quelles fins?

2.8. Quels sont, selon vous, les risques liées à la pratique de feux de végétation?

III- Changements climatiques

3.1- Pratiquez-vous la transhumance?

3.2- Quel est votre circuit habituel

3.3- Y a-t-il eu des modifications de la période de transhumance?

À quoi sont dues ces modifications?

3.4- Observez-vous actuellement des modifications dans les saisons?

SI oui, quelles sont-elles?

- un allongement de la saison sèche
- un allongement de la saison des pluies
- une alternance des saisons au cours de l'année difficile à maîtriser

3.5- Quelles sont les conséquences de ces modifications sur vos activités?

Merci pour votre participation.

ANNEXE 3 : Modules du SIG GRASS mentionnés dans le document et description de leur fonctionnement

NAME
i.oif - Calculates Optimum-Index-Factor table for LANDSAT TM bands 1-5, & 7
KEYWORDS
raster, imagery, statistics
SYNOPSIS
i.oif
i.oif help
i.oif [-g] image1=*string* image2=*string* image3=*string* image4=*string* image5=*string* image7=*string* [--verbose] [--quiet]
Flags:
-g
Print in shell script style
--verbose
Verbose module output
--quiet
Quiet module output
Parameters:
image1=*string*
LANDSAT TM band 1.
image2=*string*
LANDSAT TM band 2.
image3=*string*
LANDSAT TM band 3.
image4=*string*
LANDSAT TM band 4.
image5=*string*
LANDSAT TM band 5.
image7=*string*
LANDSAT TM band 7.
DESCRIPTION
i.oif calculates the Optimum Index Factor for LANDSAT TM bands 1,2,3,4,5 and 7.
The Optimum Index Factor is calculated to determine the band combination which shows the maximum information when combined into a composite image. The bands comprising the highest scoring combination from *i.oif* are used as the three color channels required for *d.rgb* or *r.composite*.
The analysis is saved to a file in the current directory called "i.oif.result".
NOTES
Colour Composites in BGR order: important band combinations (example: 234 in BGR order means: B=2, G=3, R=4):
123: near natural ("true") colour; however, because of correlation of the 3 bands in visible spectrum, this combination contains not much more info than is contained in single band.
234: sensitive to green vegetation (portrayed as red), coniferous as distinctly darker red than deciduous forests. Roads and water bodies are clear.
243: green vegetation is green but coniferous forests aren't as clear as the 234 combination.
247: one of the best for info pertaining to forestry. Good for operation scale mapping of recent harvest areas and road construction.
345: contains one band from each of the main reflective units (vis, nir, shortwave infra).

Green vegetation is green and the shortwave band shows vegetational stress and mortality.
Roads are less evident as band 3 is blue.
347: similar to 345 but depicts burned areas better.
354: appears more like a colour infrared photo.
374: similar to 354.
457: shows soil texture classes (clay, loam, sandy).

EXAMPLE

North Carolina sample dataset:

```
g.region rast=lsat7_2002_10 -p
i.oif image1=lsat7_2002_10 image2=lsat7_2002_20 image3=lsat7_2002_30 \
    image4=lsat7_2002_40 image5=lsat7_2002_50 image7=lsat7_2002_70
```

REFERENCE

Jensen, 1996. Introductory digital image processing. Prentice Hall, p.98. ISBN 0-13-205840-5

SEE ALSO

d.rgb, *r.composite*, *r.covar*, *r.univar*

AUTHOR

Markus Neteler, ITC-Irst, Trento, Italy
Updated to GRASS 5.7 by Michael Barton, Arizona State University

Last changed: $Date: 2011-09-04 06:23:30 -0700 (Sun, 04 Sep 2011)

NAME
r.kappa - Calculate error matrix and kappa parameter for accuracy assessment of classification result.
KEYWORDS
raster, statistics
SYNOPSIS
r.kappa
r.kappa help
r.kappa [-wqh] classification=*name* reference=*name* [output=*name*] [title=*string*] [--verbose] [--quiet]
Flags:
-w
Wide report
132 columns (default: 80)
-q
Quiet
-h
No header in the report
--verbose
Verbose module output
--quiet
Quiet module output
Parameters:
classification=*name*
Name of raster map containing classification result
reference=*name*
Name of raster map containing reference classes
output=*name*
Name for output file containing error matrix and kappa
title=*string*
Title for error matrix and kappa
Default: *ACCURACY ASSESSMENT*
DESCRIPTION
r.kappa tabulates the error matrix of classification result by crossing classified map layer with respect to reference map layer. Both overall *kappa* (accompanied by its *variance*) and conditional *kappa* values are calculated. This analysis program respects the current geographic region and mask settings.
r.kappa calculates the error matrix of the two map layers and prepares the table from which the report is to be created. *kappa* values for overall and each classes are computed along with their variances. Also percent of commission and ommission error, total correct classified result by pixel counts, total area in pixel counts and percentage of overall correctly classified pixels are tabulated.
The report will be write to an output file which is in plain text format and named by user at prompt of running the program.
The body of the report is arranged in panels. The classified result map layer categories is arranged along the vertical axis of the table, while the reference map layer categories along the horizontal axis. Each panel has a maximum of 5 categories (9 if wide format) across the top. In addition, the last column of the last panel reflects a cross total of each column for each row. All of the categories of the map layer arranged along the vertical axis, i.e., the reference map layer, are included in each panel. There is a total at the bottom of each column

representing the sum of all the rows in that column.

NOTES

It is recommended to reclassify categories of classified result map layer into a more manageable number before running *r.kappa* on the classified raster map layer. Because *r.kappa* calculates and then reports information for each and every category.

NA's in output file mean non-applicable in case *MASK* exists.

SEE ALSO

g.region, *r.category*, *r.mask*, *r.reclass*, *r.report*, *r.stats*

AUTHOR

Tao Wen, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois

Last changed: $Date: 2008-05-16 12:09:06 -0700 (Fri, 16 May 2008)

NAME
r.reclass - Creates a new map layer whose category values are based upon a reclassification of the categories in an existing raster map layer.
KEYWORDS
raster, statistics, reclass
SYNOPSIS
r.reclass
r.reclass help
r.reclass input=*name* output=*name* [rules=*name*] [title=*string*] [--overwrite] [--verbose] [--quiet]
Flags:
--overwrite
Allow output files to overwrite existing files
--verbose
Verbose module output
--quiet
Quiet module output
Parameters:
input=*name*
Raster map to be reclassified
output=*name*
Name for output raster map
rules=*name*
File containing reclass rules
title=*string*
Title for the resulting raster map
DESCRIPTION
r.reclass creates an *output* map layer based on an *input* integer raster map layer. The output map layer will be a reclassification of the input map layer based on reclass rules input to *r.reclass*, and can be treated in much the same way that raster maps are treated. A *TITLE* for the output map layer may be (optionally) specified by the user.
The reclass rules are read from standard input (i.e., from the keyboard, redirected from a file, or piped through another program).
Before using *r.reclass* the user must know the following:
The new categories desired; and, which old categories fit into which new categories.
The names of the new categories.
NOTES
In fact, the *r.reclass* program does *not* generate any new raster map layers (in the interests of disk space conservation). Instead, a reclass table is stored which will be used to reclassify the original raster map layer each time the new (reclassed) map name is requested. As far as the user (and programmer) is concerned, that raster map has been created.
r.reclass only works on an *integer* input raster map; if the input map is instead floating point data, you must multiply the input data by some factor to acheive whole number input data, otherwise *r.reclass* will round the raster values down to the next integer.
Also note that although the user can generate a *r.reclass* map which is based on another *r.reclass* map, the new *r.reclass* map map will be stored in GRASS as a reclass of the *original* raster map on which the first reclassed map was based. Therefore, while GRASS allows the user to provide *r.reclass* map layer information which is based on an already reclassified map (for the user's convenience), no *r.reclass* map layer (i.e., *reclass table*) will ever be *stored* as a *r.reclass* of a *r.reclass*.

To convert a reclass map to a regular raster map layer, set your geographic region settings to match the settings in the header for the reclass map (with "g.region rast=reclass_map", or viewable by running *r.info*) and then run *r.resample*.
r.mapcalc can be used to convert a reclass map to a regular raster map layer as well:

```
r.mapcalc "raster_map = reclass_map"
```

where *raster_map* is the name to be given to the new raster map, and *reclass_map* is an existing reclass map.
Because *r.reclass* generates a table referencing some original raster map layer rather than creating a reclassed raster map layer, a *r.reclass* map layer will no longer be accessible if the original raster map layer upon which it was based is later removed.
A *r.reclass* map is not a true raster map layer. Rather, it is a table of reclassification values which reference the input raster map layer. Therefore, users who wish to retain reclassified map layers must also save the original input raster map layers from which they were generated. Alternatively r.recode can be used.
Category values which are not explicitly reclassified to a new value by the user will be reclassified to NULL.
Reclass Rules
Each line of input must have the following format:
input_categories=*output_category* [*label*]
where each line of input specifies the category values in the input raster map layer to be reclassified to the new *output_category* category value. Specification of a *label* to be associated with the new output map layer category is option*al*. If specified, it is recorded as the category label for the new category value. The equal sign = is required. The *input_category(ies)* may consist of single category values or a range of such values in the format "*low* thru *high*." The word "thru" must be present.
To include all (remaining) values the asterix "*" can be used. This rule has to be set as last rule. No further rules are accepted after setting this rule. The special rule "* = *" specifies that all categories not expicitly set by one of the above rules should be passed through unaltered instead of being set to NULL.
Categories to become no data are specified by setting the output category value to "NULL".
A line containing only the word end terminates the input.
EXAMPLES
The following examples may help clarify the reclass rules.
1. This example reclassifies categories 1, 2 and 3 in the input raster map layer "roads" to category 1 with category label "good quality" in the output map layer, and reclassifies input raster map layer categories 4 and 5 to category 2 with the label "poor quality" in the output map layer.

```
1 2 3   = 1    good quality
4 5     = 2    poor quality
```

2. This example reclassifies categories 1, 3 and 5 in the input raster map layer to category 1 with category label "poor quality" in the output map layer, and reclassifies input raster map layer categories 2, 4, and 6 to category 2 with the label "good quality" in the output map layer. All other values are reclassified to NULL.

```
1 3 5   = 1    poor quality
2 4 6   = 2    good quality
*       = NULL
```

3. This example reclassifies input raster map layer categories 1 thru 10 to output map layer category 1, input map layer categories 11 thru 20 to output map layer category 2, and input map layer categories 21 thru 30 to output map layer category 3, all without labels. The range from 30 to 40 is reclassified as NULL.

1 thru 10 = 1
11 thru 20 = 2
21 thru 30 = 3
30 thru 40 = NULL

4. Subsequent rules override previous rules. Therefore, the below example reclassifies input raster map layer categories 1 thru 19 and 51 thru 100 to category 1 in the output map layer, input raster map layer categories 20 thru 24 and 26 thru 50 to the output map layer category 2, and input raster map layer category 25 to the output category 3.

1 thru 100 = 1 poor quality
20 thru 50 = 2 medium quality
25 = 3 good quality

5. The previous example could also have been entered as:

1 thru 19 51 thru 100 = 1 poor quality
20 thru 24 26 thru 50 = 2 medium quality
25 = 3 good quality

or as:

1 thru 19 = 1 poor quality
51 thru 100 = 1
20 thru 24 = 2
26 thru 50 = 2 medium quality
25 = 3 good quality

The final example was given to show how the labels are handled. If a new category value appears in more than one rule (as is the case with new category values 1 and 2), the last label which was specified becomes the label for that category. In this case the labels are assigned exactly as in the two previous examples.

SEE ALSO

r.resample, *r.rescale*, *r.recode*

AUTHORS

James Westervelt,
Michael Shapiro
U.S.Army Construction Engineering Research Laboratory

Last changed: $Date: 2009-09-19 08:10:59 -0700 (Sat, 19 Sep 2009)

NAME
r.recode - Recodes categorical raster maps.
KEYWORDS
raster, recode category
SYNOPSIS
r.recode
r.recode help
r.recode [-ad] input=*name* output=*name* [rules=*name*] [title=*string*] [--overwrite] [--verbose] [--quiet]
Flags:
-a
Align the current region to the input raster map
-d
Force output to 'double' raster map type (DCELL)
--overwrite
Allow output files to overwrite existing files
--verbose
Verbose module output
--quiet
Quiet module output
Parameters:
input=*name*
Name of raster map to be recoded
output=*name*
Name for output raster map
rules=*name*
File containing recode rules
"-" to read from stdin
title=*string*
Title for output raster map
DESCRIPTION
r.recode creates an output raster map by recoding input raster map based on recode rules. A title for the output raster map may be (optionally) specified by the user.
The recode rules can be read from standard input (i.e., from the keyboard, redirected from a file, or piped through another program) by entering rules=-.
Rules are defined in one of these formats:

```
old_low:old_high:new_low:new_high
old_low:old_high:new_val  (i.e. new_high == new_low)
*:old_val:new_val        (interval [inf, old_val])
old_val:*:new_val        (interval [old_val, inf])
```

r.recode is loosely based on *r.reclass* and uses the GRASS Reclass Library to convert the rasters. It has routines for converting to every possible combination of raster (eg. CELL to DCELL, DCELL to FCELL, etc). Standard floating point raster precision is float (FCELL), with -d double precision (DCELL) will be written.
There are four basic routines that it accepts:
old-low to old-high is reclassed to new-low to new high , where the user provides all four values. The program figures on the fly what type of raster should be created.
old-low to old-high is reclassed to a single new value. Anything outside the range is null.
* to old-high will reclass everything less than old-high to a single new value.
old-low to * will reclass everything greater than old-low to a single new value.

These four sets of arguments can be given on the command line, or piped via stdin or a file. More than one set of arguments is accepted.

EXAMPLES

Map type conversion

To simply convert a raster between formats (eg. int to float) the user would use the first argument. For example

```
10:1500:0.1:15.0
```

would convert an input raster map with range between 10 and 1500 to a float raster raster with range bewteen 0.1 and 15.0.

Value replacement

r.recode can be used to replace existing cell values by others. The formatting is as described above. In following example the values 1, 2 and 3 are replaced by 1.1, 7.5 resp. 0.4:

```
r.recode input=oldmap output=newmap << EOF
  1:1:1.1:1.1
  2:2:7.5:7.5
  3:3:0.4:0.4
EOF
```

AUTHOR

CERL

Last changed: $Date: 2010-10-31 01:46:46 -0700 (Sun, 31 Oct 2010)

NAME
v.surf.rst - Spatial approximation and topographic analysis from given point or isoline data in vector format to floating point raster format using regularized spline with tension.
KEYWORDS
vector, interpolation
SYNOPSIS
v.surf.rst
v.surf.rst help
v.surf.rst [-zctd] input=*name* [layer=*integer*] [where=*sql_query*] [elev=*name*] [slope=*name*] [aspect=*name*] [pcurv=*name*] [tcurv=*name*] [mcurv=*name*] [devi=*string*] [cvdev=*name*] [treefile=*name*] [overfile=*name*] [masKmap=*name*] [zcolumn=*string*] [tension=*float*] [smooth=*float*] [scolumn=*string*] [segmax=*integer*] [npmin=*integer*] [dmin=*float*] [dmax=*float*] [zmult=*float*] [theta=*float*] [scalex=*float*] [--overwrite] [--verbose] [--quiet]
Flags:
-z
Use z-coordinates (3D vector only)
-c
Perform cross-validation procedure without raster approximation
-t
Use scale dependent tension
-d
Output partial derivatives instead of topographic parameters
--overwrite
Allow output files to overwrite existing files
--verbose
Verbose module output
--quiet
Quiet module output
Parameters:
input=*name*
Name of input vector map
layer=*integer*
Layer number
If set to 0, z coordinates are used. (3D vector only)
Default: *1*
where=*sql_query*
WHERE conditions of SQL statement without 'where' keyword
Example: income < 1000 and inhab >= 10000
elev=*name*
Output surface raster map (elevation)
slope=*name*
Output slope raster map
aspect=*name*
Output aspect raster map
pcurv=*name*
Output profile curvature raster map
tcurv=*name*
Output tangential curvature raster map
mcurv=*name*
Output mean curvature raster map

devi=*string*
Output deviations vector point file
cvdev=*name*
Output cross-validation errors vector point file
treefile=*name*
Output vector map showing quadtree segmentation
overfile=*name*
Output vector map showing overlapping windows
masKmap=*name*
Name of the raster map used as mask
zcolumn=*string*
Name of the attribute column with values to be used for approximation (if layer>0)
tension=*float*
Tension parameter
Default: *40.*
smooth=*float*
Smoothing parameter
scolumn=*string*
Name of the attribute column with smoothing parameters
segmax=*integer*
Maximum number of points in a segment
Default: *40*
npmin=*integer*
Minimum number of points for approximation in a segment (>segmax)
Default: *300*
dmin=*float*
Minimum distance between points (to remove almost identical points)
Default: *0.500000*
dmax=*float*
Maximum distance between points on isoline (to insert additional points)
Default: *2.500000*
zmult=*float*
Conversion factor for values used for approximation
Default: *1.0*
theta=*float*
Anisotropy angle (in degrees counterclockwise from East)
scalex=*float*
Anisotropy scaling factor
DESCRIPTION
v.surf.rst
This program performs spatial approximation based on z-values (*-z* flag or *layer=0* parameter) or attributes (*zcolumn* parameter) of point or isoline data given in a vector map named *input* to grid cells in the output raster map *elev* representing a surface. As an option, simultaneously with approximation, topographic parameters slope, aspect, profile curvature (measured in the direction of the steepest slope), tangential curvature (measured in the direction of a tangent to contour line) or mean curvature are computed and saved as raster maps specified by the options *slope, aspect, pcurv, tcurv, mcurv* respectively. If *-d* flag is set, the program outputs partial derivatives f_x,f_y,f_{xx}, f_{yy},f_{xy} instead of slope, aspect, profile, tangential and mean curvatures respectively.
User can define a raster map named *masKmap*, which will be used as a mask. The

approximation is skipped for cells which have zero or NULL value in mask. NULL values will be assigned to these cells in all output raster maps. Data points are checked for identical points and points that are closer to each other than the given *dmin* are removed. If sparsely digitized contours or isolines are used as input, additional points are computed between each 2 points on a line if the distance between them is greater than specified *dmax*. Parameter *zmult* allows user to rescale the values used for approximation (useful e.g. for transformation of elevations given in feet to meters, so that the proper values of slopes and curvatures can be computed).

Regularized spline with tension is used for the approximation. The *tension* parameter tunes the character of the resulting surface from thin plate to membrane. Smoothing parameter *smooth* controls the deviation between the given points and the resulting surface and it can be very effective in smoothing noisy data while preserving the geometrical properties of the surface. With the smoothing parameter set to zero (*smooth=0*) the resulting surface passes exactly through the data points (spatial interpolation is performed). When smoothing parameter is used, it is also possible to output a vector point file *devi* containing deviations of the resulting surface from the given data.

If the number of given points is greater than *segmax*, segmented processing is used . The region is split into quadtree-based rectangular segments, each having less than *segmax* points and approximation is performed on each segment of the region. To ensure smooth connection of segments the approximation function for each segment is computed using the points in the given segment and the points in its neighborhood which are in the rectangular window surrounding the given segment. The number of points taken for approximation is controlled by *npmin*, the value of which must be larger than *segmax*. User can choose to output vector maps *treefile* and *overfile* which represent the quad tree used for segmentation and overlapping neighborhoods from which additional points for approximation on each segment were taken.

Predictive error of surface approximation for given parameters can be computed using the -c flag. A crossvalidation procedure is then performed using the data given in the vector map *input* and the estimated predictive errors are stored in the vector point file *cvdev*. When using this flag, no raster output files are computed. Anisotropic surfaces can be interpolated by setting anisotropy angle *theta* and scaling factor *scalex*. The program writes values of selected input and internally computed parameters to the history file of raster map ***elev***.

NOTES

v.surf.rst uses regularized spline with tension for approximation from vector data. The module does not require input data with topology, therefore both level1 (no topology) and level2 (with topology) vector point data are supported. Additional points are used for approximation between each 2 points on a line if the distance between them is greater than specified *dmax*. If *dmax* is small (less than cell size) the number of added data points can be vary large and slow down approximation significantly. The implementation has a segmentation procedure based on quadtrees which enhances the efficiency for large data sets. Special color tables are created by the program for output raster maps.

Topographic parameters are computed directly from the approximation function so that the important relationships between these parameters are preserved. The equations for computation of these parameters and their interpretation is described in Mitasova and Hofierka, 1993 or Neteler and Mitasova, 2004). Slopes and aspect are computed in degrees (0-90 and 1-360 respectively). The aspect raster map has value 0 assigned to flat areas (with slope less than 0.1%) and to singular points with undefined aspect. Aspect points downslope and is 90 to the North, 180 to the West, 270 to the South and 360 to the East, the values increase counterclockwise. Curvatures are positive for convex and negative for concave areas. Singular points with undefined curvatures have assigned zero values.

Tension and *smooth*ing allow user to tune the surface character. For most landscape scale applications the default values should provide adequate results. The program gives warning when significant overshoots appear in the resulting surface and higher tension or smoothing should be used. To select parameters that will produce a surface with desired properties, it is useful to know that the method is scale dependent and the *tension* works as a rescaling parameter (high *tension* "increases the distances between the points" and reduces the range of impact of each point, low *tension* "decreases the distance" and the points influence each other over longer range). Surface with *tension* set too high behaves like a membrane (rubber sheet stretched over the data points) with peak or pit ("crater") in each given point and everywhere else the surface goes rapidly to trend. If digitized contours are used as input data, high tension can cause artificial waves along contours. Lower tension and higher smoothing is suggested for such a case.
Surface with *tension* set too low behaves like a stiff steel plate and overshoots can appear in areas with rapid change of gradient and segmentation can be visible. Increase in tension should solve the problems.
There are two options how *tension* can be applied in relation to *dnorm* (dnorm rescales the coordinates depending on the average data density so that the size of segments with *segmax*=40 points is around 1 - this ensures the numerical stability of the computation):
1. Default: the given *tension* is applied to normalized data (x/*dnorm*..), that means that the distances are multiplied (rescaled) by *tension/dnorm*. If density of points is changed, e.g., by using higher *dmin*, the *dnorm* changes and *tension* needs to be changed too to get the same result. Because the *tension* is applied to normalized data its suitable value is usually within the 10-100 range and does not depend on the actual scale (distances) of the original data (which can be km for regional applications or cm for field experiments).
2. Flag -t : The given *tension* is applied to un-normalized data (rescaled tension = t*ension***dnorm*/1000 is applied to normalized data (x/*dnorm*) and therefore *dnorm* cancels out) so here *tension* truly works as a rescaling parameter. For regional applications with distances between points in km. the suitable tension can be 500 or higher, for detailed field scale analysis it can be 0.1. To help select how much the data need to be rescaled the program writes *dnorm* and rescaled tension fi=*tension***dnorm*/1000 at the beginning of the program run. This rescaled *tension* should be around 20-30. If it is lower or higher, the given *tension* parameter should be changed accordingly.
The default is a recommended choice, however for the applications where the user needs to change density of data and preserve the approximation character the -t flag can be helpful.
Anisotropic data (e.g. geologic phenomena) can be interpolated using *theta* and *scalex* defining orientation and ratio of the perpendicular axes put on the longest/shortest side of the feature, respectively. *Theta* is measured in degrees from East, counterclockwise. *Scalex* is a ratio of axes sizes. Setting *scalex* in the range 0-1, results in a pattern prolonged in the direction defined by *theta*. *Scalex* value 0.5 means that modeled feature is approximately 2 times longer in the direction of *theta* than in the perpendicular direction. *Scalex* value 2 means that axes ratio is reverse resulting in a pattern perpendicular to the previous example. Please note that anisotropy option has not been extensively tested and may include bugs (for example , topographic parameters may not be computed correctly) - if there are problems, please report to GRASS bugtracker (accessible from http://grass.osgeo.org/).

For data with values changing over several magnitudes (sometimes the concentration or density data) it is suggested to interpolate the log of the values rather than the original ones.
The program checks the numerical stability of the algorithm by computing the values in given points, and prints the root mean square deviation (rms) found into the history file of raster map *elev*. For computation with smoothing set to 0. rms should be 0. Significant increase in

tension is suggested if the rms is unexpectedly high for this case. With smoothing parameter greater than zero the surface will not pass exactly through the data points and the higher the parameter the closer the surface will be to the trend. The rms then represents a measure of smoothing effect on data. More detailed analysis of smoothing effects can be performed using the output deviations option.

SQL support

Using the *where* parameter, the interpolation can be limited to use only a subset of the input vectors.

Spearfish example (we simulate randomly distributed elevation measures):

```
g.region rast=elevation.10m -p
# random elevation extraction
r.random elevation.10m vector_output=elevrand n=200
v.info -c elevrand
v.db.select elevrand

# interpolation based on all points
v.surf.rst elevrand zcol=value elev=elev_full
r.colors elev_full rast=elevation.10m
d.rast elev_full
d.vect elevrand

# interpolation based on subset of points (only those over 1300m/asl)
v.surf.rst elevrand zcol=value elev=elev_partial where="value > 1300"
r.colors elev_partial rast=elevation.10m
d.rast elev_partial
d.vect elevrand where="value > 1300"
```

Cross validation procedure

The "optimal" approximation parameters for given data can be found using a cross-validation (CV) procedure (-c flag). The CV procedure is based on removing one input data point at a time, performing the approximation for the location of the removed point using the remaining data points and calculating the difference between the actual and approximated value for the removed data point. The procedure is repeated until every data point has been, in turn, removed. This form of CV is also known as the "leave-one-out" or "jack-knife" method (Hofierka et *al.*, 2002; Hofierka, 2005). The differences (residuals) are then stored in the *cvdev* output vector map. Please note that during the CV procedure no other output files can be set, the approximation is performed only for locations defined by input data. To find "optimal parameters", the CV procedure must be iteratively performed for all reasonable combinations of the approximation parameters with small incremental steps (e.g. tension, smoothing) in order to find a combination with minimal statistical error (also called predictive error) defined by root mean squared error (RMSE), mean absolute error (MAE) or other error characteristics. A script with loops for tested RST parameters can do the job, necessary statistics can be calculated using e.g. v.univar. It should be noted that crossvalidation is a time-consuming procedure, usually reasonable for up to several thousands of points. For larger data sets, CV should be applied to a representative subset of the data. The cross-validation procedure works well only for well-sampled phenomena and when minimizing the predictive error is the go*al*. The parameters found by minimizing the predictive (CV) error may not not be the best for for poorly sampled phenomena (result could be strongly smoothed with lost details and fluctuations) or when significant noise is present that needs to be smoothed out.

The program writes the values of parameters used in computation into the comment part of

history file *elev* as well as the following values which help to evaluate the results and choose the suitable parameters: minimum and maximum z values in the data file (zmin_data, zmax_data) and in the interpolated raster map (zmin_int, zmax_int), rescaling parameter used for normalization (dnorm), which influences the tension.
If visible connection of segments appears, the program should be rerun with higher *npmin* to get more points from the neighborhood of given segment and/or with higher tension.
When the number of points in a vector map is not too large (less than 800), the user can skip segmentation by setting *segmax* to the number of data points or *segmax=700*.
The program gives warning when user wants to interpolate outside the rectangle given by minimum and maximum coordinates in the vector map, zoom into the area where the given data are is suggested in this case.
When a mask is used, the program takes all points in the given region for approximation, including those in the area which is masked out, to ensure proper approximation along the border of the mask. It therefore does not mask out the data points, if this is desirable, it must be done outside *v.surf.rst*.
For examples of applications see GRASS4 implementation and GRASS5 and GRASS6 implementation.
The user must run g.region before the program to set the region and resolution for approximation.

SEE ALSO

v.vol.rst

AUTHORS

Original version of program (in FORTRAN) and GRASS enhancements:
Lubos Mitas, NCSA, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois, USA (1990-2000); Department of Physics, North Carolina State University, Raleigh
Helena Mitasova, USA CERL, Department of Geography, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA (1990-2001); MEAS, North Carolina State University, Raleigh
Modified program (translated to C, adapted for GRASS, new segmentation procedure):
Irina Kosinovsky, US Army CERL, Dave Gerdes, US Army CERL
Modifications for new sites format and timestamping:
Darrel McCauley, Purdue University, Bill Brown, US Army CERL
Update for GRASS5.7, GRASS6 and addition of crossvalidation: Jaroslav Hofierka, University of Presov; Radim Blazek, ITC-irst

REFERENCES

Mitasova, H., Mitas, L. and Harmon, R.S., 2005, Simultaneous spline approximation and topographic analysis for lidar elevation data in open source GIS, IEEE GRSL 2 (4), 375- 379.

Hofierka, J., 2005, Interpolation of Radioactivity Data Using Regularized Spline with Tension. Applied GIS, Vol. 1, No. 2, pp. 16-01 to 16-13. DOI: 10.2104/ag050016

Hofierka J., Parajka J., Mitasova H., Mitas L., 2002, Multivariate Interpolation of Precipitation Using Regularized Spline with Tension. Transactions in GIS 6(2), pp. 135-150.

H. Mitasova, L. Mitas, B.M. Brown, D.P. Gerdes, I. Kosinovsky, 1995, Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS. International Journal of GIS, 9 (4), special issue on Integrating GIS and Environmental modeling, 433-446.

Mitasova, H. and Mitas, L., 1993: Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation, Mathematical Geology ,25, 641-655.

Mitasova, H. and Hofierka, J., 1993: Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis, Mathematical Geology 25, 657-667.

Mitas, L., and Mitasova H., 1988, General variational approach to the approximation problem, Computers and Mathematics with Applications, v.16, p. 983-992.

Neteler, M. and Mitasova, H., 2008, Open Source GIS: A GRASS GIS Approach, 3rd Edition, Springer, New York, 406 pages.

Talmi, A. and Gilat, G., 1977 : Method for Smooth Approximation of Data, Journal of Computational Physics, 23, p.93-123.

Wahba, G., 1990, : Spline Models for Observational Data, CNMS-NSF Regional Conference series in applied mathematics, 59, SIAM, Philadelphia, Pennsylvania.

Last changed: $Date: 2011-11-08 03:29:50 -0800 (Tue, 08 Nov 2011)

Table des matières

SOMMAIRE **3**

SIGLES ET ACRONYMES **5**

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS **7**

RESUME **11**

ABSTRACT **13**

CHAPITRE 1 : CADRE THEORIQUE DE L'ETUDE **15**

1. JUSTIFICATION DE L'ETUDE 15
2. HYPOTHESES DE TRAVAIL 21
3. OBJECTIFS DE L'ETUDE 22
4. DEFINITION DE CONCEPTS CLES 22
5. POINT DES CONNAISSANCES 29
   - *5.1. Variabilité climatique 29*
   - *5.2. Dynamique de l'occupation du sol et facteurs à la base 31*
   - *5.3. Modélisation de l'occupation du sol 33*
   - *5.4. Le modèle CLUE 35*

CHAPITRE 2 : LE CADRE D'ETUDE : DESCRIPTION PHYSIQUE ET HUMAINE DU BASSIN-VERSANT DE L'ALIBORI 39

1. LOCALISATION ET SITUATION ADMINISTRATIVE 39
2. LE CADRE PHYSIQUE 39
   - *2.1. Le climat de la zone d'étude 42*
   - *1.2. Le relief et l'hydrographie 51*
   - *1.3. Géologie et pédologie 55*
   - *1.4. La végétation du bassin-versant de l'Alibori 59*
   - *1.5. La faune 67*
2. PRESENTATION DU CADRE HUMAIN 69
   - *2.1. Contexte historique et peuplement 69*
   - *2.2. La population et la démographie 73*
   - *2.3. Activités économiques 76*

CONCLUSION PARTIELLE 84

CHAPITRE 3 : DONNEES MATERIEL ET METHODES **86**

1. PRESENTATION DES VARIABLES D'ETUDE 86
   - *1.1. Variables climatiques 86*
   - *1.2. Variables démographiques et socioéconomiques 88*
2. MATERIELS 89
   - *2.1. Les cartes 89*
   - *2.2. Outils et logiciels utilisés 94*
3. METHODE DE COLLECTE DES DONNEES 95
   - *3.1. La documentation : 95*
   - *3.2. Les travaux de terrain 96*
4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES CLIMATIQUES 100
   - *4.1. Les paramètres de tendance centrale 100*
   - *4.2. Les paramètres de dispersion 100*
   - *4.3. Mise en évidence des tendances 101*
   - *4.4. Calcul du bilan climatique 103*
5. TRAITEMENT DES DONNEES CARTOGRAPHIQUES 103
   - *5.1. Le prétraitement 104*
   - *5.2. Le traitement proprement dit 106*

5.3. Validation des résultats ... *117*
6. PRESENTATION DU MODELE CLUE ... 118
6.1. Bref aperçu historique ... *118*
6.2. Structure du modèle ... *120*
6.3. Processus de modélisation ... *121*
6.4. Evaluation du modèle de régression logistique ... *127*
6.5. Processus d'allocation spatiale ... *128*
6.6. Préparation des données ... *130*
6.7. Le logiciel CLUE : interface et paramètres requis pour la simulation ... *134*
CONCLUSION PARTIELLE ... 138

CHAPITRE 4 : OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI : DYNAMIQUE ET FACTEURS DETERMINANTS ... 140

1. ETAT DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI ... 140
2. DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN-VERSANT DE L'ALIBORI ... 144
3. DETERMINANTS DE L'OCCUPATION DU SOL ET DE SA DYNAMIQUE ... 146
3.1. Les facteurs biophysiques ... *147*
3.2. Les facteurs spatiaux ... *149*
3.3. Les facteurs d'origine humaine ... *151*
3.4. Les facteurs institutionnels ... *157*
4. DISCUSSION ... 164
CONCLUSION PARTIELLE ... 168

CHAPITRE 5 : VARIABILITE CLIMATIQUE, FACTEUR DE DYNAMIQUE DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI ... 169

1. EVOLUTION ET TENDANCES THERMOMETRIQUES ... 169
1.1. Tendances des températures maximales et minimales ... *171*
1.2. Evolution et tendances des températures moyennes ... *175*
2. TENDANCES PLUVIOMETRIQUES DANS LE BASSIN DE L'ALIBORI ... 179
2.1. Le domaine soudano-sahélien ... *180*
2.2. Le domaine soudanien typique ... *182*
2.3. Tendances pluviométriques moyennes dans le bassin de l'Alibori ... *184*
3. EVOLUTION DU BILAN CLIMATIQUE ... 188
3.1. Bilan climatique mensuel ... *188*
3.2. Bilan climatique annuel ... *189*
4. DISCUSSION DES RÉSULTATS ... 190
CONCLUSION PARTIELLE ... 192

CHAPITRE 6 : TRAJECTOIRES POTENTIELLES DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN-VERSANT DE L'ALIBORI ... 194

1.- PARAMETRES UTILISES ... 194
2.- RESULTATS DE LA REGRESSION LOGISTIQUE ... 196
3.- VALIDATION DU MODELE ... 199
4.- SCENARIO DE SIMULATION ... 202
5.- RESULTATS DE LA SIMULATION ... 204
6.- LIMITES ET DISCUSSION DES RESULTATS ... 208
6.1.- Limites inhérentes à la méthode ... *208*
6.2.- Limites liées aux données et au modèle ... *209*
6.3.- Discussion ... *211*
CONCLUSION PARTIELLE ... 213

CONCLUSION GENERALE ... 214

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ... 219

LISTE DES FIGURES ... 235

LISTE DES PHOTOS ... 236

LISTE DES TABLEAUX ... 237

ANNEXES **238**
TABLE DES MATIERES **259**