

**FACULTE DES SCIENCES**  
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne  
de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de  
la dégradation du couvert végétal**



Année académique 2007-2008

Dissertation présentée par  
**Yvon-Carmen Houéhanou HOUNTONDI**  
en vue de l'obtention du grade de  
Docteur en Sciences

JUIN 2008

Je, soussigné, Jean-Marie BOUQUEGNEAU, Doyen de la  
Faculté des Sciences certifie que :

**Monsieur Yvon-Carmen HOUNTONDI**

Né à Cotonou (Benin), le 11/08/1973

a obtenu le grade de **Docteur en Sciences**.

Date de la défense de la thèse : 23 juin 2008

Le Doyen,



J.M. BOUQUEGNEAU

### Composition du jury

- Prof. Jacques NICOLAS (Université de Liège, BELGIQUE) : Président
- Prof. Eric LAMBIN (Université Catholique de Louvain, BELGIQUE) : Examineur
- Prof. Dominique PERRIN (Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, BELGIQUE) : Examineur
- Prof. Nestor SOKPON (Université de Parakou, BENIN) : Co promoteur
- Dr. Pierre OZER (Université de Liège, BELGIQUE) : Promoteur

**A mes parents Alexandre Mèdessi HOUNTONDI et Julienne ALIA**

## REMERCIEMENTS

La réalisation d'une thèse est une grande exploration à la fois scientifique et humaine, remplie de découvertes, de bons moments, mais également semée d'embûches et d'épreuves complexes. Ce parcours du chercheur n'est pas une navigation en solitaire mais bien une aventure partagée et portée par de nombreuses personnes qu'il m'est difficile de rassembler entièrement dans ces quelques lignes.

Cette aventure a tout d'abord été rendue possible grâce à la mise en commun des expériences et expertises du tandem formé par un géographe-climatologue et un agronome forestier. Leur complémentarité aura été d'une grande richesse pour progresser dans ce travail et m'ouvrir à leurs différentes disciplines. Avec une bonne dose de rigueur, de persévérance et d'optimisme, ils m'ont été d'un grand soutien pour progresser dans mes questionnements et mieux appréhender la complexité de la recherche dans ce vaste champ d'investigation qu'est l'environnement. Pour cela, je tiens à remercier très chaleureusement:

- le Dr. Pierre OZER, promoteur de ce travail, qui a conduit mes premiers pas à travers l'initiation à la rédaction d'articles scientifiques pour la valorisation des résultats de mes travaux. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance non seulement pour cet apprentissage mais aussi pour ses multiples lectures et remarques plus qu'édifiantes. Je tiens à préciser ici que j'ai le privilège d'être le tout premier Doctorant qu'il a accepté avec beaucoup de ferveur d'encadrer. Qu'il soit ici remercié pour cette marque de confiance.
- le Prof. Dr. Ir. Nestor SOKPON, co-promoteur de cette thèse, qui a beaucoup contribué à son amélioration par ses multiples commentaires et orientations des travaux. Qu'il accepte ici toute ma reconnaissance non seulement pour son soutien scientifique mais aussi pour la confiance qu'il m'a accordée depuis notre première rencontre en 1997 à l'Université d'Abomey-Calavi.

Je tiens à gratifier les éminents membres du jury de thèse de ma profonde reconnaissance pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de ce manuscrit.

J'exprime ma vive reconnaissance à la commission de Coopération Universitaire au Développement (CUD) qui a soutenu financièrement ce projet de recherche doctorale, grâce à la bourse qui m'a été accordée dans le cadre du Programme Actions-Nord (2003-2007) du CUIF.

Je remercie le Dr. Bernard TYCHON, pour les critiques pertinentes, les multiples propositions d'orientation et conseils qu'il m'a donnés au début de cette thèse. A travers lui, je remercie toute l'équipe « Eau et Environnement » du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège. Je pense particulièrement aux collègues : Dr. Marie CORS, Dr. Moussa El-JARROUDI, Dr. Mohamed BOUERZMARNI, Dr. Bruno HERAULT, Stéphanie HORION, Emmanuelle WEINZAEPFLEN, Pierre DENNE, Adrien HULPIAU, Quentin STAINIER, Damien ROSSILLON. J'exprime également ma reconnaissance à mon ami et aîné Bakary DJABY, pour les échanges très enrichissants que nous avons eus lors de nos rencontres sur le campus d'Arlon. Je les remercie tous pour ces moments uniques passés ensemble. J'adresse également mes sincères remerciements à tout le personnel du campus d'Arlon (Ex-FUL) dont le sourire et la disponibilité m'ont quelque peu rappelé cette chaleur africaine laissée 6000 km plus loin dans mon Bénin natal.

Le soutien permanent de mes proches dans cette étape de ma vie a été plus que déterminant. Que mes parents trouvent à travers ces lignes toute ma gratitude pour m'avoir aidé à toujours maintenir le cap : « *Maman, papa, merci d'avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui* ». Permettez-moi également de témoigner toute ma reconnaissance à mon cousin et associé, Dr. Fabien C. HOUNTONDI, qui m'a passé le relais au sein de la famille, il y a bientôt deux ans

de cela. Je garde le ferme espoir qu'il y aura d'autres filles et fils de la grande famille HOUNTONDI de Savalou qui reprendront le flambeau et le porteront très haut.

Je n'oublie pas les copains et collègues béninois qui n'ont apporté à leur manière leur soutien et assistance très précieuse. Je pense particulièrement à : Orou G. GAOUE, Romain L. GLELE, Honoré S. BIAOU, Côme LINSSOUSSI, Enoch ACHIGAN-DAKO, Martine ZANDJANAKOU, Bonaventure DOSSOU-YOVO, Rock S. ADJAGODO. Que tous ceux dont j'aurai oublié de citer les noms, veillent bien accepter ma reconnaissance vivement formulée en *Fongbé* (ma langue maternelle) : « *E na tché nou mi min bi* ».

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à Mme Anne-Françoise DEFOIN et M. Guy de LONGUEVILLE et à toute la grande famille pour leurs encouragements et tous les soins dont j'ai été entouré lors de mon séjour en Belgique. Dieu le leur rendra au centuple.

Enfin, je voudrais témoigner, du fond de mon cœur, toute ma gratitude à mon épouse qui a toujours été à mes côtés et sans qui je ne serais certainement pas arrivé jusqu'ici.

## AVANT-PROPOS

L'évaluation et le suivi de l'évolution des ressources mondiales, ainsi que l'étude des menaces écologiques liées aux changements globaux, sont devenus des thèmes prioritaires pour la communauté scientifique internationale. Dans les régions sèches d'Afrique subsaharienne, un questionnement scientifique existe sur les interactions réciproques entre désertification et changements climatiques. La variabilité du climat dans cette région renvoie plus précisément à l'aléa pluviométrique. Le changement climatique se traduit par une réduction de la pluviométrie qui accélère la dégradation du couvert végétal et l'érosion des sols, déclenchant les mécanismes de désertification. La sécheresse sévère et généralisée qui a touché l'Afrique de l'Ouest au cours des années quatre-vingts représente le plus fort signal climatique observé sur terre depuis que des mesures météorologiques sont disponibles (Goutorbe *et al.*, 1997). L'explication de ce phénomène reste encore à fournir. La difficulté à trouver une réponse convaincante au mécanisme de dégradation environnementale provient du fait que nos connaissances sur les processus de dégradation des terres et sur les mécanismes des changements climatiques sont encore bien incomplètes. Ces lacunes ont d'ailleurs été mises à jour dans le quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC/IPCC, 2007). En outre, les conclusions du Groupe 1 du panel d'experts du GIEC soulignent qu'à ce jour, les modèles de prévisions de l'évolution climatique ne présentent aucune tendance cohérente sur l'Afrique de l'Ouest. Cette partie du continent est d'ailleurs laissée vide sur les cartes de prévision des tendances futures, ce qui rend difficile les planifications à long terme.

La sous-région ouest-africaine fait partie des régions où les populations et les écosystèmes sont les plus vulnérables aux aléas climatiques. L'accroissement rapide des besoins en terres du fait de la croissance démographique rapide et de l'urbanisation spontanée augmente la pression sur les ressources naturelles et provoque leur dégradation. Ce phénomène est indexé au sein du paradigme environnementaliste comme étant l'un des fléaux écologiques majeurs auquel la Terre est confrontée (Rossi, 1999). Les constats ci-dessus énumérés suggèrent que la dégradation environnementale en Afrique subsaharienne constitue un phénomène géographique dont les traductions spatiales sont fonction du contexte politique et de la nature des rapports entre les groupes sociaux et les ressources exploitées. De plus, même si la dégradation du milieu est un fait indéniable, elle reste difficile à cerner avec précision, comme en témoignent les résultats parfois contradictoires des évaluations des pertes en superficies forestières (Ozer, 2004). Cette situation souligne d'une part, les difficultés à la fois techniques et économiques à mettre en œuvre un suivi véritable de l'évolution spatiotemporelle de la dégradation environnementale à petite échelle en milieu tropical. Et d'autre part, ces lacunes alimentent d'avantage le débat autour de la gravité des processus de désertification en Afrique de l'Ouest (Lepers *et al.*, 2005; Ozer *et al.*, 2007). Comment et avec quels outils évaluer de manière objective et fiable l'extension du phénomène de dégradation des ressources végétales?

Pour aborder cette préoccupation, la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement tenue à Stockholm en 1972, a suggéré l'utilisation de la télédétection comme outil de « suivi global direct ». L'acquisition d'images par les satellites d'observation de la Terre depuis le début des années soixante-dix a amené la communauté internationale à percevoir la télédétection comme une source d'informations renouvelables permettant d'évaluer régulièrement les atteintes aux écosystèmes naturels, parallèlement aux inventaires forestiers effectués par les pays membres de l'Organisation des Nations Unies sur l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). Suite à cette conférence, plusieurs projets de cartographie ont été initiés sous l'impulsion d'organismes de coopération et d'appui au développement (FAO, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Union

Européenne, etc). Privilégiant une approche régionale, ces projets ont largement eu recours à l'imagerie satellitaire fournie par les capteurs optiques américains (LANDSAT), puis français (SPOT), pour des évaluations à une échelle de l'ordre du 1/200000 (Blasco, 1990). Depuis bientôt deux décennies, l'utilisation d'images fournies par les capteurs à large champ et notamment celles du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), permet d'établir des cartes à petite échelle (à partir du 1/500 000) montrant, à une date donnée, l'état global du couvert végétal dans une région ou sur un continent (Malingreau *et al.*, 1989; Laporte *et al.*, 1995; Lambin & Ehrlich, 1997; Laporte *et al.*, 1998; TREES, 1998). A ce niveau d'observation, ce sont surtout les zones de déforestation de grande ampleur («*deforestation hot spot*») qui sont cartographiées, parfois sans précision sur la nature du couvert qui se substitue à la forêt. Toujours est-il que la caractérisation de la dégradation du couvert végétal, ainsi que les mécanismes qui la soustendent et expliquent son évolution spatio-temporelle, ont été très peu explorés.

La principale préoccupation qui est à la base de cette thèse est à la fois thématique et méthodologique. Sur le plan thématique, il s'agit de contribuer à une meilleure compréhension de l'évolution du phénomène de désertification dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches en Afrique de l'Ouest, en évaluant l'impact des modifications pluviométriques et des actions anthropiques observées ces dernières décennies sur l'évolution des ressources végétales de la sous-région. Cette recherche, initialement consacrée exclusivement aux zones sahéliennes, a été ensuite élargie à la zone soudanienne au Nord du Bénin. Cet élargissement a permis d'aborder les différenciations écologiques et spatiales des modes d'évolution (progressive ou régressive) du couvert végétal dans un même ensemble géographique. Sur le plan méthodologique, l'objectif du travail est d'élaborer une démarche contextuelle de surveillance des ressources végétales basée sur l'utilisation de la télédétection considérée comme moyen d'observation continue de l'environnement à différentes échelles. Ces deux objectifs nous ont conduit à situer les outils d'observation de la Terre au coeur de cette recherche. Cependant, l'objet de cette étude n'est pas la télédétection, car le problème à résoudre n'est pas de développer de nouveaux algorithmes ou de nouvelles techniques d'enregistrement et d'interprétation du signal.

Le but de cette étude est de rechercher dans la gamme des données aérospatiales disponibles celles dont l'interprétation et le traitement permettent un suivi de façon pertinente et à moindre coût de l'évolution de la dégradation du couvert végétal et du phénomène de désertification, dans cette zone qui regroupe plusieurs pays figurant parmi les plus pauvres de la planète. Une telle étude implique néanmoins une analyse prospective et critique des potentialités et limites des données fournies par les systèmes d'observation spatiale. Bien que le travail porte sur les zones arides, semi-arides et subhumides sèches de l'Afrique de l'Ouest, le souci d'application des acquis méthodologiques aux autres régions tropicales sèches est au centre de notre recherche. Il sous-tend aussi la stratégie de suivi proposée, car les problèmes inhérents aux pressions croissantes de l'Homme sur les ressources végétales et la transformation rapide des milieux sont communs à l'ensemble de la zone tropicale.

A la question de savoir s'il est possible de suivre par télédétection la dégradation du couvert végétal et la progression de la désertification en Afrique de l'Ouest, nous faisons l'hypothèse du oui, car ces phénomènes laissent des traces détectables par les satellites d'observation de la Terre. Toutefois, avant l'identification et la caractérisation de ces empreintes spatiales sur les images, une sélection objective des paramètres indicateurs des états de surface ainsi qu'une description des conditions biophysiques au sol s'avèrent indispensables. Il ne s'agit pas pour nous de s'en tenir à une description de terrain par respect de la démarche classique de l'écologue ou du forestier, mais plutôt de détecter, suivre et expliquer l'évolution ou les mutations qui s'opèrent au niveau des biomes étudiés, puis de procéder à leur cartographie



afin de faciliter la prise en compte des tendances actuelles pour les projections futures. De la sorte, nous intégrons la télédétection dans le raisonnement et la démarche de l'environnementaliste.

Pour évaluer la faisabilité et l'efficacité de ce suivi, nous avons exploité diverses données archives d'images satellitaires pour décrire l'évolution du couvert végétal et l'emprise spatiale du phénomène de désertification sur la période allant du début des années 1980 au début des années 2000. Les données satellitaires ont été complétées, au besoin, par diverses sources de données climatiques, des informations issues d'enquêtes de terrain agricoles, des données démographiques, qui, dans leur ensemble, ont pour but de renseigner sur les facteurs qui sont à la base des changements notés. La finalité étant de mettre en évidence les forces directrices des dynamiques détectées sur l'évolution du couvert végétal au cours de la période étudiée et d'en tenir compte dans les projections relatives à l'avenir de ces ressources à court et moyen terme. L'envergure spatiale de l'étude nous a conduit d'emblée à retenir trois niveaux d'analyse correspondant à des entités écoclimatiques, structurées en échelles géographiques suivant une hiérarchie descendante. Ainsi :

- A l'échelle régionale, le domaine écoclimatique sahélien a été retenu pour avoir une vision d'ensemble de la dynamique environnementale dans ce contexte particulier et détecter les modifications qui affectent le couvert végétal. Les images à basse résolution (Pathfinder) du capteur NOAA-AVHRR couvrant partiellement cinq pays de la sous-région ouest-africaine (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina-Faso, Niger) ont servi de support à ce niveau d'analyse.
- Au niveau national, un cas d'étude focalisé sur la zone sahélo-soudanienne a été examiné au Burkina-Faso, la situation géographique de ce pays lui conférant une position charnière entre la zone sahélienne au Nord et la zone soudanienne au Sud.
- Au niveau local, l'aire du domaine bioclimatique soudanien dans le Nord du Bénin a fait l'objet de travaux plus approfondis.

Nous avons donc adopté une approche multi-échelle, car la variabilité des échelles spatiales auxquelles la dégradation des ressources végétales se déroule en suivant les conditions éco-climatiques pourrait être mise en rapport avec diverses résolutions spatiales proposées par les capteurs qui fournissent les images. Ceci souligne la nécessité d'utiliser des images de natures variées pour le suivi de l'environnement en milieu tropical où la forte nébulosité limite fréquemment la qualité des acquisitions (SPOT, LANDSAT, AVHRR, etc.). En passant d'un niveau d'analyse à un autre, nous mettons en évidence les apports et/ou les pertes respectives dans l'interprétation thématique et la quantification / cartographie des zones dégradées.

Parallèlement aux niveaux d'analyse retenus, la démarche méthodologique mise en oeuvre se décline en trois étapes principales :

- La première étape a pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes qui régissent la dynamique du couvert végétal, d'identifier, d'apprécier et de quantifier les modifications du couvert végétal sous l'effet de perturbations naturelles et /ou humaines. A cet effet, nous nous sommes basé principalement sur l'exploitation des données à basse résolution Pathfinder du capteur AVHRR de NOAA et des observations climatiques relevées au niveau d'un réseau de 315 stations pluviométriques couvrant toute la bande sahélienne. Le principal indicateur de suivi de l'état du couvert végétal et de l'évolution l'environnement pris en compte au cours de la période analysée est « l'efficacité d'utilisation des précipitations » connu sous l'acronyme anglais « Rain Use Efficiency » (RUE). Les variations interannuelles de l'indice de végétation intégré pendant la période de végétation active et les tendances du RUE ont servi de base à l'appréciation de la dynamique de la fraction

photosynthétiquement active du couvert végétal et à l'identification des zones souffrant du processus de désertification.

- La deuxième étape a consisté à reproduire la démarche d'investigation similaire à la précédente dans la zone écoclimatique sahélo-soudanienne. Le but visé ici est de tester la validité de l'approche de détection des modifications du couvert végétal dans un contexte d'aridité moins prononcé que dans la zone sahélienne.
- La dernière étape a été axée sur la caractérisation de l'état du couvert ligneux dans la zone soudanienne. Dans un premier temps, nous avons appliqué les techniques d'analyses statistiques multivariées aux données d'inventaires phytoécologiques effectuées dans trois secteurs éco-climatiques du domaine soudanien afin d'apprécier leur vulnérabilité aux différentes perturbations d'origine anthropique. Ensuite, nous avons appliqué aux images à haute résolution du capteur SPOT XS, les techniques de détection des changements afin de mettre en évidence les dynamiques d'occupation du sol dans une zone considérée comme représentative de l'aire d'étude. Ici, nous recherchons les facteurs explicatifs des changements observés en exploitant à la fois les données spatiales, les inventaires forestiers et des données socio-économiques.

L'organisation d'ensemble de cette thèse obéit à la logique qui a présidé à la conception et à la conduite de l'étude telle que nous venons de l'exposer. Nous avons opté pour une structuration en « parties », dans le souci de garder une cohérence et un équilibre au regard du double objectif thématique et méthodologique qui sous-tend notre recherche et guide la restitution des résultats. Par souci de clarté dans la présentation du travail, nous avons adopté une articulation simple en chapitres. De même, pour les besoins d'application, les spécificités géographiques et le contexte socio-économique de chaque zone d'intérêt sont rappelés chaque fois qu'ils s'avèrent indispensables à la compréhension des choix méthodologiques et des développements thématiques. Pour finir, une conclusion générale et des recommandations ont été formulées. Cette dernière section tire parti des principaux résultats obtenus dans les différentes phases de nos travaux.

En définitive, la présente thèse a été construite autour de six principaux chapitres regroupés comme suit :

- (i) La première partie (Chapitre 1) principalement basée sur une revue bibliographique, présente le contexte général de la zone d'étude. Nous exposons ensuite la problématique de notre recherche puis, les objectifs spécifiques visés à travers notre étude sont précisés.
- (ii) La deuxième partie du document (Chapitre 2 et Chapitre 3) présente les principaux résultats issus de l'exploitation des données satellitaires à basse résolution en zones sahélienne et sahélo-soudanienne en Afrique de l'Ouest. Cette partie a été élaborée à partir d'une compilation d'articles publiés dans des revues scientifiques anglophones.
- (iii) La troisième partie (Chapitre 4 et Chapitre 5) se focalise sur des études de cas plus approfondies dans le domaine soudanien au Nord du Bénin. Les résultats présentés sont issus de l'exploitation des données d'inventaires forestiers et de l'exploitation d'images satellitaires à haute résolution pour l'analyse de l'évolution du couvert végétal dans des zones cibles.
- (iv) Dans la quatrième partie du manuscrit (Chapitre 6), nous engageons d'abord une discussion générale de nos résultats. Nous tirons ensuite les principales conclusions qui se dégagent de nos travaux et pour finir, nous ouvrons des perspectives et pistes de réflexions pour des travaux de recherche ultérieurs.

## RESUME

Afin de mieux comprendre les processus de désertification après les sécheresses des années 1980, la dynamique et les modifications de la fraction photosynthétiquement active du couvert végétal ont été évaluées au sein de trois entités écoclimatiques semi-arides de la région ouest-africaine. L'étude focalise sur six pays (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina-Faso, Niger et Bénin), qui reflètent assez bien le contexte environnemental et humain des régions semi-arides. L'objectif principal de cette thèse est de vérifier dans ce contexte biophysique et humain, si l'état du couvert végétal présente une amélioration consécutive à des conditions pluviométriques plus favorables, ou si, au contraire, la longue altération environnementale de ces dernières décennies a une bonne dose d'irréversibilité à l'échelle de plusieurs années. La démarche d'investigation procède en trois étapes définies par des échelles géographiques et un gradient géoclimatique.

À l'échelle régionale, l'analyse conjointe des séries annuelles de précipitations et de production primaire estimée à partir d'indices de végétation normalisés fournis par le capteur Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) a permis d'appréhender la dynamique du couvert végétal au sein de la zone délimitée par les isohyètes 100 mm et 900 mm dans cinq pays sahéliens (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina-Faso, Niger). L'évolution à moyen terme (1982-1999) du couvert végétal dans la zone sahélienne a été étudiée à partir d'un réseau de 315 stations grâce à l'analyse de tendances des valeurs annuelles du rapport de l'indice de végétation normalisé intégré (iNDVI) de juin – octobre par rapport aux précipitations (RR) pendant la période de végétation active (mai – octobre). Ce ratio (iNDVI/RR) qui, du point de vue écologique traduit l'efficacité de l'utilisation des précipitations (Rain Use Efficiency) par la végétation est reconnu comme un indicateur permettant de détecter le processus de désertification. Nos résultats suggèrent dans l'ensemble, une hausse sensible de la production primaire en réponse à l'augmentation significative des précipitations après la période de sécheresse. *A contrario*, l'analyse des tendances du ratio iNDVI/RR révèle que 54% des stations étudiées montrent une stabilité. Cependant, 31,4% des stations ont subi un déclin prononcé à très prononcé du ratio iNDVI/RR; 13,3% des localités connaissent un déclin modéré de l'efficacité de l'utilisation des précipitations par la végétation, alors que seulement 1,3% des stations exhibent une tendance positive au cours de la période analysée.

À l'échelle nationale, des tendances similaires aux précédentes ont été observées au Burkina Faso, sur 128 stations localisées entre les isohyètes 500 mm et 1100 mm. Ainsi, plus de la moitié des stations étudiées montrent une stabilité du ratio iNDVI/RR. Cependant, 39,8% d'entre elles montrent une tendance négative allant de faible à très forte alors que seulement 2,4% d'entre elles montrent une faible tendance positive. Par ailleurs, une comparaison avec des études locales plus détaillées a permis de confirmer les tendances observées. Toutefois, les résultats obtenus pour les localités plus humides devraient être considérés avec prudence, eu égard à la faible corrélation entre iNDVI et précipitations pour une pluviosité annuelle supérieure à 1000 mm. Il ressort des travaux que les tendances négatives notées mettent en évidence une diminution progressive de la productivité végétale. Cette situation indique une dégradation environnementale continue et montre que les processus de désertification se sont probablement perpétués au cours des deux dernières décennies sur 44,7% des localités étudiées dans les bandes sahélienne et sahélo-soudanienne.

À l'échelle locale, une caractérisation écologique des différents faciès ligneux au sein de trois secteurs climatiques de la zone soudanienne (900 mm - 1200 mm) au nord du Bénin a permis d'apprécier leur niveau de dégradation. Les inventaires effectués ont pris en compte des paramètres structuraux (surface terrière, densité), la diversité spécifique des peuplements et divers types et intensités des perturbations. Les analyses multivariées effectuées révèlent l'existence d'un gradient de productivité qui se traduit par une diversité des peuplements boisés du secteur sud-soudanien, alors que les secteurs nord-soudanien et soudano-sahélien sont surtout marqués par des formations savanicoles et arbustives moins productives. Au gradient de productivité s'oppose un gradient de perturbation suggérant une dégradation plus prononcée des formations ligneuses respectives des secteurs soudano-sahélien et nord-soudanien comparativement à celles du secteur sud-soudanien. Par ailleurs, la composante spatiale des mutations observables sur le couvert végétal a été cartographiée dans un secteur restreint de la zone sud-soudanienne à partir d'images SPOT-XS. Il ressort qu'au cours des deux dernières

décennies, 46,4% de la surface de la zone ont subi des dégradations plus ou moins prononcées. Plus précisément, 19,6% autrefois constitués de formations ligneuses denses ont complètement disparu; 12,9% du secteur sont touchés par le déboisement, tandis que 13,9% de cette superficie sont constitués de formations ligneuses dégradées. À l'opposé de cette tendance, 21,8% de l'aire d'étude sont stables, tandis que moins du tiers (31,8%) de cette aire connaît une amélioration allant du boisement modéré à une reconstitution forestière (reboisement). Aussi note-t-on une disparité dans les taux d'évolution des unités d'occupation du sol; les variations étant plus marquées pour les classes à couverture ligneuse dense et les zones à emprise agricole que pour les zones habitées. La dégradation du couvert ligneux s'explique ici surtout par des facteurs anthropiques (agriculture extensive, exploitation de bois, élevage,...). Cette zone est en effet une destination préférentielle pour les migrants agricoles fuyant les conditions climatiques aléatoires des zones semis arides sèches.

Dans l'ensemble, nos résultats mettent en évidence le déclin rapide des ressources végétales, remettant en cause les affirmations relatives à une situation contrastée de l'évolution des processus de désertification au-delà des zones arides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. L'approche développée est facilement reproductible et permet la mise en œuvre fiable d'un diagnostic sur l'état du couvert végétal à partir de données accessibles et peu coûteuses. Par sa mise en œuvre, elle devrait faciliter l'élaboration de cadres techniques pour une meilleure assistance aux populations démunies, particulièrement vulnérables à la dégradation progressive de leur milieu.

## SUMMARY

In order to understand the dynamics of desertification after the 1980s droughts, the trends and changes of photosynthetically active fraction of the vegetation cover of the semi-arid region of West Africa have been analyzed across three ecoclimatic entities. This study focuses on six countries (Senegal, Mauritania, Mali, Burkina-Faso, Niger and Benin) that reflect quite well the human and environmental context of semi-arid regions. The main objective of this thesis is to check in the before-mentioned biophysical and human context, if the state of the vegetation improves because of more favourable rainfall conditions, or if, conversely, the long environmental deterioration during recent decades has a healthy dose of irreversibility for several years. The process of investigation proceeds in three stages defined by geographical scales and a geoclimatic gradient.

At the regional level, we compared vegetation productivity data from 1982-1999 time series of NOAA-AVHRR NDVI data to rainfall data. We analyzed data from 315 rain gauges distributed across five countries (Senegal, Mauritania, Mali, Burkina-Faso and Niger) with annual average isohyets ranging from 100 to 900 mm. For trends analysis, we used the ratio of the “integrated vegetation index (iNDVI) during the crop-growth period (June to October)” to the “May to October sum of rainfall (RR)”. This ratio (iNDVI/RR), a proxy of the *Rain Use Efficiency*, is widely used by ecologists as an indicator for detecting desertification processes. Overall, our results show a significant increase of the net primary production as a response of post-drought rainfall increase. However, the trends of iNDVI/RR ratio suggest that most of the studied stations (54%) in sahelian and sahelo-sudanese belts were stable and 31.4% showed strong to very strong negative change in iNDVI/RR ratio, while 13.3% of the stations showed a moderate decrease and only 1.3% showed a positive trend.

At the country level, similar trends were recorded throughout 128 stations in Burkina Faso located between the 500 mm and 1100 mm isohyets. In fact, more than half the studied stations showed a stability of iNDVI/RR ratio. However, 39.8% of them show a negative trend from low to high, while only 2.4% of them show a slight positive trend. In addition, a comparison with more detailed local case studies confirmed these observed trends. However, the obtained results for wetter stations in the southern part of the country should be taken with precaution, as the relationship between NDVI and rainfall tends to weaken when annual rainfall is higher than 1000 mm. Overall, the negative trends highlight a gradual decline in plant productivity. These results recorded in 44.7% of the analyzed stations may reflect ongoing desertification processes in the sahelian and sahelo-sudanian zones over the past two decades.

At the local level, a structural characterization of woody units in three bioclimatic regions of the sudanian zone (900 mm – 1200 mm) in the north of Benin was conducted to assess their degradation status. We recorded the structural characteristics of stands (basal area, density), species diversity as well as disturbances type and intensity. Multivariate analysis revealed a gradient of productivity between the three regions: there was a high diversity of woody stands in the south-sudanian sector, while the north-sudanian and sudano-sahelian sectors were dominated by savannas and shrub, which had low productivity. The productivity gradient is influenced by a disturbance gradient suggesting that the decline in productivity is stronger from south-sudanian to the sudano-sahelian region. In addition, the spatial component of the observable changes in vegetation cover has been mapped by remote sensing in a restricted area of the sudanian zone in northern Benin with SPOT-XS data over the period 1986-2005. Over the past two decades, 19.6% of the woody stands have completely disappeared; 12.9% of this extinction of woody stands was due to deforestation, and 13.9 % due to degradation processes. In contrast to these trends, 21.8% of the study area were stable, while less than a third (31.7%) of the area were experiencing woody recovery (reforestation). The analysis also reveals significant disparities in the rates of change of the identified land use class units. These variations are more pronounced for the woody units and agricultural land than in villages. These results suggest that land cover degradation throughout the study area is primarily due to anthropogenic factors (livestock and agricultural expansion, logging, breeding...). In fact, this area is a preferred destination for agricultural migrants fleeing the unpredictable climatic conditions of the drier semi-arid areas.

Overall, our results highlight the rapid decline of vegetation resources, challenging assumptions that the impact of ongoing desertification processes is mixed, outside of the arid and semi-arid regions of West Africa. The developed framework is easily reproducible and allows the implementation of a reliable diagnosis on the state of the vegetation cover from accessible and inexpensive data. Its implementation should facilitate the development of managerial techniques for better assistance to the poor, especially vulnerable to the gradual degradation of their environment.

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	I
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	III
<b>RESUME</b> .....	VII
<b>SUMMARY</b> .....	IX
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	XI
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	XIV
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	XV

<b>1<sup>RE</sup> PARTIE CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES &amp; OBJECTIFS DE L'ETUDE</b> .....	1
--	---

<b>CHAPITRE 1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE - PROBLEMATIQUE - OBJECTIFS DE L'ETUDE</b> ...	2
--	---

1.1. CADRE DE LA RECHERCHE .....	2
1.2. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES .....	2
1.2.1. <i>Contexte climatique</i> .....	2
1.2.3. <i>Principaux types de sols</i> .....	6
1.2.4. <i>Types de végétation</i> .....	7
1.2.5. <i>Caractéristiques agroécologiques</i> .....	11
1.3. PROBLEMATIQUE ENVIRONNEMENTALE EN ZONES SAHELIENNE ET SOUDANIENNE .....	14
1.3.1. <i>Variations et crises climatiques</i> .....	14
1.3.2. <i>Croissance démographique et pression foncière</i> .....	15
1.3.3. <i>Contexte socio-économique</i> .....	16
1.3.4. <i>Pression du cheptel</i> .....	17
1.4. EVALUATION DE LA DÉGRADATION DES TERRES ET DE LA DÉSERTIFICATION .....	17
1.4.1. <i>Etendue de la dégradation des terres</i> .....	18
1.4.2. <i>Problématique de la désertification</i> .....	18
1.4.3. <i>Apport de la télédétection</i> .....	21
1.5. OBJECTIFS DE L'ETUDE .....	23

<b>2<sup>E</sup> PARTIE MODIFICATIONS DU COUVERT VEGETAL ET EVALUATION DE LA DESERTIFICATION : CAS D'ETUDES DANS LES ZONES SAHELIENNE ET SAHELO-SOUDANIENNE</b> .....	24
---	----

<b>CHAPITRE 2 ONGOING DESERTIFICATION PROCESSES IN THE SAHELIAN BELT OF WEST AFRICA: ENVIDENCE FROM THE RAIN-USE EFFICIENCY</b> .....	25
---	----

ABSTRACT .....	25
2.1 INTRODUCTION .....	26
2.2 DATA AND METHODS .....	26
2.2.1. <i>Meteorological station data</i> .....	26
2.2.2. <i>Satellite data</i> .....	27
2.2.3. <i>Method</i> .....	29
2.3. RESULTS .....	30
2.3.1. <i>Rainfall</i> .....	30
2.3.2. <i>The seasonal vegetation index (iNDVI)</i> .....	30
2.3.3. <i>The iNDVI/RR ratio</i> .....	31
2.4. CONCLUSION .....	36

<b>CHAPITRE 3 ANALYSIS OF THE VEGETATION TRENDS USING LOW RESOLUTION REMOTE SENSING DATA IN BURKINA FASO (1982-1999) FOR THE MONITORING OF DESERTIFICATION</b> .....	38
--	----

ABSTRACT.....	38
3.1. INTRODUCTION.....	39
3.2. STUDY AREA.....	39
3.3. MATERIALS AND METHODS.....	40
3.3.1. Meteorological station data.....	40
3.3.2. Satellite data.....	41
3.3.3. The ratio of integrated NDVI to rainfall.....	41
3.3.4. Trend analysis.....	42
3.4. RESULTS AND DISCUSSIONS.....	42
3.4.1. Rainfall.....	42
3.4.2. iNDVI.....	43
3.4.3 Rainfall - iNDVI relationship.....	43
3.4.4. iNDVI/RR ratio.....	43
3.5. CONCLUSION.....	49

### **3<sup>E</sup> PARTIE DIAGNOSTIC DE L'ETAT DU COUVERT LIGNEUX ET ANALYSE DE SON EVOLUTION EN ZONE SOUDANIENNE** 50

#### **CHAPITRE 4** DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION DES PEUPELEMENTS LIGNEUX EN ZONE SOUDANIENNE : CAS D'ÉTUDE AU NORD AU BENIN ..... 51

RÉSUMÉ.....	51
4.1. INTRODUCTION.....	52
4.2. OBJECTIFS.....	52
4.3. METHODES.....	52
4.3.1. Région d'étude.....	52
4.3.2. Echantillonnage et relevés.....	53
4.3.3. Traitement des données.....	56
4.4. RESULTATS.....	58
4.4.1 Variabilité de la productivité des formations ligneuses en fonction des zones écogéographiques.....	58
4.4.2 Discrimination des types de formations végétales.....	61
4.4.3 Caractérisation structurale et écologique des types de formations.....	62
4.5. DISCUSSIONS.....	65
4.5.1 Productivité, diversité spécifique et régénération des peuplements ligneux.....	65
4.5.2 Facteurs de dégradation des formations naturelles.....	66
4.5. CONCLUSION.....	71

#### **CHAPITRE 5** DYNAMIQUE DU COUVERT LIGNEUX ET CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DU SOL EN ZONE SOUDANIENNE : CAS D'ETUDE AU NORD DU BENIN..... 73

RESUME.....	73
5.1. INTRODUCTION.....	74
5.2. LE CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE.....	75
5.3. DONNEES ET METHODES.....	77
5.3.1. Données de terrain.....	77
5.3.2. Données satellitaires.....	78
5.3.3. Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol.....	79
5.3.4. Estimation de la productivité des formations végétales à partir des données radiométriques.....	81
5.4. RESULTATS.....	83
5.4.1. Dynamique d'occupation du sol.....	83
5.4.2. Typologie et répartition spatiale des changements intervenus.....	86
5.4.3. Relations entre paramètres mesurés sur les formations végétales et indices radiométriques .....	90
5.5. DISCUSSIONS.....	91
5.6. CONCLUSION.....	93



<b>4<sup>E</sup> PARTIE DISCUSSIONS GENERALES– CONCLUSIONS - PRESPECTIVES</b> .....	101
<b>CHAPITRE 6 DISCUSSIONS - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>102</b>
6.1. DISCUSSIONS GENERALES .....	102
6.1.1. <i>De la dégradation environnementale à la désertification</i> .....	102
6.1.2. <i>Déterminisme de l'évolution des écosystèmes en Afrique tropicale sèche</i> .....	103
6.1.3. <i>Les zones arides et semi-arides: des biomes en Equilibre ou non-équilibre?</i> .....	104
6.1.4. <i>L'efficacité d'utilisation des précipitations comme indicateur de désertification</i> .....	105
6.1.5. <i>Processus de désertification: les tendances observées aux échelles locale et régionale</i> .	106
6.2. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	108
6.2.1. <i>Approche multi-échelle pour l'étude de l'évolution du couvert végétal</i> .....	108
6.2.2. <i>La dynamique environnementale à l'échelle régionale</i> .....	109
6.2.3. <i>Résilience du couvert végétal suite aux épisodes de sécheresse</i> .....	110
6.2.4. <i>Modifications du couvert végétal, dégradation des terres et désertification</i> .....	111
6.2.5. <i>Du suivi de l'évolution du couvert végétal à l'échelle locale</i> .....	111
6.2.6. <i>Perspectives d'amélioration des indicateurs de désertification à partir des capteurs à large champ optique</i> .....	112
6.2.7. <i>De l'accès aux données pour les études environnementales en Afrique</i> .....	113
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	115
<b>LISTE DES PUBLICATIONS RELATIVES A LA THESE</b> .....	132
<b>CURRICULUM VITAE</b> .....	133

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Localisation géographique de la zone d'étude .....	3
Figure 1.2: Pluviométrie et zones climatiques des régions semi-arides de l'Afrique de l'ouest. ...	5
Figure 1.3: Les types de sols au niveau des pays membres du CILLS .....	8
Figure 1.4: Carte des principales zones agro-écologiques en Afrique subsaharienne. ....	12
Figure 2.1: Geographical position of the 354 studied stations .....	28
Figure 2.2: Average Z-scores (expressed as standard deviations) of rainfall for the 354 stations selected in the Sahel.....	31
Figure 2.3: Average Z-scores (expressed as standard deviations) of iNDVI for the 354 stations selected in the Sahel.....	31
Figure 2.4: Relative change classes in the Rain Use efficiency considering the bioclimatic zones (100-900 mm). ....	32
Figure 2.5: Rain Use efficiency trends considering the bioclimatic zone (100-900 mm) during 1982-1999 periods in the studied area. ....	33
Figure 3.1: Geographical position of the studied stations (black dots) and bioclimatic zones....	40
Figure 3.2: Standardised rainfall deviation from the 21-year mean for 128 stations in Burkina-Faso.....	42
Figure 3.3: Trends in the iNDVI/RR ratio during the growing season (May-October) for 128 stations in Burkina Faso (1982 to 1999). ....	44
Figure 3.4: Annual ratio of integrated NDVI to rainfall during growing season (may to October). ....	46
Figure 3.5: Interannual variability of integrated NDVI and iNDVI/RR ratio as a proxy of Rain Use Efficiency at Bilanga site (Eastern Burkina Faso).....	47
Figure 3.6: Interannual variability of integrated NDVI and iNDVI/RR ratio as a proxy of Rain Use Efficiency at Fada N'gourma site (Eastern Burkina Faso). ....	48
Figure 3.7: Interannual variability of integrated NDVI and iNDVI/RR ratio as a proxy of Rain Use Efficiency at Gorom-gorom site (Northern Burkina Faso).....	48
Figure 4.1: Localisation des sites d'étude au sein des zones climatiques du Nord – Bénin (En couleur, les communes prospectées).....	54
Figure 4.2: Plan factoriel des variables explicatives des différences observées au niveau des formations ligneuses recensées dans les secteurs écogéographiques étudiés .....	60
Figure 4.3: Regroupement des placettes inventoriées par secteur écogéographique dans un plan factoriel discriminant F1 et F2 (analyse globale réalisée sur 181 relevés) .....	60
Figure 4.4: Flux d'approvisionnement en bois-énergie dans la zone d'étude. ....	69
Figure 5.1: Localisation de la zone d'étude.....	76
Figure 5.2: Ecart moyen normalisé des précipitations annuelles à Bembereke (1966 – 2006). ....	77
Figure 5.3 : Relations entre les termes indiquant les changements du couvert forestier dans les régions tropicales .....	80
Figure 5.4 : Carte d'occupation du sol du secteur Nord de Ndali en 1986 et en 2005.....	84
Figure 5.5: Dynamique de l'occupation du sol en 20 ans (1986-2005) dans la zone d'étude....	85
Figure 5.6: Dynamique de changement du couvert végétal dans la zone de calibrage. ....	87

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.1: Définitions clefs de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification.....	20
Table 2.1: Selected stations in West Africa within the 100 to 900 mm isohyets.....	27
Table 3.1: Trend of the iNDVI/RR ratio in Burkina Faso (1982-1999).....	45
Tableau 4.1: Caractéristiques de zones agroécologiques du Nord-est du Bénin.....	53
Tableau 4.2: Relevés effectués par type de formation végétale dans les trois zones étudiées.....	55
Tableau 4.3: Résultats des tests de significativité (p-value) des distances de Fisher calculées entre secteurs écogéographiques.....	58
Tableau 4.4: Significativité du test de Fisher réalisé pour l'estimation des différences entre types de formations végétales.....	61
Tableau 4.5: Matrice de confusion pour l'échantillon d'estimation de la classification des types de formations végétales recensées .....	62
Tableau 4.6: Résultats de la sélection des variables les plus discriminantes .....	62
Tableau 4.7: Caractéristiques structurales et sylvoles des principaux groupements identifiés par secteur écogéographique.....	67
Tableau 5.1: Caractéristiques techniques des images SPOT-XS utilisées. ....	78
Tableau 5.2: Grille de classification et règle de pondération des différentes classes d'occupation du sol .....	80
Tableau 5.3: Typologie des changements intervenus au niveau des unités / classes d'occupation du sol.....	81
Tableau 5.4: Tableau des indices de télédétection retenus .....	82
Tableau 5.5: Classification des pixels en fonction des changements notés dans les unités d'occupation du sol entre 1986 et 2005.....	87
Tableau 5.6: Taux d'évolution des unités d'occupation du sol au sein de la même classe .....	88
Tableau 5.7: Corrélations entre descripteurs du couvert végétal et indices de télédétection .....	90

## **I<sup>e</sup> PARTIE**

### **CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES & OBJECTIFS DE L'ETUDE**

---

*Cette partie basée sur la revue bibliographique vise à présenter la région d'étude dans son contexte environnemental. Après un rappel des caractéristiques biophysiques et socioéconomiques, nous montrons comment la combinaison des différents facteurs mésologiques permettent de comprendre les mécanismes (biotiques et abiotiques) qui influencent la dynamique spatio-temporelle de cet environnement. Nous exposons ensuite la problématique de la dégradation environnementale dans la région d'étude en mettant l'accent sur l'épineux problème de la désertification auquel elle est confrontée. Puis nous soulignons la controverse scientifique dont ce sujet fait l'objet dans la région tout en présentant les objectifs visés par notre étude.*

---

# CHAPITRE 1

## CONTEXTE GEOGRAPHIQUE - PROBLEMATIQUE - OBJECTIFS DE L'ETUDE

---

### 1.1. CADRE DE LA RECHERCHE

La région sahélienne est souvent considérée comme distincte des régions qui l'entourent à plusieurs égards. Mais, pour des raisons qui tiennent autant à son écologie qu'à son passé et aux facteurs socio-économiques actuels, Gorse (1985) suggère qu'il vaut mieux la considérer comme la partie septentrionale d'un ensemble régional plus vaste englobant également la zone soudanienne, plus humide. Sur le plan géographique la région d'intérêt englobe les Etats suivants : le Burkina Faso, la Gambie, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Sénégal et le Tchad. Ces pays sont groupés autour du 14° parallèle et ils sont tous membres du Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS). Bien que les régions septentrionales du Bénin, de la Côte d'Ivoire, du Ghana, du Nigeria, de la République du Cameroun et du Togo fassent aussi partie des zones sahélienne et soudanienne, il n'en est pas explicitement question ici (à l'exception du Bénin) pour des raisons liées non seulement à l'accessibilité des données, mais aussi à la disponibilité de données statistiquement comparables. Néanmoins, le nord du Bénin a été pris en compte par souci d'avoir un continuum géographique, la partie méridionale du pays étant exclue de notre étude, eu égard au fait que son écologie est très différente de celle du reste de la zone. En définitive, l'étude a été essentiellement focalisée sur six pays à savoir : le nord du Bénin, le Burkina Faso, le Mali, la Mauritanie, le Niger et le Sénégal (Fig. 1.1).

### 1.2. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

La majeure partie de l'espace géographique étudié se trouve en climat sahélien, dont la limite septentrionale est marquée par l'isohyète 200 mm (Capot-Rey, 1953 ; Quezel, 1965 ; Le Houérou, 1990) tandis que le reste est localisé dans le domaine soudanien avec comme limite méridionale l'isohyète 1200 mm. Dans cette zone, une continentalité très nette favorise le caractère semi-aride du climat. Il est difficile de trouver une homogénéité climatique lorsque l'on parcourt la sous-région du nord au sud ou d'ouest en est. Selon Pagny (1994), ces différences importantes s'expliquent par le fait que les franges du Sahel sont des zones de contact entre des climats arides (dont les formes extrêmes sont désertiques) et des climats humides (équatoriaux). Ces influences favorisent de nombreuses nuances climatiques locales.

#### 1.2.1. Contexte climatique

La région d'intérêt est caractérisée par un climat aride à semi-aride, à régime de pluviométrie strictement unimodal, contrôlé par la mousson ouest-africaine. Comprises entre 8° et 18° de latitude nord, les bandes soudanienne et sahélienne se situent tout entières entre l'Equateur et le Tropique du Cancer, et bénéficient d'un climat tropical. Les paramètres climatiques font partie des critères qui servent de base pour la délimitation des zones écologiques du Sahel et des régions adjacentes. Les subdivisions fondées sur la pluviosité

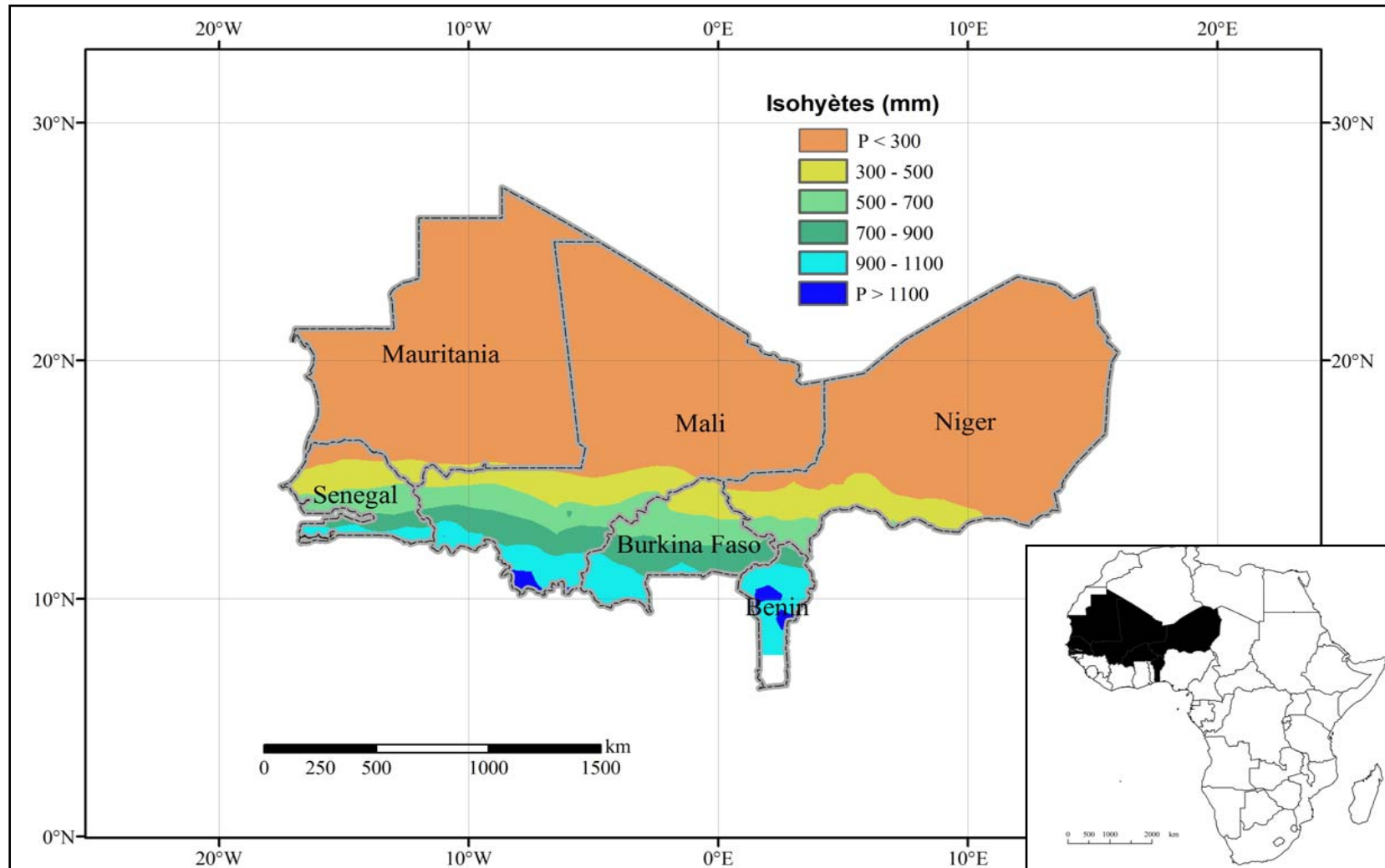


Figure 1.1: Localisation géographique de la zone d'étude

moyenne annuelle sont validées par le fait que l'évapotranspiration potentielle de référence (ETo) est assez homogène, entre 2500 et 3000 mm/an (Le Houérou & Popov, 1981; Le Houérou *et al.*, 1993). Il faut noter que, pour être conventionnelles et indicatives, les limites établies sur les isohyètes moyens ne sont pas arbitraires. En effet, l'isohyète des 600 mm correspond à la limite nord de la distribution de très nombreuses espèces de savanes soudaniennes, telles que le *Butyrospermum paradoxum* (le karité), *Parkia biglobosa* (le néré), *Prosopis africana*, *Bombax costatum*, *Combretum nigricans*, mais aussi des herbacées telles qu'*Andropogon pseudapricus* et *Loudetia togoensis*. D'un autre côté, l'isohyète des 100 mm est la limite sud de l'extension des steppes à herbacées pérennes telles que *Lasiurus scindicus*, *Stipagrostis pungens*, *Cornulaca monacantha*, *Retama raetam*, *Ziziphus lotus* (Le Houérou & Popov, 1981). En outre, lorsque la moyenne des pluies annuelles est inférieure ou égale à 100 mm l'occurrence des années pour lesquelles le volume et la distribution des pluies ne permettent pas à des espèces annuelles de terminer leur cycle devient significative. L'aspect général, l'agriculture et la pluviosité annuelle moyenne des zones sahéliennes et adjacentes de la région se présentent comme suit (figure 1.2):

- ▶ Zone saharo-sahélienne (100-300 mm): végétation arbustive très clairsemée; aucune culture.
- ▶ Zone sahélienne (300-500 mm): on y note prédominance de l'élevage, mais aussi la présence de grandes cultures céréalières, en particulier le mil (entre 300 et 500 mm) et un peu de sorgho et d'arachides; mais la production est incertaine.
- ▶ Zone sahélo-soudanienne (500-700 mm): dans cette zone prédominent des cultures céréalières; plus de sorgho que de mil; la culture d'arachides est très répandue; on note aussi la présence de coton mais à production incertaine; la population animale notamment bovine est encore nombreuse. D'une façon générale, on note dans les zones sahéliennes comme soudano-sahéliennes, une prédominance de variétés de sorgho à court cycle de croissance végétale.
- ▶ Zone soudano-sahélienne (700-900 mm) et soudanienne (900-1200 mm): les activités agricoles y sont multiples et variées; les cultures de rente font concurrence au maïs et à des variétés de sorgho et de millet à long cycle de croissance.

Le régime des températures de l'air est lui aussi déterminé par la position en latitude et par le rayonnement, mais il est aussi influencé par la circulation atmosphérique générale, l'altitude, la proximité de courants marins ou au contraire la continentalité du site (Le Houérou *et al.*, 1993). La circulation atmosphérique générale au Sahel est marquée par le balancement saisonnier de la mousson africaine qui se traduit par le «va et vient» Sud-Nord-Sud de la zone de contact entre la masse d'air intertropicale (chaude et humide) et la masse d'air subtropicale saharienne (chaude et extrêmement sèche) centrée sur le Sahara central.

Le Sahel est probablement la grande zone écologique au monde dont la température moyenne annuelle est la plus élevée (28-30 °C), très voisine de celle du Sahara méridional. Elle est la plus élevée vers l'équateur thermique du 16e parallèle où elle atteint 30 °C (Hiernaux & Le Houérou, 2006). L'évaporation (Eo), l'évapotranspiration potentielle de référence (ETo) et le déficit de saturation de l'air (DS) sont également, d'après Le Houérou & Popov (1981), parmi les plus élevés de la planète (4800 mm/an sur l'évaporomètre de classe A, 2800-3000 mm/an et 24 hPa/an, pour ETo et DS respectivement). La majorité de la surface des zones sahélienne et soudanienne se situe entre deux pôles côtiers et est donc dominée par la polarité SO-NE du régime de « mousson ». Cette continentalité renforce le contraste saisonnier entre une saison de pluies tropicales qui dure de 1 à 4 mois et une longue saison absolument sèche de 8 à 11 mois au cours de laquelle l'humidité relative de l'air en milieu de journée demeure pendant au moins 5 mois (décembre-avril) au-dessous de 10 %, sauf sur une frange littorale atlantique d'environ 50 km de large (côté Ouest).

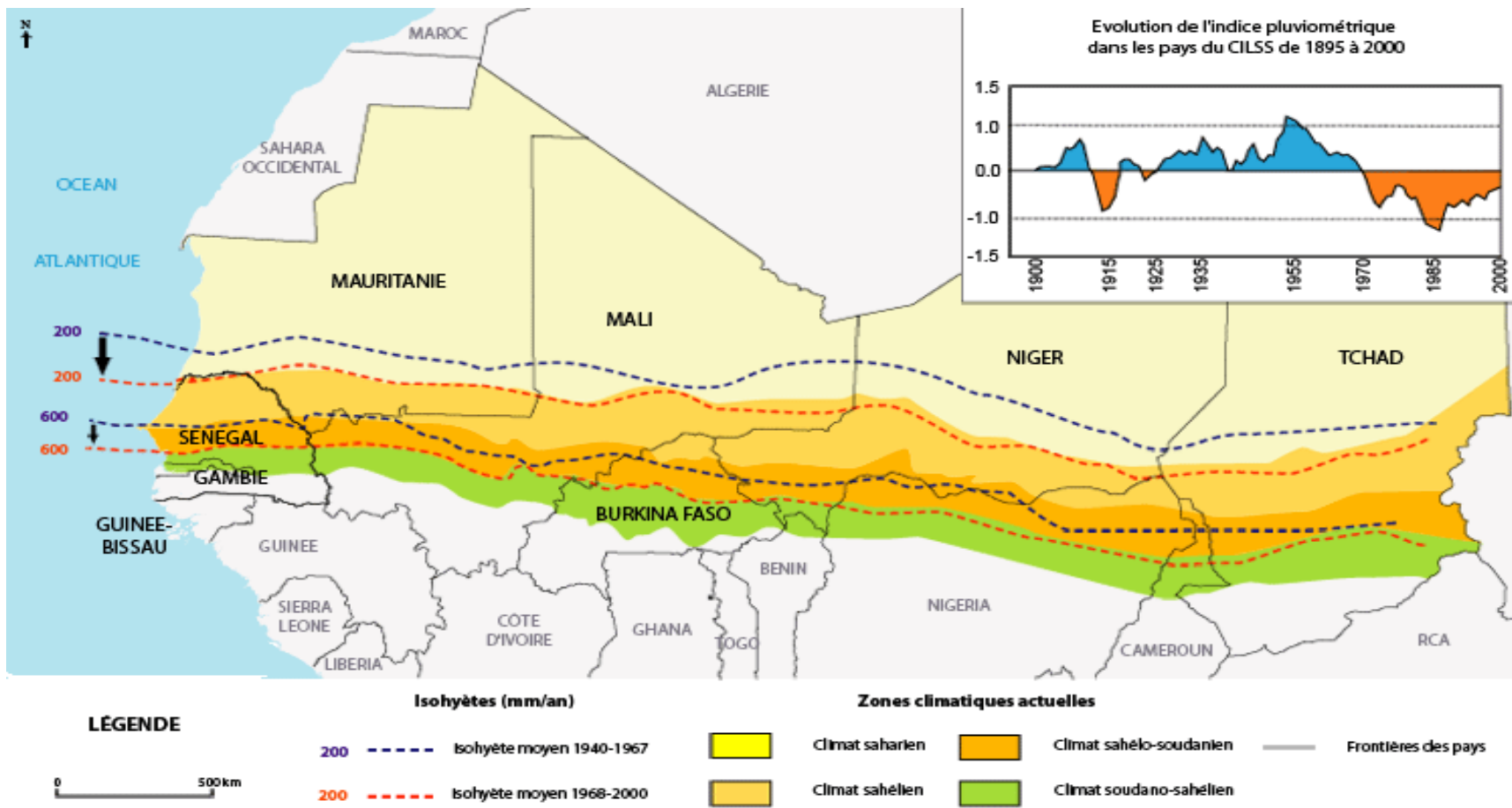


Figure 1.2: Pluviométrie et zones climatiques des régions semi-arides de l'Afrique de l'ouest.

Source : Centre Régional Agrhymet (CRA), CSAO/ OCDE (2005)



L'altitude n'a qu'un impact marginal car le relief du Sahel est peu élevé (Boudet, 1972 ; Wickens, 1976 ; Le Houérou, 1980 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 ; Vetaas, 1993 ; Hiernaux & Le Houérou, 2006).

La variabilité interannuelle des précipitations au Sahel est l'une des plus faibles parmi les zones arides mondiales. Les pluies n'interviennent qu'au cours de l'été boréal, débutant entre mai et juillet pour se terminer entre septembre et octobre avec un maximum en août. La plupart des pluies sahéennes résultent d'orages convectifs isolés ou organisés en lignes de grains qui se développent dans la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) entre les masses d'air équatoriale et tropicale. Cette zone de convergence se déplace et suit avec quelque 8 semaines de retard, le mouvement apparent du soleil : elle se dirige vers le nord au cours du printemps et de l'été boréal, pour rebrousser chemin en automne et en hiver. Ce mouvement de balancier définit l'alternance entre saison des pluies et saison sèche, et la durée du séjour de la ZCIT qui détermine la longueur de la saison des pluies est d'autant plus courte que l'on s'élève en latitude (Sivakumar *et al.*, 1984). De plus, le mouvement de balancier n'est pas parfaitement symétrique, la montée en latitude est plus lente que la descente; ce décalage se traduit par un plus grand étalement de la date du début par rapport à celle de fin de la saison des pluies avec la latitude. La progression de la ZCIT n'est pas non plus régulière : elle est marquée par une progression rapide, qualifiée de « saut de mousson », entre deux positions plus stables de la ZCIT autour des latitudes 5 et 12° N qui intervient normalement autour du 25 juin (Sultan & Janicot, 2000). Enfin, les orages convectifs et lignes de grains se déplacent d'Est vers l'Ouest sous l'effet des puissants « jets » d'Est. De même, l'harmattan (vent alizé sec de saison sèche, souvent poussiéreux) souffle de l'Est ou du Nord-Est. Le gradient pluviométrique moyen annuel Nord-Sud est de 1 mm par km (Le Houérou, 1980). Le gradient climatique étant un continuum, les isohyètes qui le délimitent n'ont qu'une valeur indicative car leurs positions varient largement d'une année à l'autre suivant les fluctuations du système de mousson et des aléas de la distribution des pluies convectives (Aubreville, 1949; Morel, 1992).

### **1.2.3. Principaux types de sols**

La couverture pédologique du Sahel est constituée par une série de grandes dépressions (synclinales) remplies avec des produits d'érosion issus de divers cycles du socle depuis le précambrien. La formation des derniers dépôts au cours du tertiaire a donné naissance au Continental Terminal. Dans certaines zones, existent encore les formations du quaternaire comme l'erg récent. Les fortes variations climatiques au cours de cette période ont marqué l'organisation spatiale du paysage et des sols. Ceci montre, d'après Penning de Vries et Djitèye (1982), la complexité et la variabilité du milieu sahéen. En se fondant sur les études des sols réalisées au niveau régional dont notamment les travaux de Pieri (1989) et surtout ceux de Bertrand (1998), quatre types de milieux pédologiques organisés en unités morpho pédologiques constituent la couverture pédologique de notre zone d'étude. Des régions septentrionales aux régions guinéennes, le relief se traduit par une organisation topographique dominée par l'opposition de deux grandes unités de milieu : de très vastes plateaux à structure interne concentrique et des vallées très peu digitées.

#### **1.2.3.1. Les plateaux cuirassés**

Ces formations sont marquées, dans les régions septentrionales, par la présence de cuirasses (lithosols) qui sont des affleurements de roches inaltérées, localement recouvertes d'un voile sableux peu épais donnant naissance à la végétation dont le faciès typique est désigné sous le

nom de « *brousse tigrée* ». Ce sont des sols minéraux bruts dont le potentiel agricole est très médiocre et qui servent de zones de prélèvement de bois et de maigre pâturage de saison des pluies. Dans les régions plus méridionales, on note, vers le centre des plateaux, l'apparition d'un manteau constitué de matériaux gravillonnaires et de blocs de cuirasse provenant du démantèlement sur place de la cuirasse sous-jacente; cette nappe gravillonnaire s'épaissit et montre de plus en plus une matrice sablo-limoneuse de couleur jaunâtre constituant les sols dits ferrugineux tropicaux lessivés indurés, à potentiel agricole assez élevé. Ces sols, ayant longtemps séjournés sous forêts claires, sont actuellement en grande partie cultivés.

#### 1.2.3.2. Les vallées sèches

Dans la partie méridionale de la zone des neuf pays du CILSS, les larges vallées qui entaillent les plateaux gréseux du Continental terminal présentent souvent des axes d'écoulement interrompus par des accumulations massives sableuses ou sablo-argileuses. D'une manière générale, sols et matériaux ont des teintes rouges ou brun rougeâtre. Ces matériaux colluviaux-alluviaux sont très épais et ont un aspect très homogène. Dans ces matériaux se sont développés les sols rouges très épais, à profil peu différencié, d'aspect massif, sableux en surface et argilo-sableux en profondeur (jusqu'à 35 % d'argile vers 1m). Ce sont les sols ferrallitiques caractérisés par une microstructure très stable qui est à l'origine de leur excellent drainage interne. Terres agricoles par excellence dans ces régions, ces sols ont un pH peu acide et une capacité d'échange faible du fait de la présence surtout d'argile de type kaolinite. Pauvres en phosphore, ils ont une réserve d'eau utile faible mais fortement compensée par une profondeur exploitable par les racines (Figure 1.3)

#### 1.2.4. Types de végétation

L'hétérogénéité du climat a des influences visibles sur la distribution de la flore, dans laquelle sont généralement distinguées les composantes floristiques sahélienne, soudanienne et guinéenne imbriquées. La distribution méridienne des isohyètes détermine l'existence d'aires phytogéographiques. Cette répartition des groupes végétaux en fonction de la gradation pluviométrique sert de base à la zonation climatique. Ces zones présentent une certaine régularité en Afrique de l'Ouest où elles suivent les isohyètes vaguement parallèles au Golfe de Guinée. Les zones sèches de l'Afrique de l'Ouest correspondent, selon White (1983), au Centre Régional d'Endémisme (CRE) du domaine soudanien qui couvre une superficie de 3,7 millions de km<sup>2</sup> et à la zone de transition du Sahel qui s'étend quant à elle sur 2,8 millions de km<sup>2</sup>. La première zone est le domaine privilégié des forêts claires et de leurs faciès de dégradation; la seconde porte très généralement une végétation steppique diversement arborée et plus ou moins épineuse.

##### 1.2.4.1. La végétation soudanienne

- ▶ **Les forêts denses sèches** : ces formations ligneuses sans strate graminéenne n'existent plus que sous la forme de quelques peuplements relictuels, dans des stations protégées des feux et des dégradations d'origine anthropique. Les formations les plus caractéristiques sont au nombre de quatre :

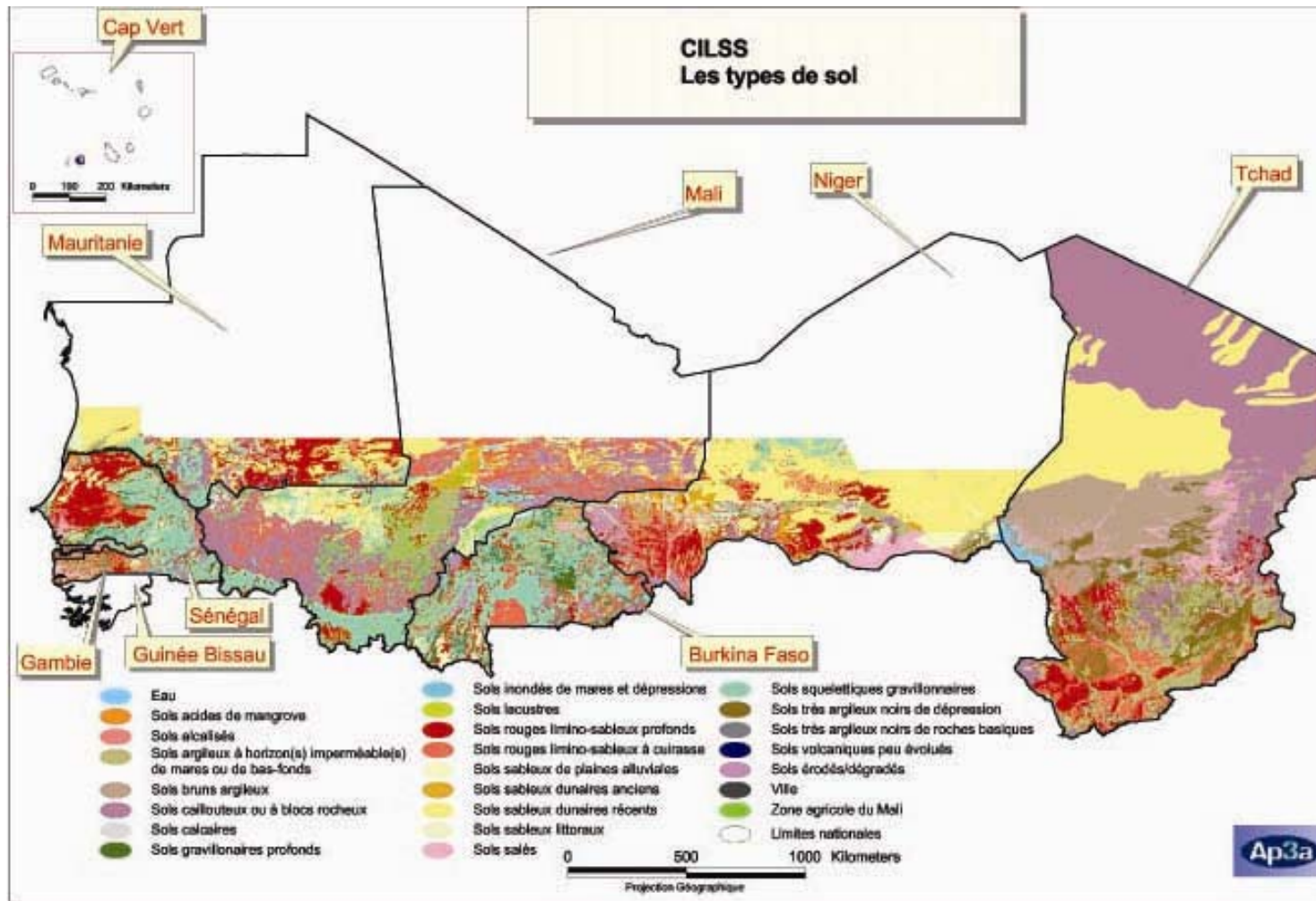


Figure 1.3: Les types de sols au niveau des pays membres du CILSS. Source : Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles, Agrhymet, 2001

- *Les forêts semi-humides*: ce sont des formations de transition entre les forêts denses humides et les forêts claires des régions à longue saison sèche. En Afrique de l'Ouest, ces forêts ont une composition floristique de futaie très simple: *Parinari excelsa*, *Erythrophleum guineense*, *Detarium senegalense* et *Azelia africana*. Les arbres perdent leurs feuilles durant une courte période en saison sèche. Le sous-bois peut être dense, formé d'arbustes pouvant atteindre cinq mètres de hauteur. En fonction des conditions de station et surtout du climat (pluviosité et nombre de mois secs), ces forêts semi-humides présentent des structures et des compositions floristiques différentes. On peut entre autres distinguer les forêts à prédominance d'*Azelia africana* et les forêts à légumineuses dominantes (*Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, etc.).
- *Les forêts à Légumineuses*: ces formations occupaient autrefois des étendues considérables sous le climat soudano-guinéen (Aubréville, 1949). Aujourd'hui, elles ont été transformées en forêts claires ou en savanes boisées, et se présentent souvent en mélange avec la forêt claire à *Isobertinia doka*, qui sera décrite plus loin. Les cinq espèces principales sont des légumineuses, parfois mélangées avec *Anogeissus leiocarpus*, *Tetrapleura schweinfurthii*, *Burkea africana*, *Erythrophleum africanum*, *Prosopis africana* et *Daniellia oliveri*). La plupart des espèces qui constituent cette forêt se retrouvent dans les savanes boisées et les forêts claires.
- *Les forêts à Anogeissus leiocarpus*: cette *Combrétaceae* a une aire exceptionnellement vaste en Afrique boréale, du Sénégal à l'Erythrée. Son amplitude écologique est remarquable. Elle va des lisières de la forêt dense humide aux zones semi-arides. Au Sahel, cette espèce se cantonne aux sols humides (mares et cours d'eau temporaires), mais dans les régions les moins sèches, *Anogeissus* forme des forêts où il domine en mélange avec *Isobertinia* ou avec les *Légumineuses* déjà citées. Ce sont des forêts denses dont le sous-bois arbustif est épais. La zone optimale pour ces formations correspond aux caractéristiques les plus humides du domaine soudanien (pluviosité culminant aux environs de 1400 mm/an). Ces forêts à *Anogeissus*, vulnérables aux feux, ont été en grande partie détruites ou dégradées.
- *Les formations relictuelles*: de nombreux petits peuplements denses subsistent encore, constitués en grande partie d'une seule espèce. On peut citer:
  - les forêts à *Gilletiodendron glandulosum* que l'on trouve encore dans les ravins du Plateau Mandingue, près de Kita (Mali);
  - les forêts à *Guibourtia copallifera* qui existent de façon disséminée depuis le Sénégal jusqu'au Cameroun. Ces forêts sont généralement liées à l'existence de plateaux gréseux (plateau Mandingue, plateau de Bamenda, massifs gréseux de Haute Guinée, etc.);
  - la forêt à *Khaya senegalensis* et *Cola cordifolia* de Casamance, riche en légumineuses, qui a été largement ravagée par les feux et les défrichements. D'après Vanden Berghen (1999), elle ne forme plus que des peuplements relictuels dans le massif des Kalounayes, généralement inférieurs à deux hectares. Une forêt similaire a aussi été décrite par Adam (1968) au Sénégal.
- ▶ **Les forêts galeries et les franges ripicoles** : ce sont des extensions de la forêt dense humide guinéenne en bioclimat plus sec. Elles suivent la plupart des cours d'eau relativement importants, formant ainsi des bandes étroites de forêts denses au milieu des forêts claires et des savanes. On peut distinguer deux grands types, en fonction de la taille du réseau hydrographique qu'elles frangent:
  - les galeries forestières des fleuves (Niger, Bani, Sénégal), caractérisées par *Cynometra vogelii*, *Garcinia livingstonei*, sont de hauteur moyenne, le plus souvent inférieure à 12 mètres; bon nombre de végétaux qui les composent sont adaptés à l'inondation;

- les galeries forestières des marigots, caractérisées par *Berlinia grandiflora*, *Vernonia colorata*, *Cola laurifolia* sont généralement plus hautes, pouvant atteindre 20-25 mètres et ne sont que très rarement inondées;
  - les galeries ou les cordons ripicoles qui colonisent les berges des marigots dans la partie nord du Centre Régional d'Endémisme soudanien sont caractérisés par des espèces qui ne sont pas réellement des ripicoles, mais des espèces de savane ou de forêt claire qui "migrent" vers le lit mineur au fur et à mesure que baisse la pluviosité: *Bombax costatum*, *Daniellia oliveri*, *Diospyros mespiliformis*, *Lannea microcarpa*, etc.
- **La forêt claire** : elle concerne les nombreux peuplements qui présentent une ouverture du couvert plus ou moins importante en fonction de l'impact humain. Les différents stades d'ouverture ou de dégradation sont floristiquement semblables et constitués d'un cortège relativement modeste d'espèces composant la futaie telles que: *Detarium senegalense*, *Daniellia oliveri*, *Dialium guineense*, *Azelia africana*, *Pterocarpus erinaceus*, *Isobertinia doka* et *Khaya senegalensis*. La forêt claire regroupe donc un certain nombre de profils de végétation qui vont de la forêt presque totalement fermée avec un mince tapis graminéen jusqu'à la savane arborée ou arbustive et qui, par la pratique ancestrale des feux, ont été floristiquement réduits à un cortège restreint d'espèces présentant divers degrés de résistance au feu : on parle d'espèces pyrorésilientes. Ce phénomène d'adaptation/sélection est d'autant plus frappant qu'en cas de protection temporaire ou permanente de zones dégradées, la végétation se réinstalle avec une vigueur surprenante pour tendre à reconstituer une forêt claire, dite "climacique" fermée. Dans les zones non dégradées, ces formations colonisent à peu près tous les types de sol, à l'exception des zones inondables et des cuirasses et rochers affleurants. Malheureusement les formes intactes sont de plus en plus rares et le plus souvent, on ne trouve à la place de ces forêts claires, qu'un paysage de savane très ouverte comportant ici et là des îlots relictuels plus denses. Les plus belles de ces formations à *Isobertinia doka* se rencontrent pour la plupart en Haute Guinée dans des zones très peu peuplées et à forte endémie d'onchocercose (Le Houérou, 1989). On trouve aussi quelques beaux peuplements dans le nord de la Côte d'Ivoire (région d'Odienné, Korhogo), prolongés par des formations moins riches en *I. doka* au Ghana. Des peuplements très étendus existent dans le nord du Nigeria et sont le prolongement de ceux, plus limités, du Moyen Togo et du Bénin.
- **Les forêts claires indifférenciées** : au nord de l'isohyète 900 mm, *Isobertinia doka* n'existe pas ou n'existe plus. Les quelques forêts claires qui subsistent dans ces zones ne possèdent pas d'espèces véritablement caractéristiques, d'où leur qualificatif "indifférenciées". Ces zones, au nord de la forêt claire à *I. doka*, sont peuplées souvent densément et cultivées de longue date. Il n'y existe donc que de faibles superficies de véritables forêts claires. Schématiquement, on peut très grossièrement distinguer:
- la forêt claire à légumineuses souvent dominée par *Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri*. La hauteur dominante varie entre 15 et 20 mètres et le degré de couvert ligneux dépasse 80% dans les formes les mieux développées;
  - les forêts claires à Combretacées - Légumineuses qui devaient constituer la végétation climacique des zones situées entre les isohyètes 900 et 600 mm. Parmi les espèces les plus fréquentes, on trouve souvent: *Acacia sieberiana*, *A. polyacantha*, *Anogeissus leiocarpus*, *Combretum nigricans*, *C. glutinosum*, *Terminalia spp.* La végétation dépasse rarement 10-12 mètres. Les quelques émergents appartiennent souvent aux espèces suivantes: *Bombax costatum*, *Pterocarpus erinaceus*, *Anogeissus leiocarpus*, *Diospyros mespiliformis*.

- ▶ Les savanes arborées ou boisées : ces formations issues de la dégradation des forêts claires et, bien souvent, maintenues en l'état par les feux de brousse, sont de très loin les formations végétales les plus fréquentes de l'ensemble du Centre Régional d'Endémisme soudanien. Elles sont caractérisées par une strate continue de graminées héliophiles de la tribu des Andropogoneae (*Andropogon chinensis*, *A. gayanus*, *Schizachyrium sanguineum*, *Diheteropogon amplexans*), surcimée par une strate ligneuse ouverte. Leur couvert, dépassant rarement les 15%, est constitué des espèces les plus tolérantes de la forêt claire comme *Burkea africana*, *Combretum spp.*, *Terminalia spp.*, *Pterocarpus erinaceus*, *Bombax costatum*, *Daniellia oliveri*, etc.

#### 1.2.4.2. La végétation sahélienne

- ▶ Les franges ripicoles sud-sahéliennes : les bords des mares et les berges des cours d'eau à écoulement temporaire sont très généralement colonisés par *Mitragyna inermis*, accompagné par *Acacia nilotica* et *A. seyal*.
- ▶ Les steppes et les savanes arbustives : c'est le type de végétation le plus largement répandu sur les sols sablonneux. Il se caractérise par l'existence d'une strate arbustive ou arborée très ouverte, souvent épineuse, surcimant un tapis herbacé discontinu à base de graminées annuelles (*Cenchrus biflorus*, *Aristida spp.*, *Schoenefeldia gracilis*, *Eragrostis tremula*, etc.). Les ligneux les plus fréquents sont:
  - pour la zone méridionale (précipitations > 250 - 300 mm): *Acacia senegal*, *A. laeta*, *Calotropis procera*, *Pterocarpus lucens*, *Combretum glutinosum*, *Sclerocarya birrea*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Commiphora africana* pour les milieux à dominance sableuse et *Acacia seyal*, *A. nilotica*, *Anogeissus leiocarpus*, *Ziziphus mauritania* pour les zones plus limoneuses ou argileuses;
  - pour la partie septentrionale (précipitations < 250 - 300 mm): on retrouve sensiblement les mêmes espèces accompagnées par *Acacia tortilis*, *A. erhenbergiana* et *Leptadenia pyrotechnica*.

#### 1.2.5. Caractéristiques agroécologiques

La figure 1.4 donne un aperçu à petite échelle des six principales zones agroécologiques de l'Afrique subsaharienne dont les principales caractéristiques sont détaillées comme indiqué ci-dessous. Dans cette région, la zone de savane soudanienne est généralement considérée comme semi-aride humide et la zone sahélienne comme semi-aride sèche. Au niveau de ces deux zones, la disponibilité en eau tend à être le facteur critique qui détermine les systèmes de production (culture et / ou élevage) qui conviennent ; en outre, la disponibilité en eau dépend aussi bien des précipitations que des facteurs du sol et du paysage. Dans les parties les plus sèches du Sahel se prolongeant jusqu'aux zones arides, le nomadisme est encore répandu. Des zones les plus sèches jusqu'aux plus humides, la production agricole joue un rôle croissant dans le système. Dans le passé, les jachères longues donnaient une chance de se régénérer à la végétation clairsemée d'arbres et de buissons, quand le bétail était déplacé pour pâturer ailleurs (système parfois désigné sous le nom de semi-nomadisme). Mais avec la croissance démographique et l'augmentation de la population, les occasions d'éloigner le bétail vers de nouveaux pâturages pendant des périodes suffisamment longues ont progressivement disparu (Barbier, 1997).

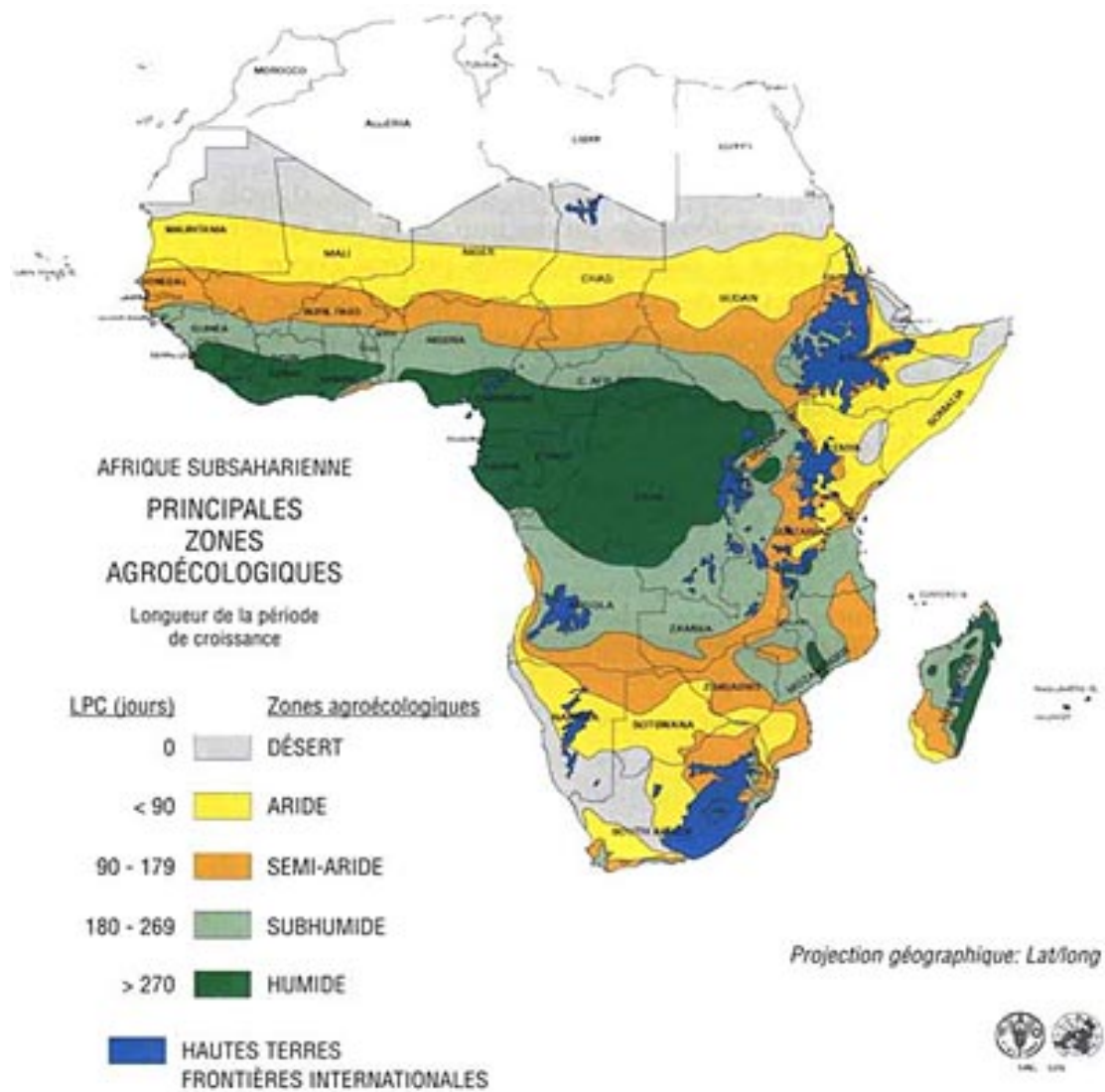


Figure 1.4: Carte des principales zones agro-écologiques en Afrique subsaharienne. Source: FAO (2003)

Les jachères sont devenues plus courtes et, bien que beaucoup de méthodes pour reconstituer la fertilité du sol aient été proposées, le succès a été limité en termes d'adoption par les agriculteurs (FAO, 2000b). Comme dans les régions semi-arides de l'Afrique australe, la longue saison sèche implique que, pendant plusieurs mois chaque année, peu de végétation soit présente pour protéger le sol et l'érosion est un problème répandu (Pretty, 2000). Les priorités des agriculteurs sont toujours associées à la nécessité d'assurer qu'ils auront suffisamment de nourriture pour la prochaine saison. C'est ainsi que dans le passé une mauvaise saison se traduisait par une migration vers des zones ayant de meilleures précipitations. A mesure que la densité de population augmentait, l'ampleur des migrations a diminué, et l'importance de la production agricole s'est accrue. Cependant, avec de faibles précipitations et des sols pauvres, les rendements sont presque toujours bas (autour de 500 kg /ha pour le mil). La majeure partie des cultures produites dans la zone sahéenne étant normalement destinées à l'autoconsommation, les populations sahéennes sont particulièrement vulnérables à la famine.

Des contraintes semblables existent dans la zone de savane soudanienne humide, mais, avec des précipitations légèrement moins irrégulières et plus élevées, la production agricole est mieux assurée. Ici, les paysans plantent du coton comme culture de rente, ce qui permet l'achat d'intrants (variétés améliorées, engrais, pesticides et préparation mécanisée du sol). Le coton était habituellement planté sur les meilleures terres, souvent avec un certain contrôle de l'érosion. Cependant, les rendements de coton ne se sont pas améliorés partout. En effet, selon la FAO (1999), en Haute Casamance, au Sénégal par exemple et dans la zone de la savane soudanienne, les rendements ont chuté entre 1970 et 1980, en raison d'une densité de population élevée et d'une plus grande concurrence pour les meilleures terres et pour les intrants entre le coton et les cultures vivrières. Par ailleurs, dans la zone semi-aride humide, au nord du Nigéria, on note également une densité de population très élevée ; ce qui a pour corollaire, l'augmentation constante de la demande alimentaire urbaine si bien que les cultures vivrières ont statut de culture de rente, et de petites quantités d'engrais minéraux peuvent être employées pour compléter les engrais organiques. Ensemble, ces quantités sont suffisantes pour maintenir des rendements de maïs et de sorgho aux environs de 2 tonnes par hectare (Dyson, 1996). Les fumiers animaux sont tellement demandés qu'ils sont vendus sur le marché de Kano. Les principales sources de fumier sont le bétail local et les petits ruminants, nourris en grande partie sur les résidus de récolte et les chaumes laissés sur les champs en saison sèche et, parfois, à partir des haies et des barrières anti-érosives plantées autour des propriétés (Greenland, 1995). Avec ces intrants, une main-d'œuvre à prix relativement réduit disponible autour des villes surpeuplées et un marché assuré, un système de production continu relativement durable semble avoir été établi. Des expérimentations dans les centres de recherche en zone de savane soudanienne ont montré que les engrais minéraux seuls ne peuvent pas toujours maintenir les rendements, mais que c'est possible quand les engrais et le fumier sont employés dans un système intégré. Cependant, les centres de recherche utilisent des méthodes assurant la régularité de la mise en culture et de l'ensemencement, pratiques qui peuvent ne pas être à la disposition de l'agriculteur. L'amélioration des jachères naturelles a été poursuivie dans les zones de savane et de forêt, mais avec un succès limité (Palm *et al.*, 1997). L'utilisation des engrais pour améliorer la qualité et la productivité des prairies naturelles a été favorisée mais n'a pas été adoptée, car les avantages économiques ne sont pas immédiatement évidents. L'utilisation des arbres comme brise-vents pour réduire l'érosion éolienne, et les bandes enherbées pour contrôler l'érosion par l'eau ont reçu le soutien des gouvernements. Ces pratiques sont maintenant poursuivies de manière considérable, là où les arbres et les graminées produisent également une alimentation complémentaire pour les animaux.



### 1.3. PROBLEMATIQUE ENVIRONNEMENTALE EN ZONES SAHELIENNE ET SOUDANIENNE

#### 1.3.1. Variations et crises climatiques

Les précipitations en région sahélienne se singularisent par une très forte variabilité temporelle et spatiale, avec une tendance à la baisse depuis le milieu des années 1960. Selon Ozer (2000), l'évolution du climat sahélien dégage une tendance lente mais régulière vers un dessèchement, caractérisé par des oscillations d'amplitudes assez faibles mais de longue durée et des oscillations de courte durée mais d'amplitudes plus grandes appelées sécheresses. L'intérêt particulier suscité par cette région spécifique s'explique par le fait que celle-ci a connu le déficit pluviométrique le plus important jamais enregistré au cours du XXe siècle, tant dans son intensité que dans sa durée, et ce dès la fin des années 1960 (Hulme, 1996; Hulme, 2001). L'indice le plus révélateur de tous les temps demeure l'assèchement du fleuve Niger en 1985 lorsque celui-ci a cessé de couler à Niamey (Billon, 1985). Lors de ces épisodes secs, on estime, par endroit, le déficit entre 50 et 80 % selon les années et les stations (Nicholson *et al.*, 1998), les années 1972-73, 1984 et 2004 ayant été particulièrement déficitaires (Ganaba *et al.*, 2005).

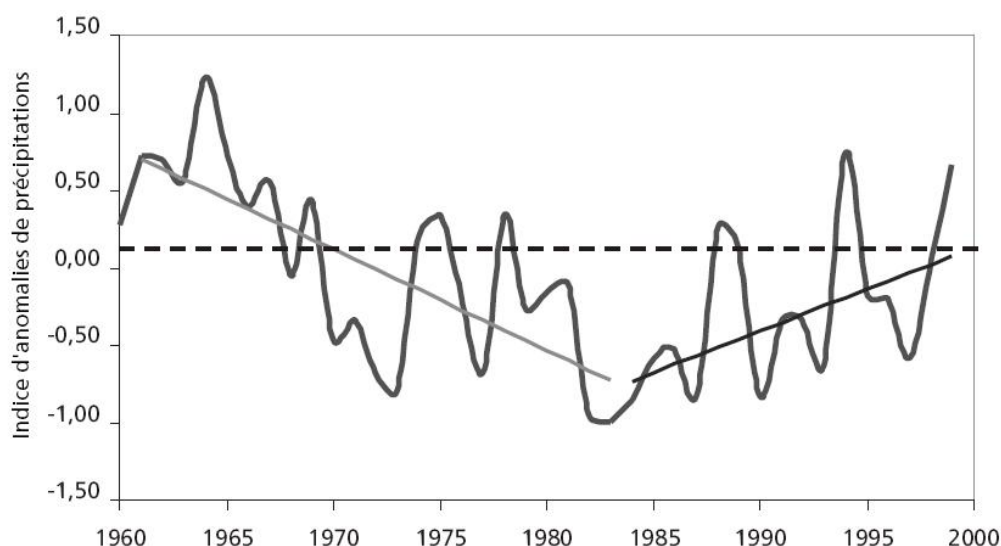


Figure 1.5: Indices d'anomalies des précipitations et tendances pour le Sahel 1960-2000

(Source: <http://www.fao.org/docrep/006/x9681f/x9681f04.htm>)

Actuellement, et depuis le début des années 1990 (voir Figure 1.5.), la tendance pluviométrique montre un retour vers les normes antérieures aux années 1970 (Ozer *et al.*, 2003). Mais, il semble que cette amélioration pluviométrique soit due en grande partie à une augmentation de l'intensité des précipitations ; les événements extrêmes devenant de plus en plus fréquents, ils augmentent l'érosion hydrique et donc la dégradation des terres. Par ailleurs, la longueur de la saison des pluies ne semble pas s'être étendue par rapport aux décennies de sécheresse, ce qui ne profite donc pas à l'agriculture (Ozer & Ozer, 2008). Finalement, selon les scénarios climatiques, il semblerait que les sécheresses conjoncturelles du passé deviendront bel et bien structurelles à l'horizon 2050 à cause du réchauffement de la planète (Held *et al.*, 2005). Le pire pourrait donc être à venir. La sécheresse constitue une menace constante à laquelle les ruraux doivent faire face s'ils veulent survivre dans la région. Cependant, la sécheresse n'entraîne pas à elle seule, à court terme, une dégradation des ressources du type de celle que l'on constate maintenant dans les zones sahélienne et

soudanienne. D'autres facteurs interviennent, notamment l'accroissement de la population, l'expansion de l'agriculture extensive avec la déforestation qui en résulte, et l'urbanisation rapide (qui concentre la demande de bois de feu). A eux tous, ces facteurs rendent de plus en plus difficile la gestion de la base de ressources naturelles sur laquelle repose l'économie de la région.

### **1.3.2. Croissance démographique et pression foncière**

La population sahélienne connaît une des croissances démographiques les plus élevées au monde (Barbier, 1997; UN, 1997). Depuis 1950, la population totale a été multipliée par 4. Selon les Nations Unies, la population sahélienne devrait encore doubler d'ici à 2030 et dépasser les 193 millions d'habitants en 2050, soit 12 fois plus qu'en 1950 (16 millions : UNPP, 2006). A titre de comparaison, sur la même période, la population mondiale devrait être multipliée par 3,6 et la population du continent africain par 8,6. Le taux de croissance annuel actuel de 3,5% est vertigineux et correspond à un doublement de la population en 22 ans environ. On compte maintenant une augmentation de la population sahélienne dépassant les deux millions d'individus par an. On ne peut guère compter dans l'immédiat sur une diminution significative de l'augmentation de la population dans cette région d'Afrique. Ceci est non seulement dû au dynamisme de la population (proportion élevée d'individus en âge de procréer) et à l'augmentation de l'espérance de vie, mais également au manque d'efforts pour réduire les taux de natalité. En Afrique subsaharienne, la population est considérée comme une ressource importante pour le développement et la création de richesses. Par ailleurs, la migration à l'intérieur même des zones rurales est également un phénomène de plus en plus important, bien que les statistiques la concernant soient fragmentaires. Il est néanmoins évident que les gens sont de plus en plus nombreux à quitter les zones à peuplement dense et en particulier le plateau *Mossi* du Burkina Faso et le bassin arachidier du Sénégal, pour des endroits plus accueillants de la zone soudano-guinéenne (Henry *et al.*, 2003).

Plus impressionnante encore est certainement l'augmentation des populations s'agglutinant dans les grandes villes, essentiellement les capitales. La population urbaine des pays du Sahel concernés par cette étude a été multipliée par 13,5 depuis 1950. Cette explosion démographique urbaine est due en grande part à l'exode rural massif des « victimes de la sécheresse » encore appelés « réfugiés environnementaux » ou « victimes de la désertification » (Thomas & Middleton, 1994). En 2030, la population sahélienne urbaine devrait égaler la population rurale. Cette évolution est remarquable quand on sait que la population urbaine représentait bien moins que 10% de la population totale sahélienne en 1950. Cette augmentation des populations urbaines est réellement préoccupante dans les pays du Sahel et participe chaque jour aux bouleversements environnementaux que connaissent les zones périphériques de ces agglomérations. En effet, ces nouveaux habitants doivent construire leurs logements, cuire leurs aliments, etc., ce qui demande d'énormes ressources en eau, en énergie et en matières premières. Ainsi, la consommation en eau implique évidemment une politique rigide de la gestion de l'eau dont l'application est rendue extrêmement difficile de par le manque de moyens financiers ainsi que par l'augmentation continue de la demande (Bechler-Carmaux *et al.*, 1999). La demande en bois-énergie, et plus spécifiquement en charbon de bois, crée des auréoles de déboisement autour des villes et le long des axes routiers reliant les agglomérations. De plus, dans nombre de pays de la sous-région ouest africaine, on note une certaine timidité des populations pour passer des systèmes traditionnels à faibles intrants vers des systèmes plus productifs; mais c'est compter sans les faibles potentialités des sols et les avatars climatiques qui imposent également de grandes contraintes à l'intensification agricole. Finalement, l'afflux continu de ces réfugiés

environnementaux dans les zones urbaines entraîne une augmentation dramatique de la vulnérabilité de ces nouveaux arrivants aux maladies et aux risques naturels. En effet, de nouveaux quartiers spontanés, nés des grandes migrations consécutives à la vague de sécheresse des années 1980, se sont installés dans des dépressions jadis marécageuses où les eaux de pluie ne peuvent s'évacuer en l'absence de plan d'urbanisme et de réseau d'assainissement des eaux usées. C'est clairement le cas par exemple dans les villes de Dakar, Saint-Louis ou encore Nouakchott qui connaissent de dramatiques inondations dès qu'une pluie dont la période de retour est de l'ordre de 6 ans tombe (Sène & Ozer, 2002). A Niamey (Niger) par exemple, l'insuffisance, voire l'absence, des infrastructures d'assainissement et de collecte des ordures ménagères est à l'origine de la contamination par des matières organiques d'origine humaines et animales des eaux des nappes superficielles accessibles par les puits. Cette pollution constitue un risque sanitaire potentiel important pour une majorité des habitants de la capitale du Niger (Chippaux *et al.*, 2002).

### **1.3.3. Contexte socio-économique**

D'une manière générale, l'essentiel de la population des pays membres du CILSS continue à vivre de l'agriculture pluviale qui occupe 78% de la main d'oeuvre contre 61% pour les pays ouest-africains non-membres du CILSS (Club du Sahel/OCDE, 1998). Au plan macroéconomique, le secteur agricole contribue pour 31% dans la formation du PIB des pays du CILSS. Le problème fondamental du Sahel découle du fait que près de 80% de sa force de travail (en l'occurrence sa main d'oeuvre rurale) n'est occupée que 3 mois sur 12 et reste au chômage pendant le reste de l'année. Et il est difficile d'envisager le développement dans un tel contexte. Cela est d'autant vrai qu'en dépit des efforts consentis par les gouvernements et les principaux donateurs dans le Sahel et en Afrique de l'Ouest, le constat majeur reste que la pauvreté est essentiellement rurale, même si elle commence à prendre aussi de l'ampleur dans les villes avec l'urbanisation galopante. De même, les crises alimentaires qui sévissent dans la région depuis les grandes sécheresses des années 1970 touchent principalement les ruraux (FAO/IFAD/WFP, 2005). En effet, lors de la dernière crises alimentaire survenue au Niger en 2004-2005, due à l'effet cumulé de la sécheresse et des criquets pèlerins, c'est un total de 23 départements totalisant 2.988 villages déficitaires à 50% soit plus de 3.293.648 habitants, essentiellement des ruraux, dont 2.540.698 personnes extrêmement vulnérables (Zoundi, 2006). Au-delà du fait que plus de gens vivent ou vivront progressivement en milieu rural, certaines données récentes (FIDA, 2005) indiquent que globalement en Afrique au sud du Sahara, environ trois quarts des personnes se trouvant dans des conditions de pauvreté absolue vivent dans les zones rurales. Par ailleurs, comme cela a été mis en exergue par le West Africa Long Term Perspective Study (WALTPS), la région Afrique de l'Ouest subit d'énormes transformations sous l'effet du double choc démographique et du marché (Club du Sahel/OCDE, 1998). Les politiques économiques (agricoles, commerciales,...) semblent avoir été particulièrement déterminantes dans l'évolution du monde rural au cours de ces 20 dernières années. En effet, les politiques d'ajustement structurel mises en oeuvre dans les années 1980 sont en grande partie à l'origine de la transformation de l'environnement productif agricole, un secteur assurant l'essentiel des moyens d'existence des communautés rurales à travers les activités de l'agriculture, de l'élevage, de la pêche, la foresterie, etc. Les difficultés d'accès de nombreux ruraux aux services agricoles du fait du désengagement des États et des faibles capacités du secteur privé à prendre la relève, ont contraint certains ruraux à des reconversions dans d'autres secteurs économiques non agricoles comme le secteur informel. Même si ces politiques visaient également le développement d'autres services non publics, plusieurs analyses faites dans la sous-région ouest-africaine (Mama *et al.*, 2002), indiquent quelques contre performances de celles-ci au niveau de l'investissement privé dans

certaines pays comme le Burkina Faso. De même, les difficultés d'accès des producteurs aux engrais couplées avec la suppression de toutes les formes de subventions, engendrent dans certaines zones très vulnérables le développement de pratiques « d'agriculture minière » de la part des communautés rurales pauvres. Ce cercle vicieux a souvent eu des conséquences néfastes sur l'environnement, plus particulièrement l'accélération de la dégradation des sols et du phénomène de désertification dans les zones rurales.

#### **1.3.4. Pression du cheptel**

Les animaux sont une des composantes majeures du système de production alimentaire dans les régions arides, semi-arides et subhumides d'Afrique de l'Ouest. Conséquence directe de la croissance démographique humaine, on note une augmentation du cheptel. Ce développement du cheptel est lié à l'espérance des exploitants d'augmenter leurs revenus. Il y a aussi un aspect culturel qui veut que les individus les plus importants possèdent les troupeaux les plus prestigieux. Malgré les graves crises de sécheresse des années 1970 et 1980, pendant lesquelles le cheptel bovin a perdu plus d'un quart de sa population, l'augmentation moyenne de la population bovine en 2005 est néanmoins de 76% par rapport à 1961. L'évolution de ces vingt dernières années est impressionnante avec un accroissement annuel moyen de 3,7% (FAO, 2006). Les ovins et caprins présentent tous deux une évolution similaire de leur nombre. Moins vulnérables par rapport aux forts déficits pluviométriques, ils présentent respectivement une augmentation de 164% et 177% par rapport à 1961. L'évolution de ces vingt dernières années est déconcertante avec un accroissement annuel moyen de 4,1% pour les ovins et de 5,9% pour les caprins (FAO, 2006). Cette augmentation considérable du troupeau, additionnée au fait que la surface d'approvisionnement des troupeaux se soit réduite lors de la longue sécheresse par simple aridification ainsi que par la transformation de pâturages en zones de cultures, a des répercussions dramatiques sur l'environnement. Les ressources en pâturages alors encore disponibles se sont dégradées par surpâturage, le cheptel ne permettant plus la régénération de certaines pousses et laissant place soit à des sols fortement à totalement dénudés, soit à une nouvelle végétation, c'est-à-dire à des végétaux non consommables, à une prolifération d'espèces buissonnantes et non fourragères et à une augmentation des espèces annuelles, éphémères aux dépens de la régénération naturelle. Un autre effet néfaste du cheptel est le piétinement des sols. Cela peut empêcher la régénération de jeunes pousses et peut provoquer la réactivation de certains sols jusqu'alors protégés de l'érosion éolienne grâce, par exemple, à des croûtes superficielles. Du surpâturage, il en résulte une dégradation non seulement de la couverture végétale du sol mais également une forte réduction de la biodiversité.

#### **1.4. EVALUATION DE LA DÉGRADATION DES TERRES ET DE LA DÉSERTIFICATION**

Les objectifs poursuivis par les études de suivi et évaluation de la désertification sont doubles : il s'agit d'une part d'évaluer et de mesurer l'état de la dégradation des terres afin de diagnostiquer la gravité du problème, de caractériser son étendue et d'en déceler les changements et les évolutions. D'autre part, il s'agit de mesurer les performances des actions de lutte entreprises et l'effet des politiques nationales dans ce domaine. La nécessité d'évaluation et de suivi est exprimée dans la Convention sur la désertification, qui fait obligation aux pays signataires de rendre compte des progrès enregistrés dans l'application des moyens de lutte. La compréhension des types de dégradation des terres induits par l'homme, aussi bien que leurs causes, y compris les facteurs socioéconomiques, est une condition indispensable pour développer des technologies de réduction de ces dégradations.

### **1.4.1. Etendue de la dégradation des terres**

L'évaluation globale de la dégradation des terres n'est pas chose aisée. On utilise un large éventail de méthodes, notamment les avis d'experts, la télédétection et la modélisation. Plusieurs articles concernent la collecte de l'information et l'établissement d'indicateurs. En raison des différences de définition et de terminologie, on constate de grands écarts dans les statistiques disponibles sur l'étendue et le taux de dégradation. Qui plus est, la plupart des statistiques indiquent les risques de dégradation ou de désertification (en se fondant sur les facteurs climatiques et l'utilisation des terres) et non l'état actuel des sols (Janicot, 1996; Katyal & Vlek, 2000). La diversité des phénomènes de dégradation des terres complique encore la lisibilité des statistiques disponibles sur la dégradation des terres et/ou des sols (Warren & Agnew, 1988). On dispose de diverses sources de données sur les tendances de la désertification. Elles vont des enquêtes mondiales et de l'analyse de transects par satellites, aux études des modifications de l'environnement au niveau local.

Deux ensembles principaux de données mondiales ont servi de sources pour les données relatives à la désertification : d'une part, les programmes d'évaluation mondiale de la dégradation des sols (GLASOD) exécutés à l'Université de Wageningen pour la FAO (Oldeman *et al.*, 1991). L'échelle de présentation des données est le 1/10 000 000<sup>e</sup>; d'autre part, les données du Centre International d'Etude des zones arides et semi-arides (International Center for Arid and Semi-arid Land Studies – ICASALS) de l'Université du Texas, dont les chiffres portent sur la dégradation des sols et/ou sur les zones souffrant de dégradation de la végétation. Il en ressort que les chiffres fournis par l'ICASALS sont beaucoup plus élevés que ceux de GLASOD. Ainsi, l'estimation du pourcentage des terres arides du monde entier souffrant de la désertification varie de 19,5% (GLASOD) à 69,5% (ICASALS) suivant les sources (Cornet, 2002). Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) reconnaît lui-même, que les bases de données qui ont servi à établir l'Atlas de la désertification publiée en 1992 comportaient beaucoup de lacunes et d'imprécisions. En considérant l'importance du phénomène, il conclut qu'une information détaillée de meilleure qualité est requise d'urgence. Par ailleurs, un certain nombre d'études de cas détaillées permettent d'arriver à une compréhension valable des modifications de l'environnement et de la façon dont les populations y réagissent en un lieu donné. Ces études au niveau local, menées souvent durant de nombreuses années, démontrent la résilience des systèmes pastoraux et agricoles, face aux variabilités de grande ampleur de la pluviosité (Toulmin, 1993). Ces travaux présentent un tableau bien différent de celui présenté à des échelles plus globales. Le problème majeur est de tirer, à partir des études basées sur un nombre limité de sites, des conclusions plus générales pour l'ensemble d'une région et de réconcilier des résultats souvent contradictoires obtenus au plan local et au niveau global.

### **1.4.2. Problématique de la désertification**

Le terme désertification fut utilisé pour la première fois par Aubreville, en 1949, pour décrire le processus de changement de végétation menant à des sols dégradés et/ou dénudés en Afrique tropicale. Il fut ensuite repris par Tricart (1954) pour désigner la remise en mouvement des dunes due à la dégradation anthropique suite au surpâturage et à l'extension inconsidérée d'une culture spéculative. Il écrit (p: 131) : « Le patrimoine naturel est gravement menacé, et, avec lui, le droit à la vie des générations futures ».

Depuis le milieu des années 1970, la désertification a bénéficié d'un intérêt considérable tant de la part des scientifiques que des politiques et du public en général. Elle est actuellement reconnue comme étant une problématique environnementale majeure pour le 21<sup>e</sup> siècle (World Bank, 2002). Cependant, le terme désertification est souvent galvaudé et

malheureusement confondu avec la sécheresse (Thomas, 1993). La désertification est souvent réduite à l'image d'une avancée du désert avec des dunes vives recouvrant habitations, moyens de communication, oasis et terres fertiles. Le mythe n'est pas neuf et est tenace. En 1935, Stebbing affirmait que le Sahara au nord de Tahoua, Niger, avançait à une vitesse moyenne de 1 kilomètre par an. L'auteur se basait alors sur des observations ponctuelles de dégradation anthropique de l'environnement au Niger et au nord du Nigeria formant des « petits Sahara » provoqués par les incendies de forêt, le déboisement incontrôlé, le surpâturage et les types de cultures non appropriés. Quarante ans plus tard, Lamprey (1975), sur base de données cartographiques de 1958 et de photographies aériennes de 1975, estima que le sud du Sahara avançait à une vitesse moyenne de 5,5 kilomètres par an dans l'ouest du Soudan. Ces conclusions ont été scientifiquement rejetées après plusieurs mises au point (Hellden, 1991). En outre, une série d'études basées sur l'analyse de données satellitaires à basse résolution a démontré que le Sahara répondait naturellement aux fluctuations pluviométriques, pouvant s'étendre durant les périodes de sécheresse et se contracter avec le retour des pluies (Nicholson *et al.*, 1998; Tucker & Nicholson, 1999). Durant ces dernières décennies, la lutte contre la désertification n'a pas atteint son objectif et est considérée par un grand nombre d'observateurs comme étant un réel échec par manque, entre autres, d'indicateurs pertinents pour en assurer le suivi et d'une définition universelle de la problématique (Hellden, 1991; Glenn *et al.*, 1998). Ainsi, chaque discipline, chaque école, a sa propre définition de la désertification (Verstraete, 1986). Le concept même de désertification a fortement évolué au cours de ces quarante dernières années (Mainguet, 1991; Warren & Khogali, 1992; Thomas, 1993). Plus de 130 définitions de la désertification ont ainsi été recensées dans la littérature (Ozer, 2000). Conscientes que la désertification devenait un problème majeur peu étudié et, interpellées par la première grande sécheresse sahélienne des années soixante-dix, les Nations Unies ont organisé la première Conférence sur la désertification et y ont adopté, en 1977, un Plan d'action de lutte contre la désertification (United Nations, 1978). Cependant, en dépit de cette initiative et de tant d'autres efforts, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement devait conclure, en 1991, que la dégradation des sols et la désertification s'étaient aggravées dans le monde. Ainsi, la problématique de la lutte contre la désertification était-elle à l'ordre du jour lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement mieux connue sous le nom de Conférence de Rio 1992. A la suite de cette Conférence, la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique, a été établie et ratifiée en 1994 (PNUE / CCD 1995). Il en est ressorti une définition du concept de désertification présentée sur le tableau 1.1.

Parmi les indices courants de désertification figurent la réduction de la quantité et de la diversité des espèces animales et végétales, la perte de la capacité de rétention en eau, la diminution de la fertilité du sol et une érosion croissante due au vent et à l'eau. En fin de compte, les communautés végétales et animales en arrivent à se trouver si radicalement simplifiées que des espèces précédemment communes dans une région ne peuvent plus survivre dans un environnement si profondément différent, à moins d'y être délibérément réintroduites.

Une question subsiste toutefois : « *La désertification est-elle causée par la sécheresse ou par l'exploitation abusive des ressources ?* »

La réponse à cette question fondamentale dépend de la façon qu'on a d'appréhender la sécheresse et la destruction des ressources qui y est souvent associée. A ce sujet, trois explications générales sont avancées selon Gorse (1985):

- ▶ Première thèse : la sécheresse que connaissent les zones sahélienne et soudanienne est un phénomène inéluctable à long terme dans lequel l'homme ne joue aucun rôle.

L'aridité croissante aura tendance à détruire inexorablement le couvert végétal. Les zones désertifiées s'étendront pour faire disparaître totalement des environnements déjà marginaux, les systèmes agricoles à productivité réduite. Toute tentative de résistance à la désertification serait vaine.

- ▶ Deuxième thèse : la sécheresse dans les zones sahélienne et soudanienne est un phénomène récurrent à court terme, indépendant une fois encore de l'influence humaine. Les ressources souffrent à court terme, mais après une sécheresse d'une durée de cinq ans ou moins, les systèmes locaux de production récupèrent tôt ou tard.
- ▶ Troisième thèse : la désertification est un processus complexe encore mal connu. Il serait dû à des interactions entre la sécheresse et l'utilisation abusive de l'environnement par l'homme. Une meilleure gestion des ressources naturelles pourrait amoindrir l'impact des sécheresses, même sérieuses, sur la viabilité à long terme des ressources renouvelables, bien qu'il soit possible que des sécheresses prolongées, comme celle qui sévit actuellement (une à trois décennies de durée), altèrent profondément les ressources naturelles, particulièrement si la pression démographique s'accroît en même temps. Ainsi, à la différence du climat qui est une donnée de fait, le comportement humain peut être modifié pour faire face à une évolution de l'environnement

Face à ces hypothèses parfois contradictoires, la question qu'on est en droit de se poser est de savoir : Quels moyens et méthodes peut proposer la recherche pour évaluer et suivre la progression de la désertification ?

Tableau 1.1. : Définitions clefs de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique (PNUE / CCD, 1995).

<b>Terme</b>	<b>Définition</b>
Désertification	Dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines
Dégradation des terres	Diminution ou disparition, dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts, ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement, tels que (i) l'érosion des sols causée par le vent et/ou l'eau ; (ii) la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économique des sols ; et (iii) la disparition à long terme de la végétation naturelle.
Zones arides, semi-arides et subhumides sèches	Zones, à l'exclusion des zones arctiques et subarctiques, dans lesquelles le rapport entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle se situe dans une fourchette allant de 0.05 à 0.65.

### 1.4.3. Apport de la télédétection

Plusieurs auteurs ont tenté de déterminer des indicateurs appropriés, simples et accessibles à tous, pour le suivi de l'état de la désertification (Rapp, 1974; Mabutt, 1986; Berger, 1996; Mouat *et al.*, 1997; Ozer, 2000; Prince, 2002 ; Symeonakis & Drake, 2004). Un indicateur peut être défini comme une mesure de magnitude, fréquence, taux et tendance de processus environnemental qui peut être observé à la surface de la Terre, et qui est sujet à des variations significatives pour déterminer et comprendre les changements environnementaux à l'échelle humaine. Un indicateur doit permettre d'identifier le plus rapidement possible les tendances en cours (Elliott, 1996) et doit être facilement compréhensible par les autorités politiques compétentes ainsi que par les bailleurs de fonds pour que des actions puissent être entreprises rapidement afin de ralentir ou stopper les processus en cours (Neimanis & Kerr, 1996).

#### 1.4.3.1. Utilisation des images satellitaires à haute résolution

Les analyses multi-temporelles, réalisées à partir d'images satellitaires à haute résolution (1 à 30 mètres de résolution spatiale) jusqu'à présent, ont permis de mettre en évidence les processus de dégradation environnementale dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches au Sahel. Dans ces études, des photographies aériennes des années cinquante et soixante-dix sont le plus souvent comparées avec des images TM de LANDSAT ou HRV de SPOT des deux dernières décennies. A noter également l'utilisation des images ASTER datant de l'époque de la guerre froide et, plus récemment, des images à très haute résolution comme IKONOS (1 mètre de résolution spatiale en mode panchromatique). Ces études sont le plus fréquemment supportées par des missions de réalité de terrain ainsi que par des enquêtes auprès des populations locales. Les résultats qui en découlent sont généralement similaires : d'une part, une diminution importante des zones boisées et de la végétation en général et, d'autre part, une augmentation remarquable des sols dégradés qui se marque souvent par une remise en mouvement du sol par la déflation éolienne (Chamard & Courel, 1979 ; Kuberow, 1990; Karimoune, 1994; Kuberow, 1994; Lindqvist & Tengberg, 1994; Pare & Tallet, 1999; Valentin & d'Herbes 1999; Gueye & Ozer, 2000; N'Djafa Ouaga & Courel, 2000 ; Gonzalez, 2001; Mainguet *et al.*, 2001; Cuny & Sorg, 2003). Il n'en demeure pas moins que les appréciations du phénomène varient fortement d'une zone d'étude à l'autre.

Ainsi, seule une étude recensée présente de manière précise la désertification comme un processus irréversible (Karimoune, 1994). Le travail de cet auteur, réalisé à partir de la comparaison de photographies aériennes de 1957 et de 1975 ainsi que d'une image satellitaire HRV de SPOT de 1987, met en évidence la dégradation environnementale dans la zone semi-aride dans le sud-est du Niger (pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 350 mm). En 1957-1958, la végétation est relativement dense (36% de la zone étudiée) et les remaniements éoliens sont quasi inexistantes (6%). Après la première grande sécheresse, l'image de 1975 met en évidence la disparition de la plus grande partie de la végétation (réduite à 14%) notamment dans les lits d'oueds. La remobilisation des sables affecte des superficies plus étendues (14%) et se situe en particulier sur les sommets des dunes et dans les auréoles autour des villages. A la suite de la terrible sécheresse du début des années quatre-vingts (image 1987), le secteur balayé par la déflation s'est considérablement élargi (23%), traduisant la progression de la dégradation environnementale. La végétation a été réduite de moitié par rapport à 1975 (plus que 8%). Finalement, l'étude met en évidence la disparition du sol à certains endroits, faisant apparaître une cuirasse latéritique là même où le sol était recouvert d'une végétation relativement dense à la fin des années cinquante. Cet exemple précis prouve que la dégradation irréversible peut survenir très rapidement (moins de trente ans).

Dans un climat légèrement plus humide (pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 500 mm), Lindqvist et Tengberg (1994) ont réalisé une étude similaire dans le nord du Burkina Faso. Leurs résultats sont très intéressants dans la mesure où l'analyse de différents sites met



en évidence la vitesse variable de la dégradation des sols. Ainsi, le premier site analysé (Kolèl) a connu une dégradation intégrale entre 1955 et 1990. La savane dense continue et la steppe à couverture ligneuse discontinue qui recouvraient 98% de la superficie de la zone d'étude en 1955 ont totalement disparu en 1990. Ces formations ont été remplacées par de la steppe à couverture végétale discontinue ou par des sols totalement dénudés. Par contre, le deuxième site étudié (Oursi) présente une dégradation plus lente et moins radicale pendant la même période. En effet, si la savane dense continue et la steppe à couverture ligneuse discontinue qui recouvraient 78% de la superficie de la zone analysée en 1955, ces formations représentaient encore 53% du territoire étudié en 1990. Par contre, l'étendue des zones totalement dénudées et soumises aux divers processus d'érosion augmentait fortement, passant de 3 à 26% entre les mêmes dates. Cependant, à la suite des conditions pluviométriques moins défavorables enregistrées au cours des années quatre-vingt-dix, ce dernier site aurait connu un retour progressif de certaines associations végétales dans plusieurs zones dénudées durant la grande sécheresse (Rasmussen *et al.*, 2001). Ces analyses effectuées au Burkina Faso suggèrent une certaine résilience de la végétation et vont donc à l'encontre du concept d'irréversibilité de la désertification. L'avantage de ces études, reposant sur l'examen diachronique de missions aériennes et d'images satellitaires à haute résolution, réside dans la période d'analyse pouvant couvrir près d'un demi-siècle d'informations. Par contre, les faiblesses de ces analyses sont, d'une part, le coût excessif pour l'acquisition des données tant aériennes que satellitaires ainsi que pour la main d'œuvre et, d'autre part, le caractère local de l'étude.

#### 1.4.3.2. Utilisation des images satellitaires à basse résolution

Les images satellitaires à basse résolution (1 km ou plus) fournies par les capteurs AVHRR de NOAA ou VEGETATION de SPOT permettent d'effectuer un suivi régulier à très faible coût des ressources renouvelables. La perte de précision due à la faible résolution spatiale est compensée par un large champ d'observation (de l'ordre du pays entier) et par une excellente résolution temporelle. Une répétitivité journalière est en effet essentielle pour un suivi régulier des ressources, principalement végétales. Les plus longues séries ne débutent qu'en 1981, ce qui n'a permis le plus souvent l'analyse de diverses problématiques environnementales que sur une décennie. Diverses études se sont basées sur l'exploitation de l'imagerie satellitaire à basse-résolution pour quantifier les processus de désertification. Les indicateurs les plus fréquemment utilisés sont le suivi simple de l'évolution de la végétation au moyen de l'indice de végétation normalisé (NDVI) ou de la combinaison de cet indice avec les précipitations sur des périodes de temps qui varient selon les auteurs (Foody, 2003 ; Symeonakis et Drake, 2004).

#### 1.4.3.3. L'indice de végétation normalisé (NDVI)

Mis au point par Rouse *et al.* (1973), le NDVI est élaboré à partir de la différence entre la réflectance de la végétation fournie par le capteur AVHRR dans le proche infrarouge (canal 2: 0,73-1,1  $\mu\text{m}$ ) et celle obtenue dans le rouge (canal 1 : 0,55-0,68  $\mu\text{m}$ ), divisée par la somme de ces deux mêmes réflectances. Le résultat d'un NDVI prend la forme d'une nouvelle image, la valeur de chaque pixel étant comprise entre 0 et 1 (sol nu - couvert végétal maximal). C'est l'analyse de la palette de nuances s'étendant entre ces valeurs extrêmes (très peu fréquentes) qui va renseigner l'observateur sur la densité de couvert et la quantité de biomasse verte. Cet indice est très utilisé à cause de la facilité de sa mise en œuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal et la capacité des végétaux à absorber la lumière solaire et à la convertir en biomasse. En région sahélienne, la dynamique de la végétation est fortement liée à l'évolution pluviométrique (Nicholson *et al.*, 1998; Milich & Weiss, 2000a, 2000b). Au Mali et au Niger, les études de Malo et Nicholson (1990) suggèrent que le NDVI mensuel est directement fonction des précipitations mensuelles. Dans la même région, Justice *et al.*,

(1991) ont analysé les relations existant entre le NDVI décadaire et les précipitations décadaires estimées à partir de la durée des nuages à sommet froid (données METEOSAT). Les auteurs constatent une forte relation entre les deux paramètres tout en soulignant que le temps de réponse de la végétation aux précipitations est de une à deux décades. Des observations similaires ont été faites en Afrique de l'Est (Davenport & Nicholson, 1989). Cette relation étroite a d'ailleurs permis la modélisation du NDVI en fonction des précipitations dans le sud du Niger et le nord du Nigeria (Hess *et al.*, 1996). Dès lors le NDVI est reconnu comme étant un indicateur fiable de l'état de la végétation (Foody, 2003; Symeonakis & Drake, 2004).

## 1.5. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'étude de la dégradation du couvert végétal et le suivi de la progression de la désertification exigent d'une part, l'analyse des conditions biophysiques et socioéconomiques des milieux subissant ces phénomènes, et, d'autre part, la compréhension des mécanismes et processus résultant de ces conditions. Il repose tout d'abord sur l'acquisition de paramètres de base permettant de décrire les états du milieu et leur dynamique aux échelles spatio-temporelles pertinentes, puis sur l'analyse des interactions entre facteurs induisant des processus contribuant à la désertification. Partant de ces considérations, la présente recherche focalise sur trois principaux objectifs à savoir :

1. Etudier l'évolution de la végétation (au cours des deux dernières décennies) suivie par télédétection sur base des images NOAA-AVHRR basse résolution en rapport avec l'évolution du climat au niveau de la bande sahélienne en Afrique occidentale. *In fine*, il s'agira d'évaluer :
  - si l'état de la végétation présente également une amélioration consécutive à des conditions pluviométriques plus favorables, comme le suggèrent certaines études (Jacobberger-Jellison, 1994; Nicholson *et al.*, 1998; Tucker & Nicholson, 1999),
  - ou si, au contraire, la longue altération environnementale de ces dernières décennies a une bonne dose d'irréversibilité, du moins à l'échelle de plusieurs années voire décennies, comme le soutient un autre courant d'idée (Mainguet, 1991; Wickens, 1997; Chamard & Courel, 1999),
2. Caractériser, sur la base des paramètres écologiques et forestiers, l'état et la vulnérabilité des formations végétales en fonction des contraintes (biotiques et abiotiques) dans la zone soudanienne. De façon spécifique, l'étude vise à :
  - caractériser du point de vue écologique les phytocénoses sous différentes contraintes climatiques ;
  - Identifier les variables caractéristiques des formations végétales pouvant servir à l'appréciation de leur état ; apprécier la sensibilité des différentes formations végétales aux facteurs précités, et regrouper les zones à risques suivant la typologie et le degré de vulnérabilité;
  - analyser la dynamique spatio-temporelle des unités d'occupation du sol caractéristiques des états de surface, puis déterminer la célérité et l'amplitude des mutations auxquelles la végétation est soumise et enfin ;
  - identifier les facteurs qui déterminent ces changements détectés.

## 2<sup>e</sup> PARTIE

### **MODIFICATIONS DU COUVERT VEGETAL ET EVALUATION DE LA DESERTIFICATION : CAS D'ETUDES DANS LES ZONES SAHELIENNE ET SAHELO-SOUDANIENNE**

---

*Durant ces dernières décennies, la lutte contre la désertification n'a pas atteint son objectif et est considérée par un grand nombre d'observateurs comme étant un réel échec par manque, entre autres, d'indicateurs pertinents pour en assurer le suivi (Hellden, 1991 ; Glenn et al., 1998). Dès lors, plusieurs auteurs ont tenté de déterminer des indicateurs appropriés, simples et accessibles à tous, pour le suivi de l'état de la désertification. Un indicateur environnemental peut être défini comme des mesures de magnitude, fréquence, taux et tendance de processus environnemental qui peuvent être observés à la surface de la Terre, et qui sont sujets à des variations significatives pour déterminer et comprendre les changements environnementaux à l'échelle humaine. Cette partie de notre étude est constituée par deux articles (sous-titrés chapitre 2 et chapitre 3) qui ont été publiés (tels que présentés) dans des revues internationales anglophones. Nous analysons l'évolution et les modifications du couvert végétal aux échelles régionale et nationale respectivement à travers deux grandes entités écoclimatiques du domaine semi-aride sec en Afrique de l'Ouest. Nous avons utilisé un indicateur qui associe les indices de végétation dérivés des images Pathfinder du capteur à basse-résolution AVHRR de NOAA et les précipitations mesurées au sol en zones sahélienne (Niger, Mauritanie, Sénégal, Mali) et sahélo-soudanienne (Burkina -Faso) sur la plus longue période jamais utilisée, à savoir 1981-1999, dans le but d'identifier les zones connaissant une dégradation potentielle. Une discussion globale de nos résultats à la fin du chapitre 3 nous a permis de porter un regard critique sur les limites des données utilisées et sur la controverse générée par certaines études portant sur l'évolution de la désertification dans cette partie du continent africain.*

---

## CHAPITRE 2

### ONGOING DESERTIFICATION PROCESSES IN THE SAHELIAN BELT OF WEST AFRICA: EVIDENCE FROM THE RAIN-USE EFFICIENCY

---

HOUNTONDI, Y.C., SOKPON, N., NICOLAS, J. & OZER, P.

In: *Advances in remote sensing and geoinformation processing for land degradation assessment*. Roeder, A. & Hill, J. (eds), ISPRS book series, London: Taylor & Francis, 2008. (In press)

#### ABSTRACT

The implementation of the UNCCD needs the identification of areas that record declining productivity of the vegetation over long-time periods. In this scope, we analyze the state of the vegetation productivity using 1982-1999 time series of NOAA-AVHRR NDVI data and compare it to rainfall data. For this, 354 rain gauges data distributed from yearly average isohyets 100 to 900 mm in five countries of West Africa are analyzed. We use for trends analysis, the ratio between integrated vegetation index (iNDVI) during the growing period (June to October) and the May to October sum of rainfall (RR). This ratio is a proxy of the Rain Use Efficiency is the widely accepted. Overall, 91% and 94% of RR and iNDVI data recorded positive trends over the 1982-1999 periods. Most stations in the Sahel were stable for the iNDVI/RR (49.5%). However, 37.8% showed strong to very strong negative change in the iNDVI/RR ratio, while only 1.3% showed positive trend. These strong negative trends recorded in more than 1/3 of the analyzed stations may reflect ongoing desertification processes in the Sahel and could be a starting point for the identification of hot-spots areas to determine where to take action within the National Action Programs (NAP) or Sub-Regional Action Programs (SRAP) to combat desertification.

Keywords: *Integrated NDVI; Rainfall; Rain use efficiency; Trend analysis; Desertification, Sahel.*

## 2.1 INTRODUCTION

After about two decades of dramatic rainfall deficits that started in the late 1960s (L'Hôte *et al.*, 2002), the Sahel of West Africa has experienced increasing precipitation since the early 1990s (Ozer *et al.*, 2003; Dai *et al.*, 2004). Although increasing human pressure on the environment over the same period may have enhanced desertification processes, some authors suggested that the Sahel has been greening from the early 1980s to the late 1990s (Eklundh & Olsson, 2003; Pearce, 2002).

Since the mid-1970s, desertification benefited of a considerable interest from scientists, politics and the public. Land degradation in arid lands is now recognized as one of the major environmental problems for the 21st century (World Bank, 2003) and the Sahel of West Africa is often quoted as the most seriously affected region. Yet, desertification processes often evoke an image of advancing desert with moving dunes threatening houses, roads, oasis and fertile lands and leaving behind a barren and sterile environment. The term desertification has been misused for a long time due to the lack of data, objective indicators and rigorous scientific studies, and because of the inexistence of a widely accepted definition (Nicholson *et al.*, 1998). Many authors have experienced a wide range of indicators in order to map the occurrence and severity of desertification (Mouat *et al.*, 1997; Ozer, 2000). Although many of these indicators were unsatisfactory because of their prohibitive costs and time-consuming for the process of data collection, low resolution satellite remote sensing data provide a good source of stable, reliable and long-term measurements (Symeonakis & Drake, 2004; Prince, 2002).

Methods have been developed to assess the vegetation net primary production (NPP) from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). These techniques were developed in the mid of 1980s (Justice, 1986; Prince & Justice, 1991) but it is only recently that a medium-term archive has accumulated with a long enough record (20 years) to allow studies at the appropriate time scale (Prince *et al.*, 1998). In addition, previous studies measured a strong, linear relationship between NDVI and primary production or above-ground total dry-matter accumulation in herbaceous vegetation in the Sahel, based on data for one or two successive years (Tucker *et al.*, 1985; Prince, 1991). This relationship was established both through a modelling of interactions between radiation and vegetation, and through empirical studies. In this paper, a proxy of the rain use efficiency (as detailed below) is used in order to identify areas suffering from desertification.

## 2.2 DATA AND METHODS

### 2.2.1. Meteorological station data

Monthly rainfall data were made available from an archive assembled by the “Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles (AP3A)” of the Centre Régional Agrhymet from station observations. Database includes meteorological stations through the nine countries that are grouped in the Inter-States Committee for Drought Control in the Sahel (CILSS). 354 rain gauges with complete monthly rainfall data from 1982 to 1999 were selected in five countries of West Africa (Mauritania, Senegal, Mali, Burkina Faso and Niger). Here we used the total rainfall records during rainy seasons (RR) that extend from May to October. The bioclimatic subdivision as defined by Ozer (2000) is:

- sahelian zone of the north (Z1): yearly rainfall between 100 and 300 mm
- sahelian zone of the central north (Z2): yearly rainfall between 300 and 500 mm
- sahelo-sudanese of the central south (Z3): yearly rainfall between 500 and 700 mm

- sudanese zone in the south (Z4): yearly rainfall between 700 and 900 mm

The distribution and repartition of the stations according to four bioclimatic zones (Ozer, 2000) are shown in Table 2.1. and Figure 2.1

Table 2.1. Selected stations in West Africa within the 100 to 900 mm isohyets.

Country	Number of selected stations per climatic zone						Total
	Z1: 300	100- 500	Z2: 300- 500	Z3: 500- 700	Z4: 700- 900		
Burkina Faso	0	12		38	49		99
Mali	10	14		16	20		60
Mauritania	27	4		0	0		31
Niger	32	58		16	2		108
Senegal	9	21		18	8		56
Total	78	109		88	79		354

### 2.2.2. Satellite data

For the purpose of analyzing vegetation dynamics at sub-continental scale, satellite data from the NOAA AVHRR sensing system for the period 1982–1999, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were used. The NASA/NOAA Pathfinder AVHRR Land (PAL) dataset (James & Kalluri, 1994) has been generated as monthly maximum value composites at a 8 km x 8 km pixel resolution. Noise levels can be very high over many areas in Africa but are comparatively low over arid to sub-humid areas where cloudiness is limited (Chappel *et al.*, 2001). Quality issues of the Pathfinder database have been discussed by Prince and Goward (1996). The NDVI has proved useful in numerous monitoring studies of vegetation and drought. It is calculated as the normalized difference in reflectance between the red band (0.55  $\mu\text{m}$  - 0.68  $\mu\text{m}$ ) and the near infrared band (0.73  $\mu\text{m}$  – 1.1  $\mu\text{m}$ ). This quantity is considered to be a “greenness” index. In arid and semiarid regions, it is well correlated with such parameters as leaf area index, greenleaf, biomass, vegetation cover, etc. (Nicholson *et al.*, 1990). Although it is well known that, especially in sparsely vegetated areas, there is considerable background influence, we will not take this criteria into account as the analysis are systematically focused on similar areas where soil composition is not likely changing during the considered period.

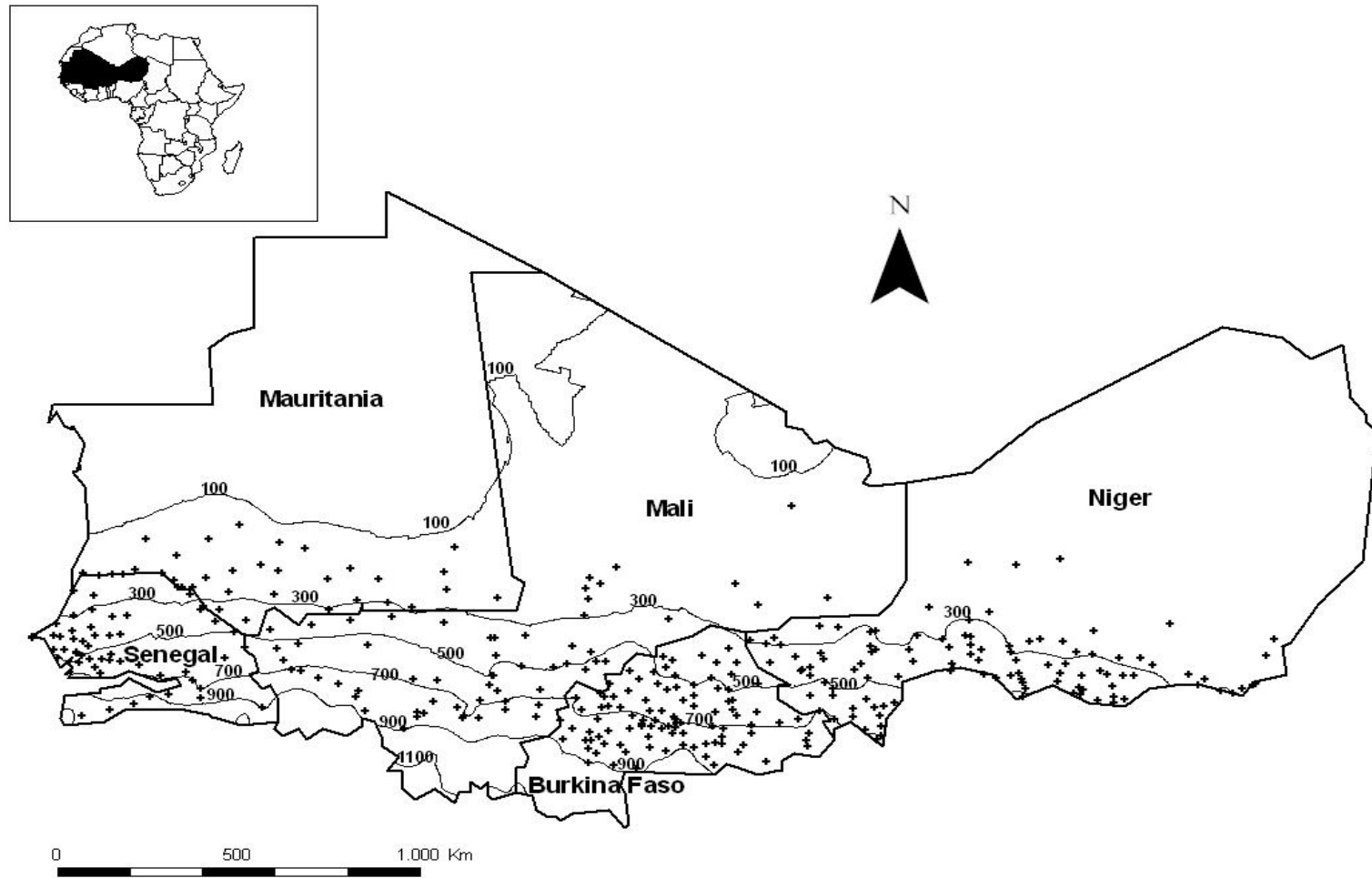


Figure 2.1: Geographical position of the 354 studied stations (black crosses) and bioclimatic zones (isohyets defined by kriging on average rainfall value for the 1980-2000 periods).

In the present study, the time series was restricted to the period 1982–1999 because, after 1999, a systematic shift in the remotely sensed data resulting from a very high shifting solar zenith angles has been detected (Eklundh & Olsson, 2003), probably caused by late afternoon overpass of NOAA-14. In addition, year 1994 was not taken into account because of of Pinatubo volcanic dust diffusion into the stratosphere (Tanaka *et al.* 1994). A total of 354 pixels were selected when including a rain gauge station. For all pixels, the seasonal vegetation index integrals (iNDVI) covering the entire growing season from June to October were computed in order to assess the annual net primary production (Diallo *et al.*, 1991). This approach has been preferred to the use of rasterized rainfall data obtained from satellite estimations, because of stormy features and high spatial variation of sahelian rainfall. Previous studies in Sahel (Amani & Lebel, 1997; Taupin *et al.*, 1998) exhibit a significant difference in annual rainfall score within a distance of 10 km. This implies that the spatial rainfall variability on a small scale is more significant than on the survey level scale.

### 2.2.3. Method

#### 2.2.3.1 Indicator of rain use efficiency

The net annual increase of biomass, or net primary production, is a measure of the production of an ecosystem. This quantity bears a direct relationship to photosynthesis and NDVI is strongly correlated with both, particularly in arid lands. Le Houérou (1984) suggests that the ratio of primary production to rainfall, iNDVI/RR (rain use efficiency) is a better parameter to characterize arid and semi arid regions like the Sahel. In the Sahel, the dynamic of the vegetation is strongly linked to the rainfall evolution (Symeonakis & Drake, 2004; Hess *et al.*, 1996). For regions laying in the annual rainfall 100 mm to 900 mm, the iNDVI/RR ratio is regarded as a useful proxy for rain-use efficiency (Nicholson *et al.*, 1998; Foody, 2003). As mentioned by previous studies in the West African Sahel with spatially comprehensive measurements such as these, the incidence of the individual components of desertification could be detected (Diouf & Lambin, 2001; Tottrup & Rasmussen, 2004). For this research, we derived this ratio during the growing season. The total rainfall amount taken into account is the sum of the May to October precipitation (hereafter referred as rainfall). This period was used here since it has a strong relationship with the iNDVI calculated during the growing season (Davenport and Nicholson, 1989; Hess *et al.*, 1996; Hountondji *et al.*, 2006). Indeed, during that period, the monthly rainfall peak generally occurs between August and September (Hess *et al.*, 1996; Ozer, 2000) and previous studies showed that the monthly sum NDVI follows monthly rainfall with a lag of about one month (Justice *et al.*, 1986; Justice *et al.*, 1991; Davenport and Nicholson, 1989). As for rainfall, the iNDVI calculation ends October. Thus, the ratio of primary production to rainfall formulation is equivalent to:

$$iNDVI/RR = \frac{\sum_{june}^{october} NDVI}{\sum_{may}^{october} RR} \quad (1)$$

Where RR = monthly rainfall, and NDVI = monthly normalized difference vegetation index.

#### 2.2.3.2 Trend analysis

For each station, trends from 1982 through 1999 were estimated by linear regression considering the ratio iNDVI/RR as dependant variable and time (years) as independent variable. Regression slopes were recorded for each station as parameters characterising the



global trends either for the rainfall or for NDVI. Moreover, each slope was mapped in seven classes indicating very strong, strong, weak positive or negative and stable trends, adapting a procedure suggested by Eklundh and Olsson (2003). The regression procedure supplies a Student-t test and its resulting significance p-level to analyse the hypothesis that the slope is different from 0. This p-level was used as a criterion to define the class boundaries. The trends, for the iNDVI/RR ratio, were labelled as "very strong" if the p-level exceeded 0.05 for the one-tailed t-test, "strong" if the p-level ranged between 0.05 and 0.1, "weak" if the p-level is between 0.1 and 0.2 and otherwise "stable" if the p-level is up to 0.2. These long-term linear trends for each pixel in the iNDVI/RR ratio may be understood as a combination of a number of interrelated factors including variations of biophysical and human influences. As the iNDVI/RR ratio is thought to remain stable through time, such trends can be interpreted as a measure of possible degradation or improvement of the vegetation growth.

## 2.3. RESULTS

### 2.3.1. Rainfall

A preliminary analysis of rainfall data indicates increasing rainfall in the Sahel of West Africa during the studied period (Figure 2.2). Overall, 91.4% of May to October rainfall recorded positive slope over the 1982-1999 period (not shown). In detail, 48.9% of the stations showed a very strong to strong positive trend, and 11% recorded a weak positive change. Stability characterized 39% of the analyzed stations, while less than 1% recorded a weak negative trend. Stations that have recorded the most remarkable positive changes seem to follow a north-south geographic gradient and one station out of two shows a stable tendency in the rainfall fringe between 700-900 mm. Such results were expected especially when considering that the drought period culminated in the early 1980s (L'Hôte *et al.*, 2002; Dai *et al.*, 2004; Nicholson, 1985) that is the beginning of the analyzed dataset. In addition, these results are in accordance with recent investigations on rainfall variations in the Sahel suggesting that the drought may have ended in the early 1990s (Ozer *et al.*, 2003).

### 2.3.2. The seasonal vegetation index (iNDVI)

As expected, a substantial increase in the seasonal vegetation index was noticed consecutively to wetter conditions observed during the studied period. Yet, Figure 3 shows a constant below average iNDVI Z-score during the six first years of the analysis (1982-1987) that were among the driest years of the 20th century (L'Hôte *et al.*, 2002; Nicholson, 1985) while this value is systematically above average during the eight latest years (1992-1999) logically due to the strong rainfall recovery (Ozer *et al.*, 2003).

Overall, throughout the 354 pixels analyzed in the Sahel of West Africa, 62.8% presented a very strong and strong positive change in iNDVI, while it remained stable in 29.9% of cases (not shown). These results are similar to those of Eklundh and Olsson (2003) who observed a strong increase in seasonal NDVI in the Sahel since 1982 interpreted as vegetation recovery from the drought periods of the 1980s. Other detailed studies in the same area showed that after a long period of strong land degradation, vegetation recovery was observed during the 1990s (Diouf & Lambin, 2001; Hiernaux & Turner, 2002; Rasmussen *et al.*, 2001).

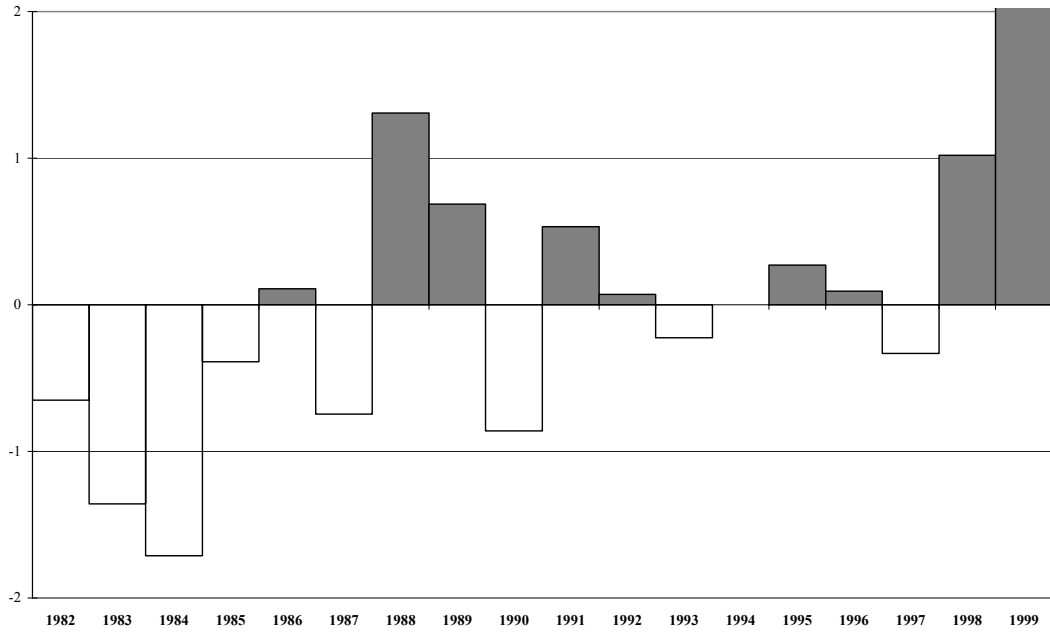


Figure 2.2: Average Z-scores (expressed as standard deviations) of rainfall for the 354 stations selected in the Sahel.

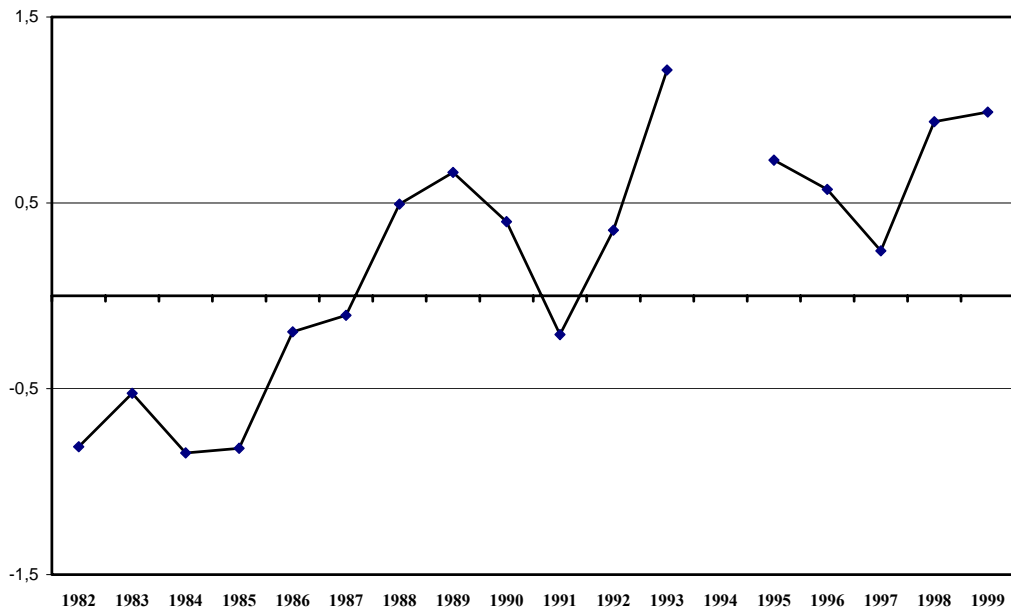


Figure 2.3: Average Z-scores (expressed as standard deviations) of iNDVI for the 354 stations selected in the Sahel. (Note that 1994 is not considered because of the Pinatubo effect)

An unanswered question remains: as the early years of the dataset were exceptionally dry, is this vegetation recovery consistent with increasing rainfall?

### 2.3.3. The iNDVI/RR ratio

Trend classes for change in the iNDVI/RR ratio are summarized in Table 2.2 and relative change classes in the Rain Use efficiency considering the bioclimatic zone is shown in Figure 2.4. Overall, a negative slope is recorded in 68.4% of the 354 analyzed stations, while the remaining stations (31.6%) are characterized by a positive trend.

Detailed analysis shows that, for all considered stations, most areas (61.6%) remained stable during the 1982-1999 periods. However, 11.9% and 13.6% presented a very strong and strong negative change, respectively. 11.9% showed a weak negative trend and only 1.1% showed positive change. About 38% of the analyzed stations have therefore experienced decreasing trends in the iNDVI/RR ratio that may reflect possible degradation of the vegetation growth, and therefore ongoing desertification processes. The geographical distribution of downward weak to strong trends is fuzzy and may indicate localized land degradation processes in some places while few others may experience improved land management. Differences in changes are highlighted when considering phytogeographic areas of West Africa (Figure 2.5).

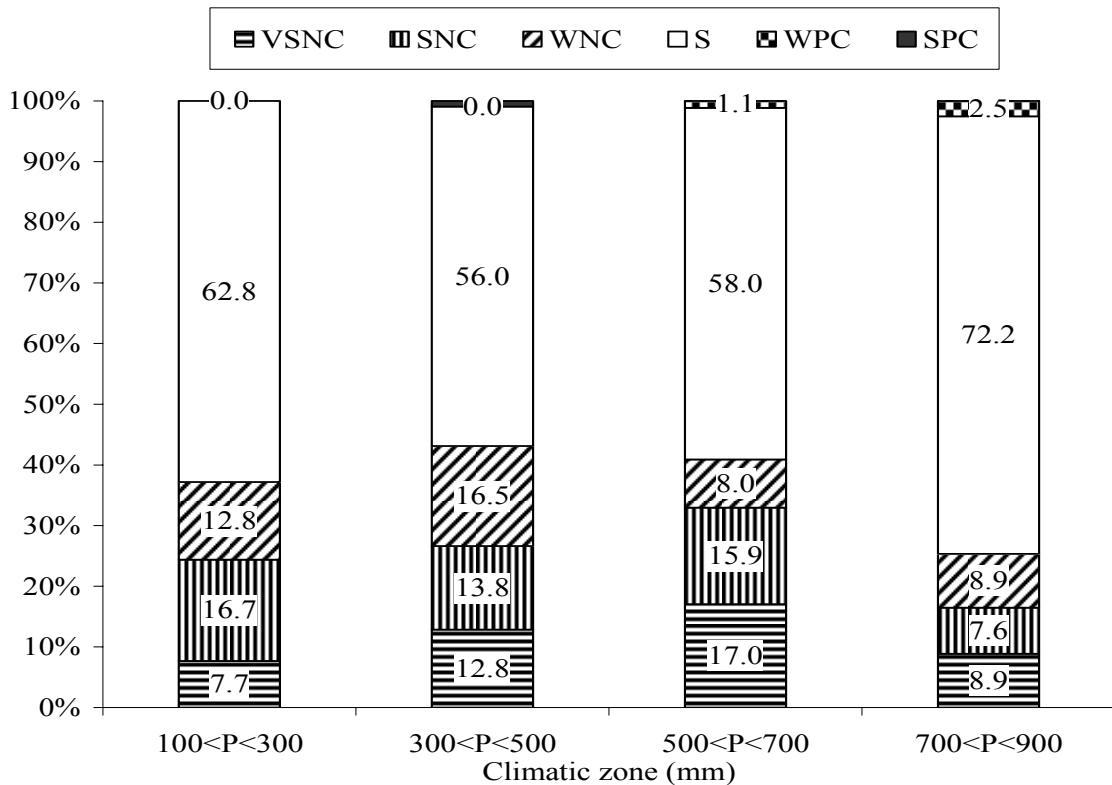


Figure 2.4: Relative change classes in the Rain Use efficiency considering the bioclimatic zones (100-900 mm). Legend: VSNC: very strong negative change; SNC: strong negative change; WNC: weak positive change; S: stable; VSPC: very strong positive change; SPC: strong positive change; WPC: weak positive change.

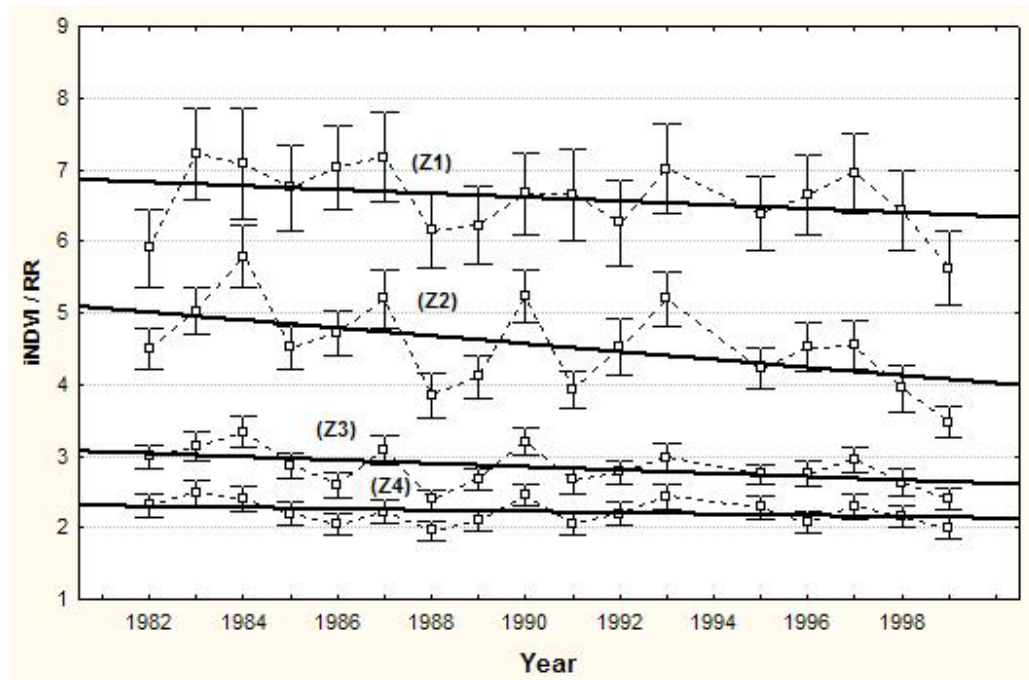


Figure 2.5: Rain Use efficiency trends considering the bioclimatic zone (100-900 mm) during 1982-1999 periods in the studied area.

On this graph, the error bars make possible to appreciate for each analyzed year, the dispersion of the observations around the average value of the stations: they correspond to a confidence interval of 95% around the average. It is relevant to note that, at high rainfall, plant biomass production remains high as biomass production is a function of both rainfall level and RUE – the decrease in RUE at high rainfall simply indicates that the available rain is used less efficiently.

The linear regressions established with the whole set of the stations for each zone show a highly significant negative slope ( $p < 10^{-3}$ ) for the statistics *t* of Student in all four bioclimatic zones over the studied period. This situation rises to the fact that the year 1984 was particularly dry in the Sahel, which generates very high values of the *i*NDVI/RR and thus an increase in the significance of the slope of the regressions. In addition, when one considers only the 1985 - 1999 periods, the results always show a decrease of the *i*NDVI/RR ratio in all four bioclimatic zones, with highly significant for Z1 ( $p=0.0005$ ), for Z2 ( $p=10^{-5}$ ), for Z3 ( $p=10^{-6}$ ), and Z4 ( $p=4.10^{-7}$ ). In the Sahelian belt (<500 mm in annual rainfall), 58.9% of the stations presented a relative stability, 12.7% showed a weak negative change and 28% strongly decreased.

The sahelo-sudanese zone (500-700mm) seems to have been the most affected by land degradation as vegetation resilience to rainfall is the lowest among all phytogeographic areas of the studied zone. Yet, about the half (51.9%) of the 79 stations included in this region show a stable *i*NDVI/RR ratio, while 20.3% experienced a very strong negative trend and 11.4% a strong negative change. In the Sudanese zone (700-900 mm), 72.2% of the stations appeared to be stable, while 16.5% and 8.9% suffered from a strong and weak negative change, respectively. However, it is worth mentioning that these regions include the only stations of West Africa that display a weak positive change (2.5%). The obtained results in this southern region should be taken with precaution as previous studies mentioned that the relationship between NDVI and rainfall tends to weaken when annual rainfall is higher than 1000 mm. For sites dominated by woody and perennial herbaceous species, the same overall pattern can be

expected. However, the relation may be less obvious because there is less interannual variation in the composition of the vegetation cover, and as woody and perennial herbaceous species can store nutrients and may tap groundwater reserves in deep soil layers. As primary production remains relatively constant, it seems that water is not a major limiting factor in these areas (Nicholson *et al.*, 1990; Davenport & Nicholson, 1989).

Such contrasting evolutions along the bioclimatic gradients of the semi-arid belt West Africa are in accordance with recent findings of Hiernaux and Turner (2002). These authors stated that risks of environmental degradation are moderate and mainly climate-driven in pastoral systems at the drier edge, while they are serious and mainly management-driven in the crop-livestock systems of the sahelo-sudanese zone. Our results indeed show that 58.9% of the stations remained stable in the northern part of the studied area, while about 25% of the analyzed stations suffered from very strong, strong or weak negative changes in the sahelo-sudanese zone in the central north. As a matter of fact, Henry and colleagues (2003) showed that migration flows from the northern ecologically marginal area to the sahelo-sudanese zone were partly explained by unfavorable environmental variables such as high rainfall variability, land degradation, and land availability at the origin, and favorable conditions at the destination for these variables. For this reason, there is currently less pressure in the northern part of the Sahel as people migrated because of drought while migrations are likely to contribute to negative environmental changes at the destination (Lambin *et al.*, 2001).

Recent claims that the Sahel is greening since the 1990s because of improved land management (Mazzucato & Niemeijer 2000, Rasmussen *et al.* 2001, Niemeijer & Mazzucato 2002, Pearce 2002, Eklundh & Olsson 2003) may be only partly true. As an example, Mazzucato & Niemeijer (2000) closely studied two small areas (Bilanga and Fada-N'Gourma) in Eastern Burkina Faso and suggested that these areas showed no evidence of land degradation as crop yields increased. Our results on these two stations indeed show that if the iNDVI presented positive slopes, the iNDVI/RR ratio experienced a strong negative change in Bilanga and a weak negative change in Fada-N'Gourma, suggesting that the rain-use efficiency of the vegetation has been declining over the last two decades. In northern Burkina Faso (Gorom-Gorom), Rasmussen *et al.* (2001) suggested that desertification was in reverse demonstrating that vegetation was reclaiming fossil dunes revitalised during the droughts of the 1970s and 1980s. Our recent results (Hountondji *et al.*, 2006) at this station suggest that the iNDVI strongly increased and that the iNDVI/RR ratio remained stable during the 1980s and 1990s. In this specific case, it can be accepted that the vegetation is resilient with the rainfall increase observed during the last decade.

Elsewhere, Hein & de Ridder (2006) studying the relationship between RUE and rainfall at Sydenham, South Africa, and in the Ferlo, Senegal, demonstrated how the whole curve shifts towards a lower RUE following degradation of the ecosystem (O'Connor *et al.*, 2001). These authors noticed that the quadratic relation between rainfall and RUE still allows for a decline in RUE following degradation of the vegetation cover. Hence, RUE is a function of both the state of the vegetation cover and annual rainfall, and analysis of degradation with satellite images requires consideration of the rainfall pattern during the time of satellite observations. If further analysis of remote sensing images confirms a process of degradation in the Sahel, this would have important consequences for the ongoing debate on equilibrium vs. non-equilibrium approaches to rangeland dynamics. It would confirm the relevance of the equilibrium approach with respect to the overall impact of grazing at the scale of the Sahel under current grazing pressures (cf. Le Houérou, 1989; Hérault & Hiernaux, 2004). In addition, if man-induced degradation of the Sahel (overgrazing, wood cutting, land mismanagement) is demonstrated, this would have repercussions for the debate on the causes of climate change in the Sahel. Currently, a weakness in the argumentations of Xue & Shukla (1993) and Wang *et al.* (2004) that anthropogenic-induced land cover changes have

contributed to the occurrence of the extreme Sahelian droughts of the last decades of the 20th century is a lack of evidence of degradation from remote sensing data.

Therefore, the conclusion that satellite data do not show long-term degradation in the Sahel is premature (Hountondji *et al.*, 2006; Ozer *et al.*, 2007). This is further illustrated by recent findings on two Sahelian sites for which multiyear data on rangeland productivity were available (Hein & de Ridder, 2006). For these sites, the hypothesis that the rainfall pattern would result in a constant RUE in the absence of degradation could be rejected at  $p$  levels varying from  $p=0.03$  to  $p=0.08$ . They concluded that it is likely that the relatively constant RUE found in remote sensing studies indicate a process of human induced degradation of the plant cover in the Sahel. This also implies that there has been no ‘greening’ of the Sahel beyond the impacts of increasing rainfall, as suggested in Anyamba & Tucker (2005) and Olsson *et al.* (2005). However, more analysis is required to provide a definite answer as to the existence and rate of degradation in the Sahel. Because of the limited amount of long-term data on phytomass productivity in the Sahel (Le Houérou, 1989; Herault & Hiernaux, 2004), remote sensing analysis remains the preferred tool.

A limiting factor in this study has been the spatial resolution of the remotely sensed data used for our analysis. In fact, the AVHRR sensor is characterized by shortcomings within the subject of vegetation monitoring because it was not originally designed for this purpose (Teillet *et al.*, 1997; Van Leeuwen *et al.*, 1999, Steven *et al.*, 2003). In addition, the spatial extrapolation from 1 km to 8 km resolution in coarse Pathfinder data could hide some undergoing processes (Hountondji *et al.*, 2006; Niang *et al.*, 2008). It is well known that the relative variability of phytomass production is highly dependent on the spatial scale. And according to Golluscio and colleagues (2005) the variation coefficient of primary production decreases exponentially as the size of plots or pixels increases. Therefore, it appears that the coarse resolution remote sensing estimates of vegetation production may underestimate the temporal variability of production as measured in smaller field sites (Diouf & Lambin, 2001). An alternative solution for this weakness could be found through the use of finer spatial resolution imageries such as AVHRR GIMMS as suggested by Fensholt *et al.*, (2006). These authors conclude that the correction for sensor orbital drift in the GIMMS data set has improved the data quality compared to the AVHRR Pathfinder data. Their results suggest that the accuracy of the AVHRR GIMMS NDVI is higher than the AVHRR PAL NDVI and, consequently, GIMMS NDVI should be used for analyses of long-term trends in regional or continental scale NDVI.

As mentioned above, many biophysical and human influences may interfere in the evolution of the iNDVI/RR ratio. Increasing use of fertilizers, better water resources management and land rehabilitation measures have improved over the years. But despite such positive technical evolutions, only four stations out of 354 recorded a weak and strong positive change the iNDVI/RR ratio over the 1982-1999 periods. Another interference in the evolution of the iNDVI/RR ratio may be attributed to climate change due to the ongoing build-up of greenhouse gases. In many regions of the world, extreme precipitation events have significantly increased during the last decades (Houghton, 2001). Currently, research on changes in extreme rainfall events specific to Africa, in either models or observations, is limited. However, a general increase in the intensity of high-rainfall events, associated in part with the increase in atmospheric water vapour, is expected in Africa, as in other regions (Christensen *et al.*, 2007). Current works in progress (Ozer *et al.*, 2008) show that, despite significant yearly rainfall shortages and large decrease of yearly rainfall days recorded over the 1941-2004 period in Niger and Mauritania, extreme rainfall events frequency remained stable and, sometimes, significantly increasing. This may partly explain a large increase of floods observed lately in several areas of West Africa (Sene & Ozer, 2002; Tarhule, 2005).

If this trend was confirmed, then the iNDVI/RR ratio may be negatively affected as extreme daily precipitation can not be fully used by vegetation and can further cause erosion and soil crusting.

## 2.4. CONCLUSION

Based on observations of increased crop yields and/or NDVI, recent studies have stated that desertification in the African Sahel was in reverse. However, using trends in the iNDVI/RR ratio, our results suggest that about 37.4% of the analyzed stations may have experienced ongoing desertification processes during the 1982-1999 periods. Our findings present an environmental situation that is probably more gloomy than recent papers stated although we are far from the concept of irreversible land degradation that was so fashionable until recently. Nevertheless, these results have to be taken with precaution because of the needs of biophysical significance of the stable trends recorded in the study. It is possible that the coarse spatial resolution of AVHRR data (64 km<sup>2</sup>) may hide undergoing trends that are not detectable at this scale. Hence, if new remote sensing analyses confirm anthropogenic degradation (overgrazing, wood cutting, land mismanagement), this would support the hypothesis that degradation of the vegetation layer, in particular through sustained high grazing pressures, has contributed to the occurrence of the 20th century droughts in the Sahel. Furthermore, if degradation of the Sahelian vegetation cover is confirmed, this would indicate that Sahelian pastoralists may be more vulnerable for future droughts than currently assumed. Because degradation of the Sahel in the 1980s and 1990s has been masked by an upward trend in annual rainfall, the consequences of a future drought for the local population could be unexpectedly severe. Otherwise, for more accurate investigations, any remote sensing-based monitoring system of land degradation in such area must be complemented by field data collection, in particular with floristic composition data which is not detectable from space, even at fine spatial resolutions. This could be a starting point for switching from empirical approaches based on vegetation indices, which suggest an improvement of the environmental situation at the regional scale, but that may not reflect real situation.

Table 2.2: Rainfall (RR), integrated NDVI (iNDVI) and rain use efficiency (iNDVI/RR) trends for 354 stations in West Africa (1982-1999).

Parameters	Slopes				Trends significance														Total	%
	RR	POS	%	NEG	%	VSNC	%	SNC	%	WNC	%	S	%	WPC	%	SPC	%	VSPC		
100<P<300	71	91.0	7	9.0	1	1.3	0	0.0	0	0.0	31	39.7	8	10.3	15	19.2	23	29.5	78	22.0
300<P<500	100	91.7	9	8.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	32	29.4	15	13.8	24	22.0	38	34.9	109	30.8
500<P<700	82	93.2	6	6.8	0	0.0	1	1.1	0	0.0	33	37.5	8	9.1	16	18.2	30	34.1	88	24.9
700<P<900	69	87.3	10	12.7	0	0.0	0	0.0	2	2.5	42	53.2	8	10.1	13	16.5	14	17.7	79	22.3
Total	322	91.0	32	9.0	1	0.3	1	0.3	2	0.6	138	39.0	39	11.0	68	19.2	105	29.7	354	100.0
iNDVI	POS	%	NEG	%	VSNC	%	SNC	%	WNC	%	S	%	WPC	%	SPC	%	VSPC	%	Total	%
100<P<300	76	97.4	2	2.6	0	0	0	0.0	1	1.3	19	24.4	2	2.6	5	6.4	51	65.4	78	22.0
300<P<500	100	91.7	9	8.3	0	0	0	0.0	0	0.0	34	31.2	10	9.2	15	13.8	50	45.9	109	30.8
500<P<700	82	93.2	6	6.8	0	0	0	0.0	0	0.0	31	35.2	6	6.8	5	5.7	46	52.3	88	24.9
700<P<900	77	97.5	2	2.5	0	0	0	0.0	0	0.0	22	27.8	7	8.9	6	7.6	44	55.7	79	22.3
Total	335	94.6	19	5.4	0	0	0	0.0	1	0.3	106	29.9	25	7.1	31	8.8	191	54.0	354	100.0
iNDVI/RR	POS	%	NEG	%	VSNC	%	SNC	%	WNC	%	S	%	WPC	%	SPC	%	VSPC	%	Total	%
100<P<300	14	17.9	64	82.1	6	7.7	13	16.7	10	12.8	49	62.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	78	22.0
300<P<500	19	17.4	90	82.6	14	12.8	15	13.8	18	16.5	61	56.0	0	0.0	1	0.9	0	0.0	109	30.8
500<P<700	18	20.5	70	79.5	15	17.0	14	15.9	7	8.0	51	58.0	1	1.1	0	0.0	0	0.0	88	24.9
700<P<900	61	77.2	18	22.8	7	8.9	6	7.6	7	8.9	57	72.2	2	2.5	0	0.0	0	0.0	79	22.3
Total	112	31.6	242	68.4	42	11.9	48	13.6	42	11.9	218	61.6	3	0.8	1	0.3	0	0.0	354	100.0

Legend: POS: positive; NEG: negative; VSNC: very strong negative change; SNC: strong negative change; WNC: weak negative change; S: stable; WPC: weak positive change; SPC: strong positive change; VSPC: very strong positive change



## CHAPITRE 3

### ANALYSIS OF THE VEGETATION TRENDS USING LOW RESOLUTION REMOTE SENSING DATA IN BURKINA FASO (1982-1999) FOR THE MONITORING OF DESERTIFICATION

---

HOUNTONDJI, Y.C., SOKPON, N., & OZER, P.

International Journal of Remote Sensing, (2006), Vol. 27, No. 5, 871–884.  
DOI: 10.1080/01431160500382782

#### ABSTRACT

After about two decades of dramatic rainfall deficits that started in the late 1960s, the Sahel of West Africa has experienced increasing precipitation since the early 1990s. The implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) needs the identification of areas that record declining vegetation productivity over long-time periods. In this scope, we analyse the state of the vegetation productivity using long-term time series of NOAA AVHRR NDVI data and compare it to rainfall data. For this, 128 rain gauge data (RR) were compared with the integrated NDVI during the growing period (iNDVI) values in Burkina Faso from 1982 to 1999. During the analysed period, most of the studied stations in the country were stable for the iNDVI/RR (57.8%). However, 39.8% showed a weak to strong negative trend in the iNDVI/RR while only 2.4% showed a weak positive trend. These negative trends may reflect ongoing desertification processes in Burkina Faso and could be a starting point for the identification of hot-spots areas to determine where to take actions to combat desertification.

Keywords: Low resolution remote sensing; NDVI; Rainfall; Trend analysis; desertification, Burkina Faso.

### 3.1. INTRODUCTION

Since the late 1960s, the Sahel of West Africa dramatically suffered from widespread and persistent extreme rainfall deficit (Dai *et al.* 1998, Nicholson 1998) that continues since (L'Hôte *et al.* 2002) although there is a growing evidence that the drought may have ended during the 1990s (Ozer *et al.* 2003). In addition to this, increasing human pressure on the environment enhanced desertification processes.

Since the mid-1970s, desertification benefited of a considerable interest from scientists, politics and the public. Land degradation in arid lands is now recognized as one of the major environmental problems for the 21st century (World Bank 2002) and the Sahel of West Africa is often quoted as the most seriously affected region. Yet, desertification processes often evoke an image of advancing desert with moving dunes threatening houses, roads, oasis and fertile lands and leaving behind a barren and sterile environment (Lamprey 1975). The term desertification has been misused for a long time due to the lack of data, objective indicators and rigorous scientific studies, and because of the inexistence of a widely accepted definition (Verstraete 1986, Mainguet 1991, Thomas and Middleton 1994, Glenn *et al.* 1998, Nicholson *et al.* 1998). In addition, desertification is frequently associated to drought (Thomas 1993). For these reasons, the issue has caused considerable controversy regarding its nature and impacts. Many aspects of the desertification issue have been debated and challenged (Hellden 1991, Thomas 1993, Wickens 1997, Nicholson *et al.* 1998, Niemeijer & Mazzucato 2002) and it was shown that the advance of the Sahara desert was temporary as the southern border closely follows the fluctuations of rainfall in the Sahel belt (Tucker *et al.* 1991, 1994, Nicholson *et al.* 1998, Tucker and Nicholson 1999).

In 1994, the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) was established and ratified. The UNCCD defines desertification as "*land degradation in arid, semiarid and sub-humid areas resulting from various factors, including climate variations and human activities*" where land degradation means '*reduction or loss of the biological or economic productivity and complexity of rainfed cropland, irrigated cropland, or range, pasture, forest and woodlands resulting from land uses or from a process or combination of processes, including processes arising from human activities and habitation patterns*' (UN 1994).

Many authors have experienced a wide range of indicators in order to map the occurrence and severity of desertification (Mabutt 1986, Berger 1996, Mouat *et al.* 1997, Ozer 2000). Although many of these indicators were unsatisfactory because of their prohibitive costs and time-consuming for the process of data collection, low resolution satellite remote sensing data provide a good source of stable, reliable and long-term measurements (Prince 2002, Symeonakis and Drake 2004).

Methods have been developed to assess the vegetation net primary production (NPP) from the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) (Justice 1986, Prince and Justice 1991). In this paper, the NDVI is obtained from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) carried on the National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) series of meteorological satellites. The integrated NDVI during the growing period (iNDVI) data are compared with rainfall (RR) data in Burkina Faso from 1982 to 1999. Trend analysis is then applied on the obtained time series of this indicator (iNDVI/RR) in order to identify areas suffering from desertification.

### 3.2. STUDY AREA

Burkina Faso is a landlocked country of West Africa. The northern part of the country is situated in the sahelo-sudanese arid to semi-arid climatic belt (annual rainfall < 750 mm)

while the southern area is part of the sudano-guinean sub-humid zone with annual rainfall above 750 mm (Figure 3.1). Burkina Faso reflects both socio-economic and environmental situations of the Sahelian countries, belongs to the poorest least developed countries of the world, with a very low human development index (0.302 in 2002) (UNDP, 2003; UNDP, 2004), a 3.67% population increase per year over the 1981-2002 period (FAO 2004), up to 83% of rural population (in 2002) totally dependant of their environment (FAO 2004), and a negative trend in annual forest cover change (FAO 2001a).

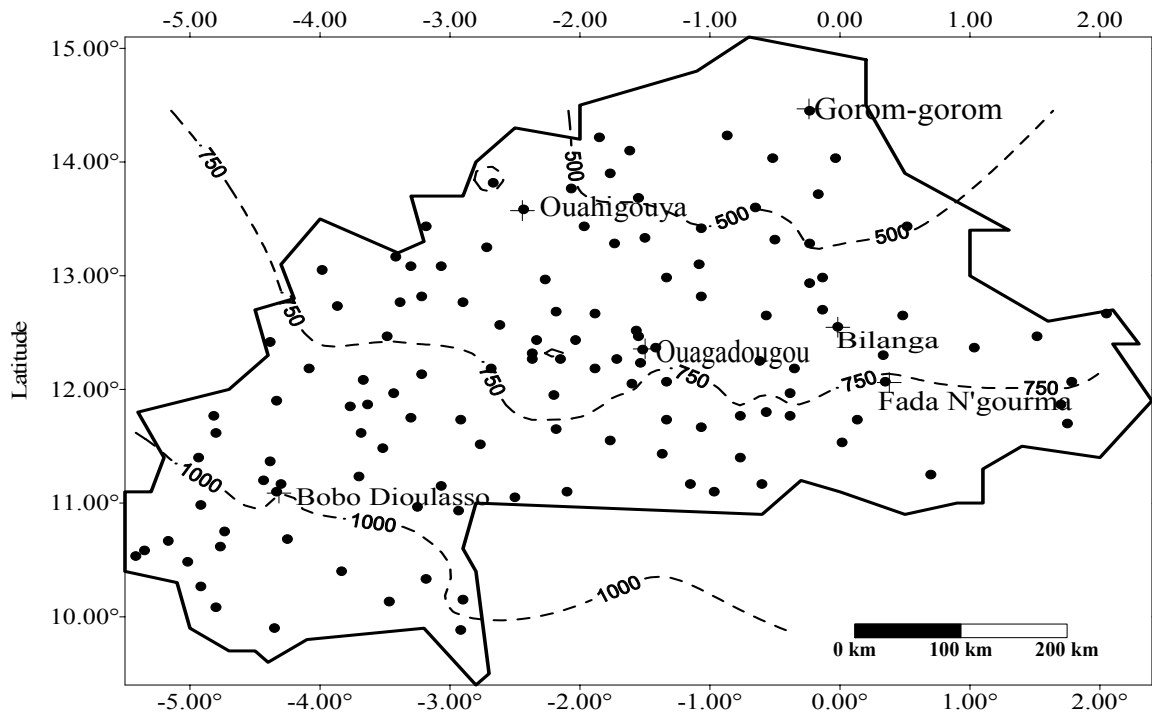


Figure 3.1: Geographical position of the studied stations (black dots) and bioclimatic zones (isohyets defined by kriging on average rainfall value for the 1980-2000 period)

### 3.3. MATERIALS AND METHODS

#### 3.3.1. Meteorological station data

Monthly rainfall data were made available from an archive assembled by the “Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles (AP3A)” of the Centre Régional Agrhymet from station observations. Database includes meteorological stations through the nine countries that grouped in the Inter-States Committee for Drought Control in the Sahel (CILSS). 128 rain gauge with complete monthly rainfall data from 1982 to 1999 were selected in Burkina Faso. The stations repartition according the bioclimatic zones is:

- sahelian zone in the north: yearly rainfall < 500 mm: 12 stations
- sahelo-sudanese zone in the central north: yearly rainfall between 500 and 750 mm: 54 stations
- sudanese zone in the central south: yearly rainfall between 750 and 1000 mm: 45 stations
- sudano-guinean zone in the south west: yearly rainfall >1000 mm: 17 stations

### 3.3.2. Satellite data

For the purpose of studying trends in vegetation greenness, we use the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) with the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). NDVI has proved useful in numerous monitoring studies of vegetation and drought. It is calculated as the normalised difference in reflectance between the red band (0.55  $\mu\text{m}$  - 0.68  $\mu\text{m}$ ) and the near infrared band (0.73  $\mu\text{m}$  – 1.1  $\mu\text{m}$ ). The NDVI is considered to be a “greenness” index. In arid and semiarid region, it is well correlated with such parameters as leaf area index, greenleaf, biomass, vegetation cover, etc. (Nicholson *et al.* 1998).

The NOAA Pathfinder dataset (James & Kalluri, 1994) has been generated from NOAA AVHRR data as 10-day maximum value composites at a 8 km x 8 km pixel resolution. Satellite data cover Africa from 1982 to 2000. Noise levels can be very high over many areas in Africa but are comparatively low over arid to sub-humid areas where cloudiness is limited (Chappell *et al.* 2001). Quality issues of the Pathfinder database are discussed by Prince and Goward (1996). Although satellite data are available from 1982 to 2000, years 1994 and 2000 were not taken into account in this paper. Yet in 1994 there was a lack of data from September to December because of Pinatubo volcanic dust diffusion into the stratosphere (Tanaka *et al.* 1994). For year 2000, Eklundh and Olsson (2003) detected a systematic shift in the remotely sensed data resulting from a very high shifting solar zenith angles.

128 pixels were selected when including a rain gauge station. For all pixels, the NDVI integrals (iNDVI) covering the entire growing season from June to October were computed in order to assess the annual net primary production (Diallo *et al.* 1991; Rasmussen 1998). This approach has been preferred to the use of rasterized rainfall data obtained from satellite estimations, because of stormy features and high spatial variation of sahelian rainfall. Amani and Lebel (1997), exhibit a significant difference in annual rainfall score within a 10 km distance in Niger. This implies that the spatial rainfall variability on a small scale is more significant than on the survey level scale.

### 3.3.3. The ratio of integrated NDVI to rainfall

The net annual increase of biomass, or net primary production, is a measure of the production of an ecosystem. This quantity bears a direct relationship to photosynthesis and NDVI is strongly correlated with both, particularly in arid lands. Le Houérou (1984) suggests that the ratio of primary production to rainfall, NDVI/RR (rain use efficiency) is a better parameter to characterise arid and semi arid regions like the Sahel. For this research, we derived this ratio during the growing season, so that its formulation is equivalent to:

$$\text{iNDVI} / \text{RR} = \sum_{\text{Juin}}^{\text{octobre}} \text{NDVI} / \sum_{\text{mai}}^{\text{octobre}} \text{RR} ,$$

Where RR is the monthly rainfall, and NDVI is the monthly normalised difference vegetation index.

In the Sahel, the dynamic of the vegetation is strongly linked to the rainfall evolution (Hess *et al.* 1996, Nicholson *et al.* 1998, Milich and Weiss 2000a, 2000b, Foody 2003, Symeonakis & Drake 2004). In arid land regions laying in the annual rainfall 200 mm to 1000 mm, the iNDVI/RR ratio is regarded as an useful proxy for rain-use efficiency (Nicholson *et al.* 1990, Davenport & Nicholson, 1989). As mentioned by previous studies in the West African Sahel (Diallo *et al.* 1991, Rasmussen 1998, Prince *et al.* 1998, Diouf & Lambin 2001, Tottrup *et al.* 2004), with spatially comprehensive measurements such as these, the incidence of the individual components of desertification could be detected.

### 3.3.4. Trend analysis

For each station, trends from 1981 through 1999 were estimated by linear regression considering the ratio iNDVI/RR as dependant variable and time (years) as independent variable. The regression slopes were recorded for each station as parameters characterising the global trends either for the rainfall or for NDVI. Moreover, each slope was mapped in five classes indicating strong or weak positive or negative and stable trends, adapting a procedure suggested by Eklundh and Olsson (2003). The regression procedure supplies a Student-t test and its resulting significance p-level to analyse the hypothesis that the slope is equal to 0. This p-level was used as a criterion to define the class boundaries. The trends, for the iNDVI/RR ratio, were labelled as "strong" if the p-level exceeded 0.1 for the one-tailed t-test, "weak" if the p-level is ranged between 0.1 and 0.3 and otherwise "stable" if the p-level is up to 0.3. These long-term linear trends for each pixel in the iNDVI/RR ratio may be understood as a combination of a number of interrelated factors including variations of biophysical and human influences. As the iNDVI/RR ratio is thought to remain stable through time, such trends can be interpreted as a measure of possible degradation or improvement of the vegetation growth.

## 3.4. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.4.1. Rainfall

A preliminary analysis of rainfall data indicates increasing rainfall in Burkina Faso during the studied period (Figure 3.2). Overall, 91.4% of May to October rainfall recorded positive trends over the 1982-1999 period (not shown). In detail, 37.5% and 23.4% of the stations showed a strong and weak positive trend, respectively. A stability characterised 36.7% of the analysed stations, while only 2.4% recorded a weak negative trend.

Such results were expected especially when considering that the drought period culminated in the early 1980s (Nicholson 1985, L'Hôte *et al.* 2002) that is the beginning of the analysed dataset. In addition, these results are in accordance with recent investigations on rainfall variations in the Sahel suggesting that the drought may have ended in the early 1990s (Ozer *et al.*, 2003).

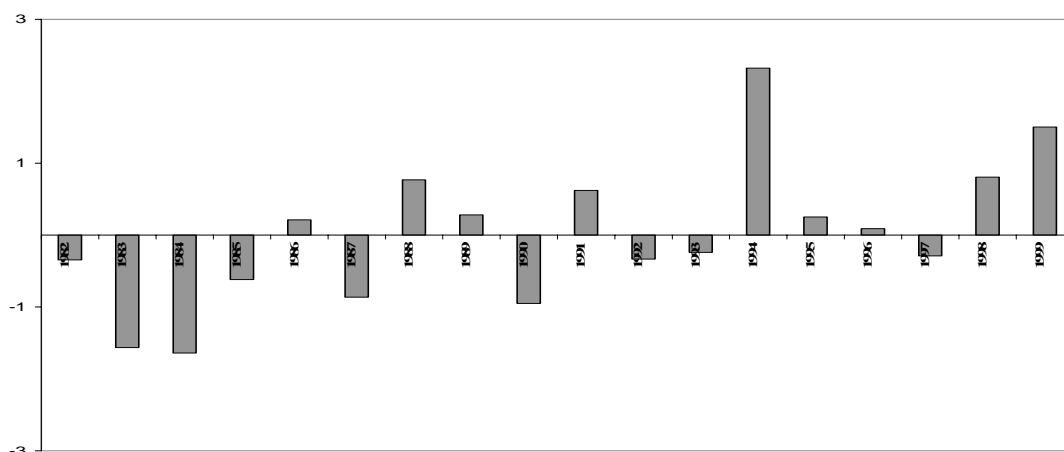


Figure 3.2: Standardised rainfall deviation from the 21-year mean for 128 stations in Burkina-Faso.

### 3.4.2. iNDVI

Over the 128 pixels analysed in Burkina Faso, 73.4% and 13.2% presented a strong and weak positive change in iNDVI, respectively, while it remained stable in 13.3% of cases (not shown). Again, these results are similar to those of Eklundh and Olsson (2003) who observed a strong increase in seasonal NDVI in the Sahel since 1982 interpreted as vegetation recovery from the drought periods of the 1980s. Other detailed studies in Burkina Faso showed that after a long period of strong land degradation (Chamard and Courel 1979, Lindqvist and Tengberg 1994), vegetation recovery was observed during the 1990s (Rasmussen *et al.*, 2001; Pearce, 2002).

Now, an unanswered question remains: is this vegetation recovery fully resilient with increasing rainfall? For this, setting up relationship between rainfall and biomass (iNDVI) and performing trend analysis on the iNDVI/RR ratio could give a response to that question.

### 3.4.3 Rainfall - iNDVI relationship

Separate linear regression models between biomass (iNDVI) and rainfall were computed for all sites surveyed pooled into bioclimatic areas. For each year, the average values of iNDVI and rainfall during the growing season have been calculated and reveal that the rainfall – iNDVI relationship is relatively strong for all years ( $R^2 = 0.82$  in average). This result is in accordance with a previous study, which reported a similar relationship between rainfall and NDVI ( $R^2 = 0.85$ , Malo & Nicholson, 1990). However, this previous study dealt with a larger geographic area, characterised by a greater range of mean annual precipitation (from 10 to 1000 mm) and it covered only 4 years with exceptionally low precipitation. Integrating rainfall during growing season annually, as we have done, may also be causing the relatively high correlation between rainfall and biomass.

Contrary to our results, Prince *et al.* (1998) reported results with a  $R^2=0.52$  between rainfall and net primary production observed for 214 sahelian sites over 9 years.

Thus, even though rainfall controls a large part of the spatial and temporal variation in biomass at the regional scale, it is clear that, at the local scale, there is considerable variation in the response of vegetation to rainfall. As suggested by Diouf & Lambin (2001), this could depend on soil type, interannual variations in rain-use efficiency, presence of plant seeds, vegetation communities and floristic composition, land-use practices, and seasonal distribution of rainfall. For the purpose of the present paper, we do not deepen these aspects.

### 3.4.4. iNDVI/RR ratio

Trend classes for change in the iNDVI/RR ratio are summarised in Table 4.1 and the spatial repartition of the concerned stations is mapped in Figure 3.3. Overall, a negative slope is recorded in 84.4% of the 128 analysed stations, while the remaining stations (15.6%) are characterised by a positive trend. Detailed analysis shows that, for all considered stations, most areas (57.8%) remained stable during the 1982-1999 period. However, 16.4% and 23.4% presented a strong and weak negative change, respectively. Only, 2.4% showed a weak positive trend. About 40% of the analysed stations have therefore experienced decreasing trends in the iNDVI/RR ratio that may reflect possible degradation of the vegetation growth, and therefore ongoing desertification processes. The geographical distribution of downward weak to strong trends is fuzzy and may indicate localised land degradation processes in some places while few others may experience improved land management.

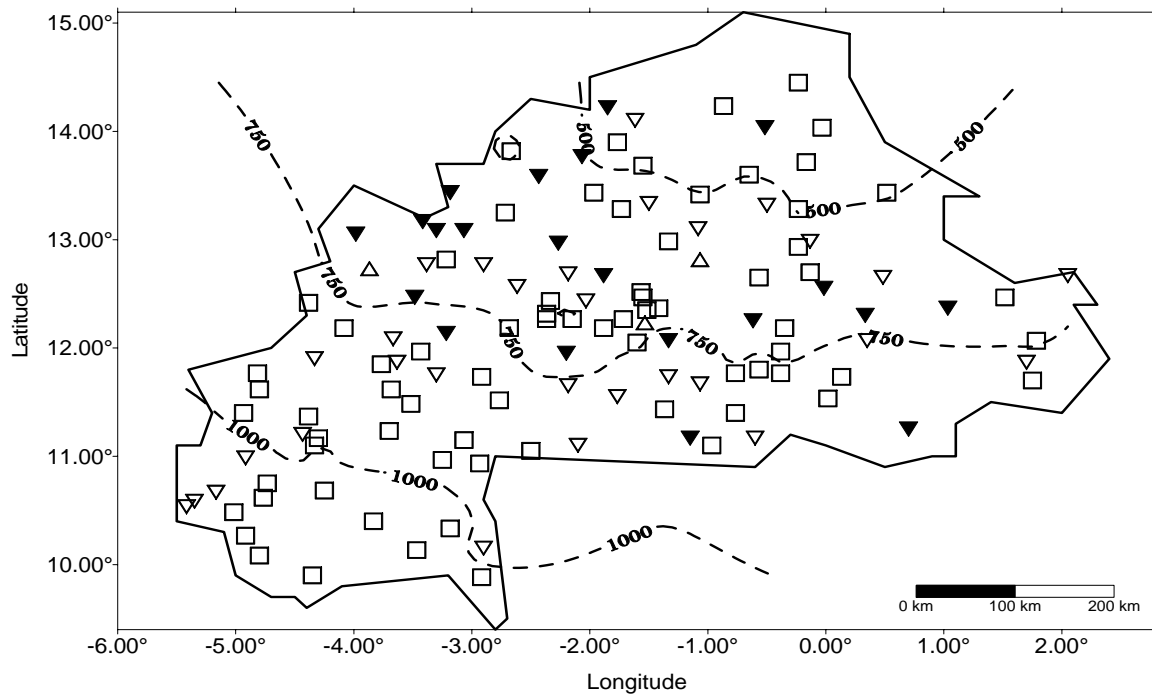


Figure 3.3: Trends in the iNDVI/RR ratio during the growing season (May-October) for 128 stations in Burkina Faso (1982 to 1999). Legend: ▼: strong negative change; ▽: weak negative change; □: stable; △: weak positive change

Differences in changes are highlighted when considering phytogeographic areas of Burkina Faso (Figure 3.4). In the sahelian belt (<500 mm in annual rainfall), 75% of the stations presented a relative stability, 8.3% showed a weak negative change and 16.7% strongly decreased. The sahelo-sudanese zone in the central north seems to have been the most affected by land degradation as vegetation resilience to rainfall is the lowest among all phytogeographic areas of Burkina Faso. Yet, less than a half (46.3%) of the 54 stations included in this region show a stable iNDVI/RR ratio, while 27.8% experienced a strong negative trend and 20.4% a weak negative change. However, it is worth mentioning that this region includes the only stations of Burkina Faso that display a weak positive change (5.5%). In the sudanese zone in the central south (750-1000 mm), 60% of the stations appeared to be stable, while 8.9% and 31.1% suffered from a strong and weak negative change, respectively. In a wetter environment, the sudano-guinean zone was mostly stable (76.5%) and 23.5% of the considered stations were subjected to a weak negative change. However, the obtained results in this southern region should be taken with precautions as previous studies mentioned that the relationship between NDVI and rainfall tends to weaken when annual rainfall is higher than 1000 mm. As primary production remains relatively constant, water being not a major limiting factor (Nicholson *et al.* 1990, Davenport & Nicholson 1989).

Such contrasting evolutions along the bioclimatic gradients of Burkina Faso are in accordance with recent findings of Hiernaux and Turner (2002). These authors stated that risks of environmental degradations are moderate and mainly climate-driven in pastoral systems at the drier edge, while they are serious and mainly management-driven in the crop-livestock systems of the sahelo-sudanese zone.

Table 3.1: Trend of the iNDVI/RR ratio in Burkina Faso (1982-1999)

Phytoclimatic zones (isohyets boundary)	Number of studied stations	Slopes				Trends significance							
		Negative slope	%	Positive slope	%	Strong negative change (p<0.1)	%	Weak negative change (0.1<p<0.3)	%	Stable (p>0,3)	%	Weak positive change (0.1<p<0.3)	%
P<500 mm	12	10	83.3	2	16.7	2	16.7	1	8.3	9	75.0	0	0
500<P<750 mm	54	43	79.6	11	20.4	15	27.8	11	20.4	25	46.3	3	5.5
750<P<1000 mm	45	42	93.3	3	6.7	4	8.9	14	31.1	27	60.0	0	0
P>1000 mm	17	13	76.5	4	23.5	0	0	4	23.5	13	76.5	0	0
TOTAL	128	108	84.4	20	15.6	21	16.4	30	23.4	74	57.8	3	2.4



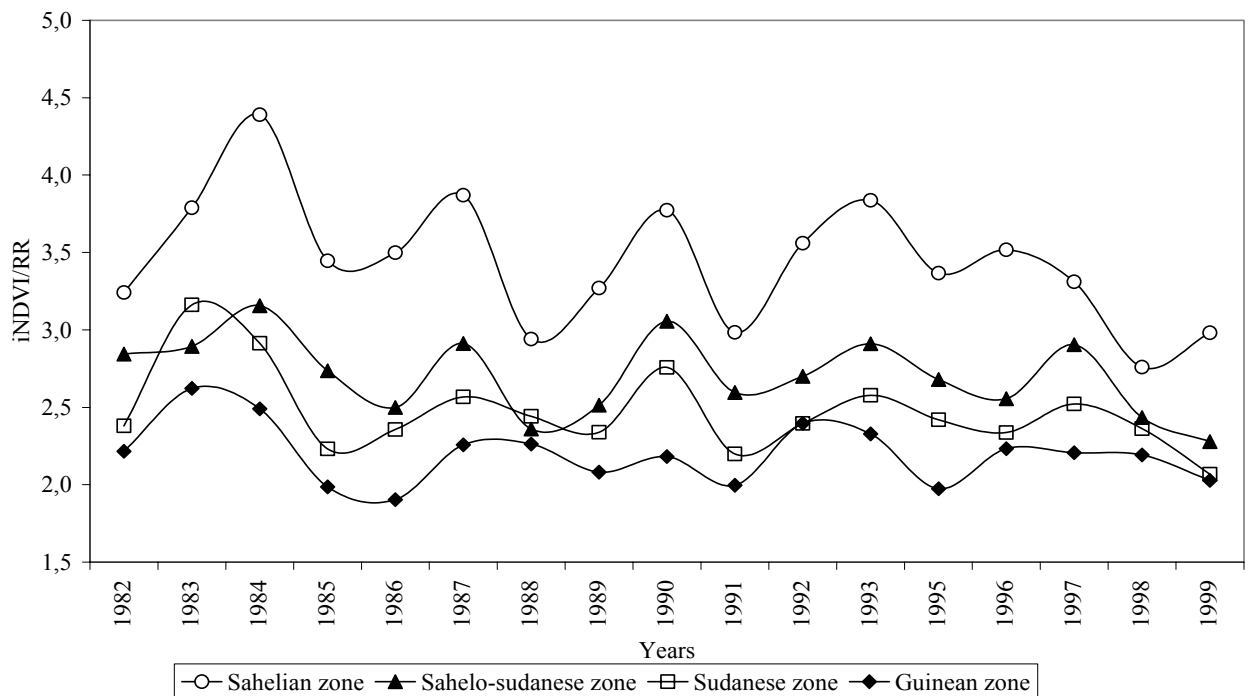


Figure 3.4: Annual ratio of integrated NDVI to rainfall during growing season (may to October). The sites were pooled with 1980-2000 rainfall means.

Our results indeed show that 75% of the stations remained stable in the northern part of the country, while about half of the analysed stations suffered from strong or weak negative changes in the sahelo-sudanese zone in the central north. As a matter of fact, Henry and colleagues (2003) showed that migration flows from the northern ecologically marginal Provinces of Burkina Faso to the sahelo-sudanese zone were partly explained by unfavourable environmental variables such as high rainfall variability, land degradation, and land availability at the origin, and favourable conditions at the destination for these variables. For this reason, there is currently less pressure in the northern part of Burkina Faso as people migrated because of the drought while migrations are likely to contribute to negative environmental changes at the destination (Lambin *et al.* 2001).

Recent claims that the Sahel is greening since the 1990s because of improved land management (Mazzucato & Niemeijer 2000, Rasmussen *et al.* 2001, Niemeijer & Mazzucato 2002, Pearce 2002, Eklundh & Olsson 2003) may be only partly true. As an example, Mazzucato & Niemeijer (2000) closely studied two small areas (Bilanga and Fada-N’Gourma) in Eastern Burkina Faso and suggested that these areas showed no evidence of land degradation as crop yields increased. Our results on these two stations indeed show that if the iNDVI presented positive slopes, the iNDVI/RR ratio experienced a strong negative change in Bilanga and a weak negative change in Fada-N’Gourma, suggesting that the rain-use efficiency of the vegetation has been declining over the last two decades (Figure 3.5 & 3.6). In northern Burkina Faso (Gorom-Gorom), Rasmussen *et al.* (2001) suggested that desertification was in reverse demonstrating that vegetation was reclaiming fossil dunes revitalised during the droughts of the 1970s and 1980s. Our results at this station (Figure 3.7) suggest that the iNDVI strongly increased and that the iNDVI/RR ratio remained stable during the 1980s and 1990s. In this specific case, it can be accepted that the vegetation is resilient with the rainfall increase observed during the last decade.

As mentioned above, many biophysical and human influences may interfere in the evolution of the iNDVI/RR ratio. Increasing use of fertilisers, better water resources management and land rehabilitation measures have improved over the years. But despite such positive technical evolutions, only three stations out of 128 recorded a weak positive change the iNDVI/RR ratio over the 1982-1999 period. Another interference in the evolution of the iNDVI/RR ratio may be attributed to climate change due to the ongoing build-up of greenhouse gases. In many regions of the world, extreme precipitation events have significantly increased during the last decades (Houghton *et al.* 2001, Kunkel 2003, Roy & Balling 2004). Although no research on this topic is available in West Africa, a large increase in floods due to excess precipitation in short time periods has been observed lately that may suggest an increasing tendency in extreme precipitation events (Sene & Ozer 2002). If this trend was confirmed, then the iNDVI/RR ratio may be negatively affected as extreme daily precipitation can not be fully used by vegetation and can further cause erosion and soil crusting.

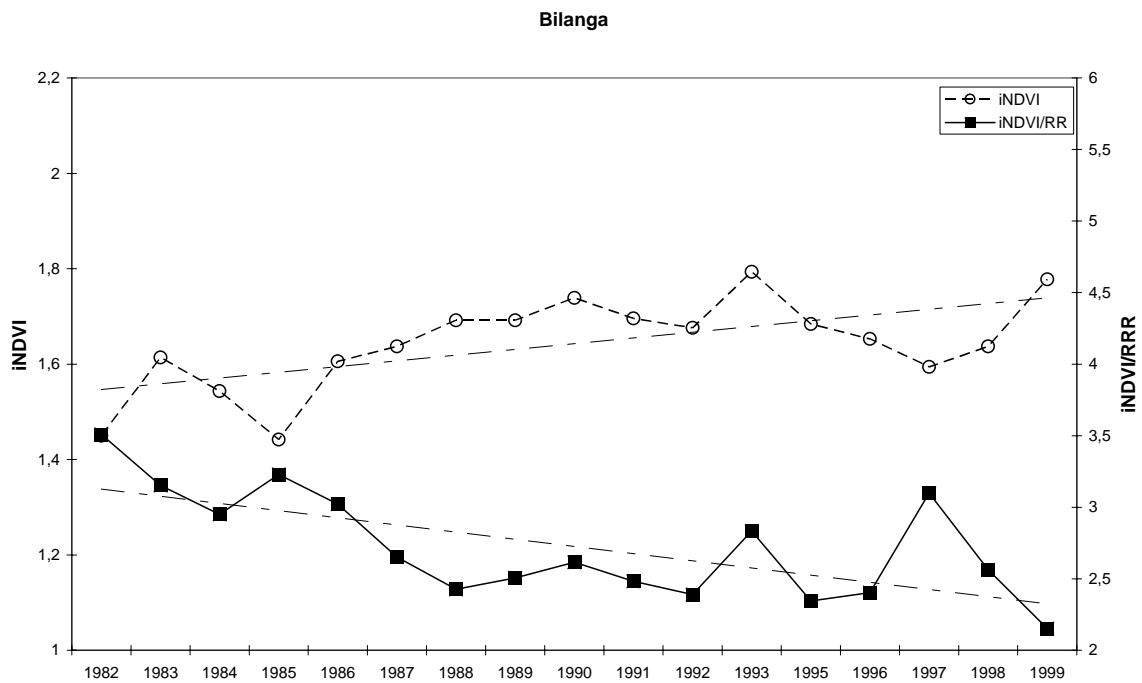


Figure 3.5: Interannual variability of integrated NDVI and iNDVI/RR ratio as a proxy of Rain Use Efficiency at Bilanga site (Eastern Burkina Faso).

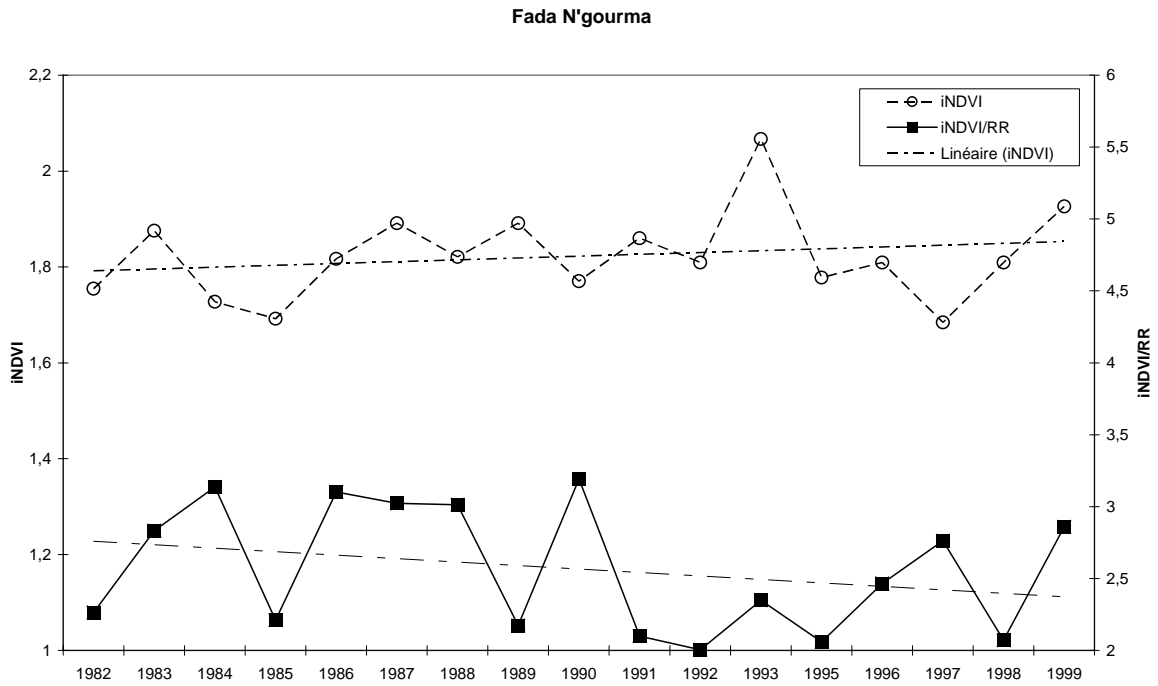


Figure 3.6: Interannual variability of integrated NDVI and iNDVI/RR ratio as a proxy of Rain Use Efficiency at Fada N'gourma site (Eastern Burkina Faso).

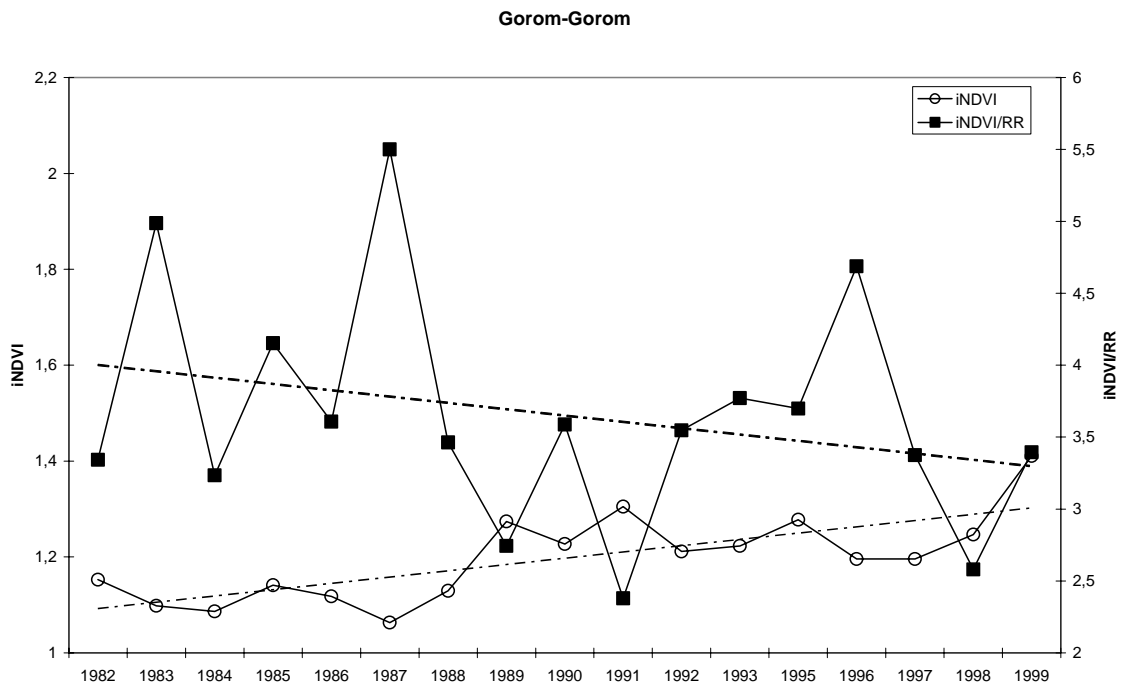


Figure 3.7: Interannual variability of integrated NDVI and iNDVI/RR ratio as a proxy of Rain Use Efficiency at Gorom-gorom site (Northern Burkina Faso).

### 3.5. CONCLUSION

Based on observations of increased crop yields and/or NDVI, recent studies have stated that desertification in the African Sahel was in reverse. However, using trends in the iNDVI/RR ratio, our results suggest that about 40% of the analysed stations of Burkina Faso may have experienced ongoing desertification processes during the 1982-1999 period. Our findings present an environmental situation that is probably more gloomy than recent papers stated although we are far from the concept of irreversible land degradation that was so fashionable until recently.

Such approach could be used to monitor land degradation in other arid and semi-arid and sub-humid regions of the world (<750 mm). However, the use of iNDVI/RR as a desertification indicator in wetter environment may not be valid because primary production remains relatively constant, and water is not a major limiting factor anymore.

Otherwise, longer time series could be developed by combining low resolution satellite data of different sensors, such as NOAA-AVHRR for the 1982-1999 period and SPOT-VEGETATION from 2000 onwards. Finally, obtained results could be a starting point for the identification of hot-spots areas to determine where to take actions to combat desertification at national scale as it is recommended in the United Nations Convention to Combat Desertification.

### 3<sup>e</sup> Partie

#### DIAGNOSTIC DE L'ETAT DU COUVERT LIGNEUX ET ANALYSE DE SON EVOLUTION EN ZONE SOUDANIENNE

---

*Le caractère saisonnier de la végétation tropicale est un critère important de classement et une caractéristique écologique fondamentale. Les résultats présentés dans les chapitres précédents (Chapitres 2 & 3) ont permis d'identifier quelques contraintes liées à la fois, à la résolution spatiale des données Pathfinder du capteur AVHRR et aux caractéristiques écologiques des zones subhumides. En effet, à la résolution kilométrique, l'indice de végétation calculé à partir des données basse résolution reste insuffisant pour caractériser les paysages complexes des zones semi-arides du domaine soudanien. L'étude des variations interannuelles de l'indice de végétation normalisé dans les zones subhumides (soudanienne et guinéenne) a montré en ce qui concerne le couvert végétal, une saturation rapide du NDVI pour des conditions pluviométriques dépassant 900 mm. Par ailleurs, la faible résolution spatiale des données Pathfinder n'autorise pas une interprétation détaillée souvent nécessaire. Ainsi, il n'est pas possible de séparer les surfaces de cultures des milieux naturels. Malgré l'avantage d'une bonne couverture spatiale que procurent les données à basse résolution, elles ne permettent pas la détermination précise du type de dégradation dont il s'agit (origine naturelle ou anthropique). On ne saurait donc se prononcer de façon objective sur le type d'unité d'occupation du sol qui subit des changements ou non, ni estimer la proportion et l'amplitude des changements observés. Les deux prochains chapitres qui composent cette partie de notre étude suggèrent des alternatives méthodologiques aux contraintes techniques ci-dessus évoquées. Basée sur une démarche prospective, ils visent à montrer l'importance de la prise en compte des paramètres stationnels des unités végétales suivant les subdivisions éoclimatiques de la zone soudanienne humide, dans une perspective d'appréciation de leur état et d'une évaluation quantitative des changements spatiaux qui les affectent..*

---

## CHAPITRE 4

### DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION DES PEUPELEMENTS LIGNEUX EN ZONE SOUDANIENNE : CAS D'ÉTUDE AU NORD AU BENIN

---

HOUNTONDJI, Y.C., SOKPON, N., & OZER, P.

(A soumettre)

#### RÉSUMÉ

En vue d'apprécier l'état du couvert ligneux au Nord du Bénin, des mesures *in situ* ont été effectuées au sein des formations forestières libres (forêts villageoises) dans trois secteurs phytogéographiques choisis suivant un gradient climatique. Une caractérisation structurale et écologique des différentes phytocénoses a été effectuée afin d'identifier les principaux groupements fonctionnels des faciès ligneux étudiés au niveau de chaque secteur et d'apprécier leur niveau de dégradation. Les relevés effectués ont permis de constituer une matrice de placettes d'inventaire prenant en compte des paramètres structuraux (surface terrière, densité), la diversité spécifique des peuplements et des paramètres stationnels (types de perturbations, intensité des perturbations). L'analyse multi-variée exécutée a montré que les formations ligneuses de la zone sud-soudanienne (Z3) se distinguent nettement ( $p < 0.0001$ ) de celles des deux autres zones [nord-soudanienne (Z2) et soudano-sahélienne (Z1)] qui n'exhibent pas de différence significative entre elles. La surface terrière et la richesse spécifique des peuplements constituent, à ce niveau d'investigation, les paramètres qui permettent une nette différenciation de l'état des formations ligneuses au niveau des zones phytogéographiques. L'analyse canonique discriminante exécutée a permis de mettre en évidence l'existence d'un gradient de productivité des formations ligneuses, de la zone sud-soudanienne vers la zone soudano-sahélienne. Cette situation se traduit par une diversité des types de formations denses et boisées de la zone Z3, alors que les zones Z2 et Z1 sont surtout marquées par des formations savanicoles et arbustives à faible productivité ligneuse. Au gradient de productivité s'oppose un gradient de perturbation suggérant ainsi une dégradation plus prononcée des formations ligneuses des zones soudano-sahélienne et nord-soudanienne comparativement à celles de la zone sud-soudanienne. A la lumière des résultats obtenus, il ressort que la dégradation du couvert ligneux dans l'ensemble de la zone d'étude s'explique surtout par les facteurs anthropiques (agriculture extensive, exploitation sélective des essences de valeur, élevage, ...). A cela s'ajoute la crise énergétique qui affecte les populations (rurales et urbaines) des zones semi-arides qui utilisent exclusivement les ressources ligneuses comme source d'énergie domestique.

#### 4.1. INTRODUCTION

L'une des caractéristiques principales des milieux semi-arides est la précarité de leurs conditions environnementales qui fragilisent les écosystèmes. Tout particulièrement, la strate arborée est soumise à une pression croissante liée à la demande en bois de feu, à l'extension des surfaces cultivées, au surpâturage et aux brûlis. En Afrique de l'Ouest, dans les systèmes traditionnels d'exploitation agricole, les enjeux de la conservation du patrimoine forestier dépassent largement le cadre de la crise énergétique liée aux ressources ligneuses. La dégradation des formations ligneuses se traduit en outre en termes de dégradation des sols avec les corollaires d'accélération du cycle de l'eau et des modifications sensibles des microclimats (FAO, 2005). Au niveau local, cette évolution correspond à une détérioration des conditions de production. Le phénomène prend une allure critique dans les régions soudano-sahéliennes où la convergence de plusieurs facteurs de dégradation confère à ce processus une dynamique qui échappe aux méthodes conventionnelles de collecte et de traitement de données.

Le Bénin, à l'instar des pays de la sous-région ouest-africaine, subit depuis quelques décennies une baisse pluviométrique (Hountondji & Ozer, 2008) et des pressions de plus en plus importantes sur les ressources naturelles. Les effets combinés de la croissance démographique (3,25% entre 1979 et 2002, INSAE, 2003) et des perturbations climatiques affectent le système bio-productif et induisent, par endroits, la dégradation des terres qui se manifeste sous différentes formes suivant le milieu et les systèmes de production adoptés. Par rapport à l'ensemble du pays, le Nord du Bénin concentre 92,5% de la couverture forestière nationale. Aussi est-il apparu que la zone septentrionale du pays, en dépit de la faible densité de population (18 habitants / km<sup>2</sup> en moyenne, Sokpon *et al.*, 2006) subit des changements rapides au niveau du couvert végétal, mettant à jour des paysages de plus en plus dégradés. Dans ce contexte de pression anthropique soutenue, les peuplements ligneux forestiers se trouvent dans une dynamique régressive. L'état de régression est souvent d'autant plus accentué que les espèces se trouvent dans des conditions climatiques précaires. La recherche de solutions à la régression des formations ligneuses naturelles passe d'abord par une meilleure compréhension des mécanismes de diminution du couvert ligneux et l'évaluation de son ampleur. Cette tâche nécessite, à différentes échelles géographiques, l'utilisation d'indicateurs ayant les capacités de révéler les changements observés aussi bien dans le temps que dans l'espace.

#### 4.2. OBJECTIFS

L'idée de base de cette recherche s'appuie sur le besoin à la fois d'une évaluation quantitative du couvert végétal et de l'identification des aires de ligneux (hors zones protégées) subissant une évolution rapide. Il s'agit pour nous d'identifier des descripteurs quantitatifs de la répartition spatiale des ligneux, en vue d'opérer des mesures systématiques, et permettre une comparaison de l'état du couvert ligneux en fonction du gradient climatique dans la zone tropicale sèche au Nord du Bénin.

#### 4.3. METHODES

##### 4.3.1. Région d'étude

L'aire d'investigation couvre le nord-est du territoire béninois (Figure 4.1) entre 9°00' et 12°25'N. Cette région appartient majoritairement au domaine soudanien et est caractérisée par un régime pluviométrique unimodal avec un gradient septentrional allant de 1200 mm à 900

mm. L'ensemble de la zone englobe deux départements du nord-Bénin (le Borgou et l'Alibori) et concentre environ 61% de la couverture forestière nationale (26537,55 km<sup>2</sup> pour tout le Bénin). La population de la zone est estimée à 1.246085 habitants en 2002 (INSAE, 2003) et la majeure partie de cette population (environ 78,3%) vit en milieu rural et dépend directement des ressources naturelles pour ses besoins quotidiens.

L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités et sont pratiqués de façon extensive. Les sols ferrugineux tropicaux sont très fréquents dans la région tandis que les autres types de sols sont très faiblement représentés et très localisés. La végétation est dominée par des savanes parsemées d'îlots de formations forestières claires et sillonnées par des forêts galeries. Ces formations savanicoles sont fréquemment parcourues par les feux de brousse en saison sèche. Du point de vue climatique, on observe au cours de l'année deux saisons nettement contrastées, l'une sèche de sept mois environ et l'autre humide qui dure en moyenne de juin à octobre. Selon l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (1995), la région d'étude est subdivisée en trois zones dont les principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.1 : Caractéristiques de zones agroécologiques du nord-est du Bénin  
(Adapté de : INRAB, 1995)

ID	Dénomination	Types climatiques	Précipitations moyennes (mm)	Période de croissance végétale (jours)	Communes concernées
Z 1	Zone de l'extrême nord du Bénin	Soudano-sahélien	700-900	140	Karimama, Malanville
Z 2	Zone cotonnière du nord-Bénin	Nord-Soudanien	900-1100	120-140	Banikoara, Gogounou, Kandi, Ségbana
Z 3	Zone vivrière du sud-Borgou	Sud-Soudanien	1100-1200	160-220	Bembereke, Kalalé, Ndali, Nikki, Pèrèrè, Sinendé

### 4.3.2. Echantillonnage et relevés

Partant des informations synthétisées dans le document du Programme National de Lutte contre la désertification (PAN/LCD, 2000) et des rapports techniques portant sur la dégradation des sols et des ressources végétales au Bénin, un référentiel cartographique des zones d'intérêt a été synthétisé à partir de la carte de végétation du Bénin au 1/100000 élaborée par le Centre National de Télédétection (CENATEL, 2002). Ensuite, sur la base des subdivisions agroécologiques, trois communes du Bénin septentrional ont été retenues : il s'agit des communes de Malanville, Kandi et Bembèrèkè (figure 4.1).

Des inventaires floristiques et sylvoles ont été réalisés à la fin de la saison des pluies (entre novembre et décembre) au cours de trois campagnes de terrain successives en 2004, 2005 et 2006. Les prospections ont lieu en suivant les axes routiers principaux et secondaires donnant accès aux localités dans les communes retenues.



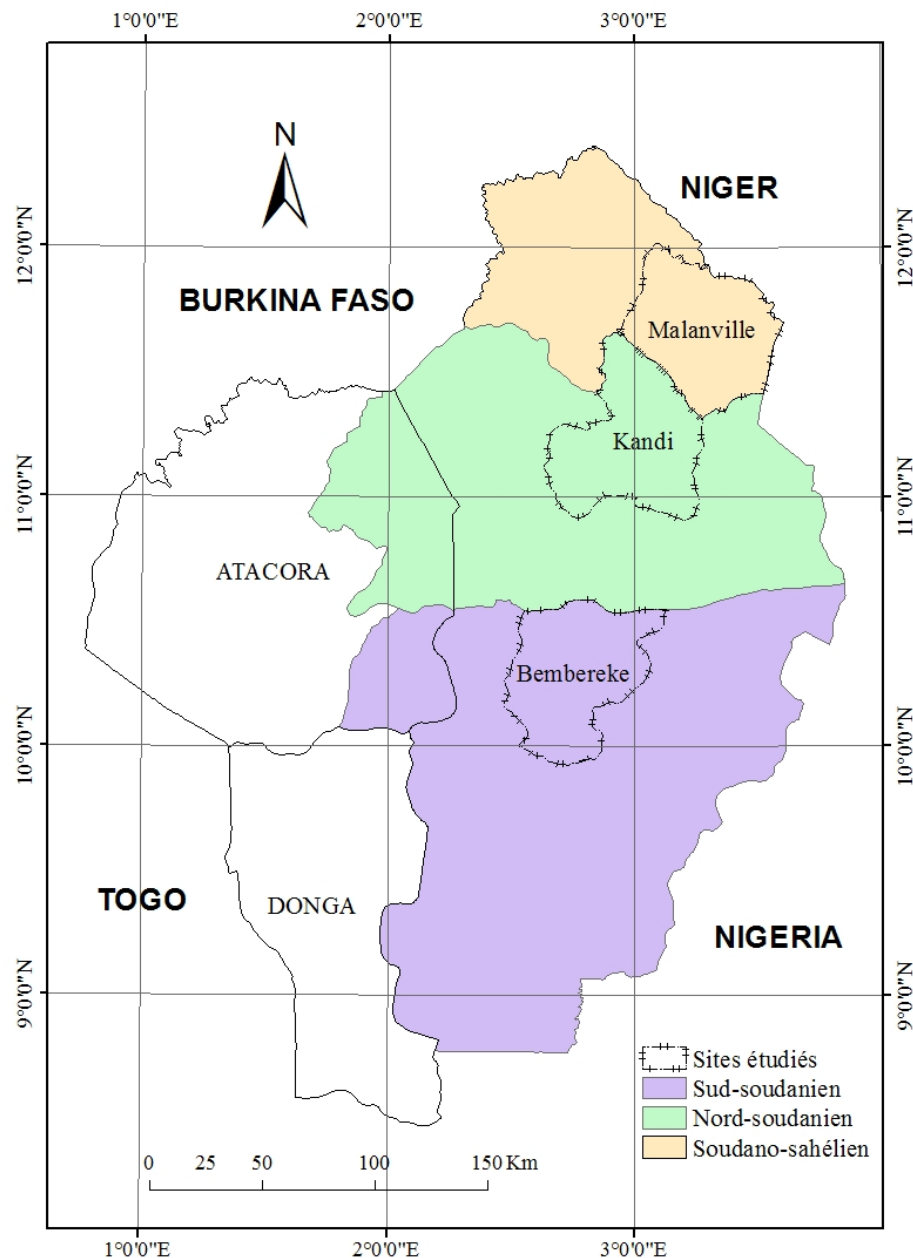


Figure 4.1 : Localisation des sites d'étude au sein des zones climatiques du Nord – Bénin

Avec le concours de l'agent forestier en poste dans la zone, des visites ont été organisées en vue de l'identification et de la localisation des formations naturelles et de celles en proie à la dégradation. Ces dernières sont reconnaissables par l'absence de l'une ou l'autre des strates au niveau de la canopée des arbres, la forte homogénéité floristique et l'emprise agricole par endroits. Dès lors, le nombre de placettes installées a été modulé et réadapté sur le terrain en fonction des caractéristiques physionomiques et floristiques des formations végétales. Deux modes d'échantillonnage ont été adoptés :

- ▶ *Au sein des formations fortement dégradées* : l'installation des placettes de relevés s'est effectuée de manière intuitive. Ce mode opératoire est justifié par la forte homogénéité floristique et structurale qui caractérise ces peuplements déstructurés. Dès lors, un maximum de trois placettes par strate a été retenu eu égard aux travaux antérieurs effectués dans la zone (Sokpon *et al.*, 2004) qui ont montré que des relevés supplémentaires n'apportent aucune

information complémentaire pour la discrimination, l'individualisation et la caractérisation des faciès dégradés.

► *Au sein des formations peu dégradées* : l'emplacement des relevés s'est effectué en respectant les notions d'homogénéité et de représentativité suggérées par Gounot (1969). D'après cet auteur, quand une aire paraît hétérogène, c'est souvent parce qu'elle comprend plusieurs milieux différents, étroitement imbriqués, qui constituent une mosaïque de plusieurs «éléments». L'homogénéité structurale est définie essentiellement par les discontinuités observées dans le plan horizontal de la communauté végétale et correspond à l'élément structural.

Des transects ont donc été effectués dans chaque formation végétale, soit dans le sens de la plus grande dimension de cette formation, soit perpendiculairement à la pente existante ou la piste d'accès. Des placettes de forme circulaire de 1000 m<sup>2</sup> (rayon = 17,85m), ont été installées le long du transect. Une distance minimale de 200 m entre les centres des placettes d'un même transect fut observée dans le souci de permettre une bonne répartition des points de relevés dans les différentes unités végétales présentes. Toutefois, dans les galeries forestières, la largeur de la bande de végétation étant généralement inférieure à 20 m, des placettes rectangulaires de 1000 m<sup>2</sup> (100 m X 10 m) séparées par une distance minimale de 50 m ont été installées le long des cours d'eau. Signalons que nos relevés ont été complétés par des relevés d'inventaires floristiques et sylvicoles réalisés dans la zone en 2005 et 2006 par le Laboratoire d'Etudes et de recherche Forestières (Faculté d'agronomie, Université de Parakou) pour le compte du Projet de Gestion des Forêts et Terroirs Riverains (PGFTR). Sur l'ensemble des sites ayant fait l'objet d'inventaires, les coordonnées des points de vérification ont été enregistrées grâce au système global de positionnement (GPS) avec une erreur théorique maximale de 10 mètres. Ces points de contrôle ont été pris au niveau de l'arbre central de chaque placette qui, à cet effet, a été marqué à la machette. Au total 181 placettes de 1000 m<sup>2</sup> ont été inventoriées dans les localités prospectées. Leurs répartitions par zone et par strates échantillonnées sont présentées au tableau 4.2

Tableau 4.2 : Relevés effectués par type de formation végétale dans les trois zones étudiées.

<b>Zones bioclimatiques</b> (Commune étudiées)	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Types de formations</b>	(Malanville)	(Kandi)	(Bembêrêkè)	TOTAL
Forêt galerie (FG)	-	-	10	10
Forêt dense (FD)	-	6	6	12
Forêt claire (FC)		6	16	22
Savane Boisée (SB)	9	6	12	27
Savane arborée (SA)	9	6	18	33
Savane à emprise agricole (SE)	9	6	5	20
Savane saxicole (SX)	-	-	21	21
Savane arbustive (SI)	6	9	21	36
<b>Total des relevés</b>	<b>33</b>	<b>39</b>	<b>109</b>	<b>181</b>

La plupart des espèces végétales ont été identifiées directement sur le terrain à partir des flores de Berhaut (1967), Aubreville (1950) et Hutchinson & Dalziel (1954), de même que le guide des adventices de l'Afrique de l'ouest (Akobundu & Agyakwa, 1989). Ces identifications ont ensuite été confirmées par détermination comparative avec les échantillons herborisés au niveau des herbiers de référence du Laboratoire d'Etude et de Recherche Forestière (Faculté d'Agronomie, Université Parakou) et à l'Herbier National (Université d'Abomey-Calavi). L'inventaire floristique a été réalisé selon la méthode classique de Braun - Blanquet (Gounot, 1969).

Pour chaque relevé, la stratification, la présence, l'abondance-dominance, le recouvrement moyen des espèces végétales, et les types de sols ont été notés. Ces observations sont complétées par les mesures des diamètres à 1,30 m au dessus du sol (Diameter at Breast Height : dbh) et les hauteurs des arbres et arbustes (dbh  $\geq$  10 cm) ainsi que le comptage de la régénération (dbh < 10 cm).

La densité des arbres a été calculée, d'une part, pour le peuplement arborescent (dbh  $\geq$  10 cm) et d'autre part, pour la régénération (1 cm  $\leq$  dbh < 10 cm). La régénération étant par convention, l'ensemble des ligneux (semis naturels, rejets de souches et drageons) ayant un dbh compris entre 1 et 10 cm. Pour cette étude, seules les espèces ligneuses atteignant au moins 1,30 m de hauteur et dont le diamètre est compris entre 1 et 10 cm ont été comptées dans la régénération.

La diversité spécifique du peuplement ligneux, (arbres et arbustes de dbh  $\geq$  10 cm) de chaque groupement a été étudiée sur la base de la richesse spécifique (RSP) qui représente le nombre total d'espèces observées.

La surface terrière des peuplements (STC) définie comme la somme des sections transversales des arbres mesurées à 1,30 m au-dessus du sol ou le cas échéant à 30 cm au-dessus des contreforts, a été calculée suivant la formule :

$$STC (m^2 / ha) = \frac{10000 \pi}{4s} \sum_{i=1}^n d_i^2$$

Avec :  $d_i$  : diamètre (en mètre) de l'arbre  $i$  sur la placette et  $s$  (1000 m<sup>2</sup>).

Les diverses observations relevées dans les placettes ont été complétées par des paramètres stationnels tels :

- ▶ Le type de perturbation : il s'agit d'une appréciation qualitative du principal facteur de dégradation de la végétation. Nous distinguons trois modalités : Emprise agricole et feux de végétation (EA) ; Exploitation de bois (EB) ; Pâturage (PT).
- ▶ L'intensité des perturbations: elle est exprimée en terme de la surface de chaque placette touchée par la perturbation. Nous distinguons trois niveaux de sensibilité : Faible : INT < 25% ; Moyen : 25 < INT  $\leq$  50% ; Fort : INT > 50 %

### 4.3.3. Traitement des données

#### 4.3.3.1. Analyses multivariées

Eu égard à la diversité des phytocénoses rencontrées sur les sites prospectés ainsi qu'à la multitude des paramètres relevés sur les formations végétales, il s'avère judicieux d'opter pour une méthode d'analyse statistique qui puisse tenir compte de cette complexité. A cet effet, diverses techniques relevant des méthodes d'analyses multi-variées ont été appliquées. Il s'agit d'un ensemble de méthodes statistiques adaptées à l'analyse de l'organisation de l'espace géographique et de ses différenciations. L'utilisation de ces techniques nécessite une organisation un peu systématique de l'information géographique sous la forme d'une matrice d'informations spatiales. L'espace analysé est découpé en un ensemble d'unités élémentaires (*les individus spatiaux*), chacune décrite par une série d'indicateurs (*variables*) relatifs au problème analysé. Dans le cas spécifique de cette étude, différentes méthodes relevant des techniques d'analyses multivariées ont été exécutées dans le but d'apprécier les similarités et/ou différences existant entre les secteurs écogéographiques étudiés (en se basant sur les types de formations dominantes), de caractériser ces derniers par un cortège de paramètres environnementaux (dendrométriques, écologiques et stationnels) puis de sélectionner les

paramètres environnementaux les plus pertinents qui reflètent au mieux les différences notées au niveau des formations dans les zones choisies.

#### 4.3.3.2. Analyse discriminante

Il s'agit d'une famille de techniques destinées à décrire et à classer des individus caractérisés par un nombre important de variables numériques. L'origine de cette méthode remonte aux travaux de Fisher (1936) et de Mahalanobis (1936). La méthode utilisée dans la présente étude est une Analyse Canonique Discriminante. Il s'agit d'un cas particulier de l'analyse canonique entre un groupe de variables quantitatives (paramètres dendrométriques et stationnels) et des variables qualitatives (zones bioclimatiques, formations végétales). Cette méthode permet de discriminer non pas directement les zones ou les formations végétales, mais les différences entre les zones ou les types de formations ligneuses en tenant compte de la variabilité intra et inter classe des différents paramètres pris en compte dans l'analyse. Le logiciel SAS ® (Statistical Analysis System) offre la possibilité d'effectuer l'analyse discriminante canonique grâce à la procédure « CANDISC ». Il s'agit d'une technique de réduction des dimensions, qui crée une « méga-variable » résultant d'une combinaison linéaire de plusieurs variables. Cette combinaison linéaire est faite de telle sorte qu'elle fournisse une séparation maximale entre les groupes (ici secteurs écogéographiques, ou types de formations). Les variables canoniques résument la variabilité entre les classes contrairement aux composantes principales qui résument la variance totale.

#### 4.3.3.3. Sélection des variables discriminantes « Régression pas à pas »

Encore appelée « *stepwise* » en anglais, la régression, dite "*pas-à-pas*" est souvent employée pour "faire le ménage" et sélectionner un nombre réduit de variables qui expliquent pourtant une quantité raisonnable de variation observée dans une analyse multivariée. Cette procédure consiste à prendre en compte les variables l'une après l'autre dans le modèle (selon leur corrélation partielle) par sélection progressive et, à chaque étape, à vérifier si les corrélations partielles de l'ensemble des variables déjà introduites sont encore significatives (une variable qui ne le serait plus serait rejetée), LEBART *et al.*, (1997). La procédure « STEPDISC » du logiciel SAS permet de sélectionner les paramètres les plus efficaces et de n'utiliser qu'eux pour former la variable discriminante. Tous les paramètres sont évalués selon une certaine séquence d'entrée et aussi selon leur contribution à la maximalisation du ratio des variances inter-classes.

#### 4.3.3.4. Individualisation des groupements végétaux

Dans l'aménagement forestier, on a souvent recours à la notion de groupement végétal car la composition floristique détermine beaucoup la structure et le fonctionnement des écosystèmes et l'on devrait en tenir compte pour la formulation d'actions spécifiques d'aménagement. Dans la présente étude, deux techniques ont été utilisées pour l'identification des groupements végétaux décrivant les faciès physiologiques recensés.

- *Cas des formations dégradées* : compte tenu de la forte homogénéité floristique qui les caractérise, nous nous sommes basés sur la surface terrière et la fréquence des espèces arborescentes qui contribuent le plus à la surface terrière totale des placettes représentatives des types physiologiques rencontrés (exemple : savane arbustive à *Combretum collinum* et *Terminalia avicenoides*).

- *Cas des formations peu dégradées* : vu l'hétérogénéité qui caractérise ces types de formations, l'ensemble des relevés phytosociologiques effectués a été soumis à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) pour l'individualisation des groupements végétaux. L'AFC est une technique d'analyse statistique multivariée dont l'intérêt réside dans sa capacité à effectuer un regroupement homogène des relevés sur la base de leur composition floristique (pourcentage de ressemblance). Les relevés sont représentés dans un plan factoriel dont chacun des axes représente un gradient d'un des facteurs du milieu (variables explicatives). Les groupes de relevés homogènes ainsi séparés sont appelés « *groupements* ». Chaque groupement végétal est donc caractérisé par une composition spécifique bien définie dans laquelle les espèces caractéristiques révèlent par leur présence une écologie particulière et autonome. C'est l'une ou les deux principales espèces caractéristiques qui donnent leurs noms au groupement considéré.

## 4.4. RESULTATS

### 4.4.1 Variabilité de la productivité des formations ligneuses en fonction des zones écogéographiques

Les inventaires réalisés sur les formations ligneuses à travers les trois secteurs écogéographiques ont permis de constituer une matrice de 181 relevés. Un traitement préliminaire a consisté à détecter l'existence de similitudes ou de différences entre secteurs en tenant compte de l'ensemble des paramètres mesurés. L'analyse de la variance multivariée a permis de noter des différences hautement significatives entre les trois zones. La description des différences observées a été réalisée grâce à la distance moyenne de Fisher et leur significativité a été évaluée (tableau 4.3). Il en résulte que le secteur sud-soudanien (Z3) se démarque nettement des deux autres secteurs septentrionaux [soudano-sahélien (Z1) et nord-soudanien (Z2)] qui sont assez proches. En d'autres termes, ces deux derniers secteurs présentent pratiquement les mêmes valeurs de paramètres mesurés sur les formations recensées.

Tableau 4.3: Résultats des tests de significativité (p-value) des distances de Fisher calculées entre secteurs écogéographiques

	Z1	Z2	Z3
Z1	1	0.260	< 0.0001
Z2	0.260	1	< 0.0001
Z3	< 0.0001	< 0.0001	1

Ce résultat pourrait s'expliquer principalement par le gradient climatique régional qui conditionne la distribution spatiale des types de formations ligneuses en fonction des zones phytogéographiques. En effet, les zones étudiées sont marquées par des régimes climatiques caractérisés par une aridité croissante et une diminution graduelle des précipitations moyennes allant de 1200 mm/an dans la zone sud-soudanienne (Z3) à 900 mm/an dans la zone soudano-sahélienne (Z1). La pluviosité, combinée aux autres facteurs mésologiques tels la durée de la saison sèche, l'importance relative des précipitations durant la période sèche, l'hygrométrie atmosphérique de même que le gradient altitudinal, seraient donc autant de facteurs déterminant la présence ou non des grands ensembles physiologiques de la végétation dominant le paysage. Nos observations directes sur le terrain nous ont permis de constater qu'au gradient climatique existant se superpose un gradient phytoclimatique qui se traduit par la présence par endroits de nouveaux faciès ligneux, lorsqu'on évolue de la zone

sahélo-soudanienne vers la zone sud-soudanienne. Ces résultats corroborent les travaux antérieurs réalisés dans la sous région [Hall & Swaine (1976), Hall & Swaine (1981), Van Rompaey (1993), Van Rompaey & Oldeman (1997), Bongers *et al.*, (2004), Tchouto (2004), Adomou (2005)]. Ces auteurs ont mis en évidence l'existence d'un gradient environnemental dans la distribution spatiale des formations, groupements et associations végétales. L'étude détaillée de l'influence de ces différents facteurs mésologiques sur la distribution floristique dans la région n'étant pas l'objet principal de la présente étude, nous nous intéressons plutôt aux caractéristiques biophysiques pouvant servir à la discrimination et à l'évaluation quantitative de l'état des phytocénoses recensées.

Dans le but d'identifier les paramètres qui permettent d'expliquer les différences précédemment notées entre les zones considérées, les relevés effectués ont été soumis à une analyse canonique discriminante prenant en compte l'ensemble des variables mesurées au niveau de chaque placette. Il ressort des résultats obtenus que les paramètres dendrométriques et la richesse spécifique des différentes formations expliquent à 97,94% l'ensemble de la variabilité existant entre les trois secteurs d'étude (figure 4.2). Sur ce graphique, les valeurs prises par les variables sur chaque axe canonique (F1 et F2) expriment la proportion de la variabilité totale imputable aux différences entre les zones étudiées. Ce coefficient de corrélation canonique encore appelé « pouvoir discriminant » est analogue au  $R^2$  en régression. L'axe F1 correspond donc à un gradient de productivité des formations tandis que l'axe F2 met en évidence un gradient de dégradation des formations. La densité des ligneux toutes catégories confondues (DT), la surface terrière (G), la densité du peuplement (DP), la densité de la régénération (DR) et la richesse spécifique (N) contribuent largement à expliquer les différences observées au sein des zones.

La projection des placettes de relevé (figure 4.3) dans le même système d'axes discriminants permet de noter que les formations les plus productives et les plus riches en espèces ligneuses se retrouvent en majorité situées dans le secteur sud-soudanien (Z3). Il s'agit notamment des galeries forestières, des forêts claires et des forêts denses sèches. Ces formations présentent également différents niveaux de dégradation mais les perturbations semblent être masquées par la productivité élevée de ces phytocénoses. En ce qui concerne les secteurs nord-soudanien et sahélo-soudanien, on note une dominance des savanes arborées et boisées avec des variantes à emprise agricole témoignant d'une productivité et d'une richesse spécifique moindre que dans le cas des formations denses du secteur Z3. A ces formations boisées s'associent les faciès de savanicoles (plus ouvertes) qui subissent fréquemment l'assaut des feux de végétation et le broutage par le bétail, comme en témoigne la concentration des placettes de relevés effectués au sein de ces formations dans la partie négative de l'axe canonique F1.

Au regard de ce qui précède, nous pouvons conclure que le secteur soudano-sahélien et le secteur nord-soudanien (Z1 et Z2) sont en majorité dominés par des formations ligneuses moins denses, moins productives, plus perturbées et donc plus dégradées que celles regroupées au sein du secteur sud-soudanien (Z3). La richesse spécifique des peuplements (RSP) et la surface terrière toutes catégories confondues (STC) constituent les paramètres les plus discriminants ( $p < 0,0001$ ) des formations ligneuses recensées au sein des trois secteurs écogéographiques étudiés.

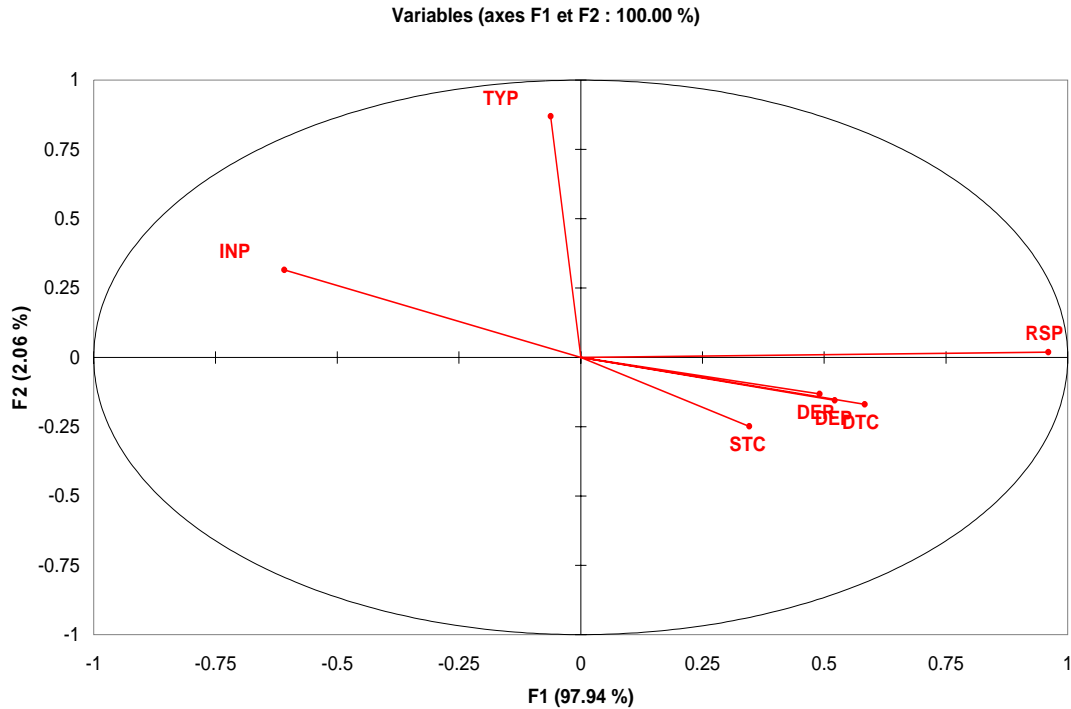


Figure 4.2: Plan factoriel des variables explicatives des différences observées au niveau des formations ligneuses recensées dans les secteurs écogéographiques étudiés (analyse globale réalisée sur 181 relevés).

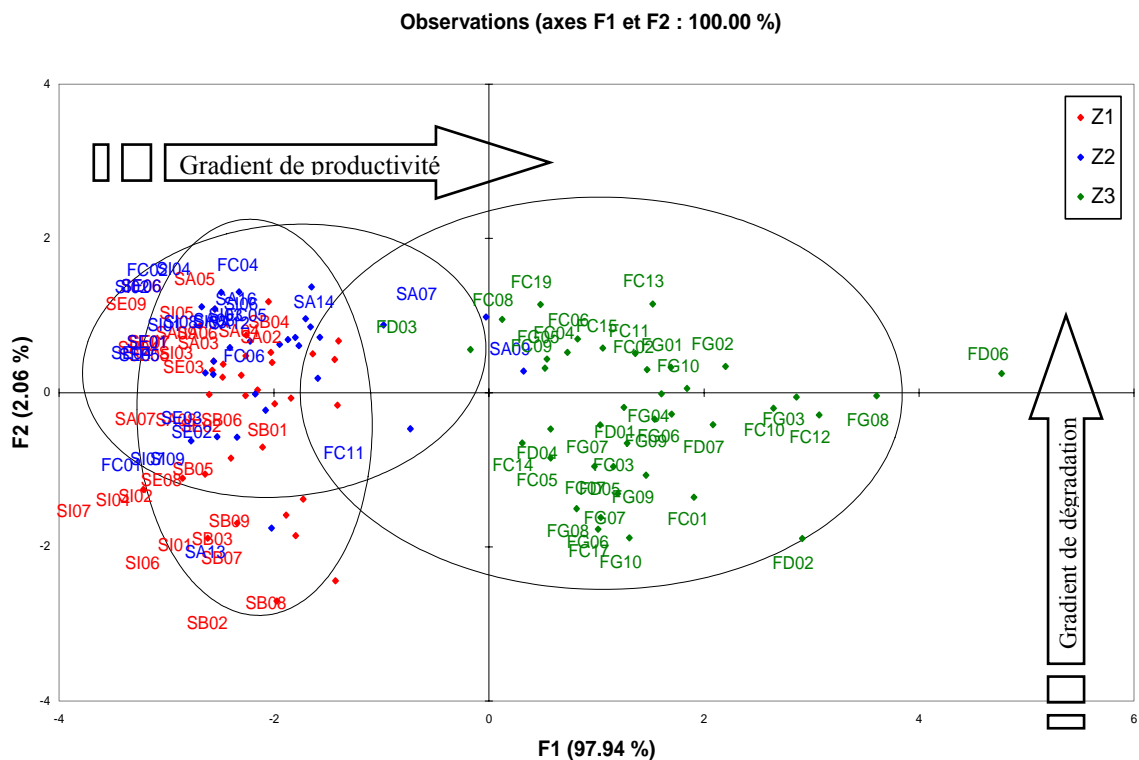


Figure 4.3: Regroupement des placettes inventoriées par secteur écogéographique dans un plan factoriel discriminant F1 et F2 (analyse globale réalisée sur 181 relevés)

#### 4.4.2 Discrimination des types de formations végétales

Eu égard à l'hétérogénéité et à la diversité des faciès ligneux par endroits, nous nous sommes intéressés aux paramètres pouvant servir de base à la différenciation des formations ligneuses recensées au sein des secteurs écogéographiques. Ainsi, à l'instar de la démarche adoptée précédemment à l'échelle des zones, nous avons cette fois-ci basé nos analyses sur les types de formations végétales. Le tableau 4.4 présente la significativité des différences existantes entre formations prises deux à deux suite à l'exécution de l'analyse multivariée prenant en compte les paramètres mesurés.

Tableau 4.4: Significativité du test de Fisher réalisé pour l'estimation des différences entre types de formations végétales

	FC	FD	FG	SA	SB	SE	SI	SX
FC	1	0.197	< 0.0001	0.226	0.103	0.000	0.006	0.327
FD	0.197	1	0.125	0.007	0.013	< 0.0001	0.000	0.007
FG	< 0.0001	0.125	1	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
SA	0.226	0.007	< 0.0001	1	0.002	0.000	0.002	0.026
SB	0.103	0.013	< 0.0001	0.002	1	< 0.0001	0.009	0.002
SE	0.000	< 0.0001	< 0.0001	0.000	< 0.0001	1	0.052	0.056
SI	0.006	0.000	< 0.0001	0.002	0.009	0.052	1	0.016
SX	0.327	0.007	< 0.0001	0.026	0.002	0.056	0.016	1

De l'analyse de ce tableau, il ressort que les formations denses fermées telles les forêts galeries (FG) et les forêts denses sèches (FD) semblent avoir des caractéristiques similaires mais se distinguent nettement des autres types de formations. Dans la catégorie des formations moyennement boisées, on retrouve les forêts claires (FC) qui semblent avoir des caractéristiques dendrométriques proches des savanes boisées (SB) et savanes arborées (SA) comme en témoignent les différences non significatives notées. Des constats similaires sont notés aussi pour les savanes saxicoles (SX), qui quant elles, montrent des caractéristiques proches de celles des forêts claires eu égard aux paramètres utilisées dans l'analyse. Cette similarité des caractéristiques structurales entre ces deux types de formations pourrait s'expliquer par les contraintes topographiques qui font que les savanes saxicoles sont moins accessibles et donc un peu plus à l'abri des prélèvements et autres destructions occasionnées par l'homme sur elles. Les confusions de classes entre les types de formations sont révélées par le calcul de la matrice de confusion sur un échantillon d'estimation des relevés soumis à l'analyse (Tableau 4.5). La faiblesse du pourcentage de classification correcte (44,75%) pourrait s'expliquer par le fait que certains types de formations, bien qu'étant distincts du point de vue physiologique, présentent pour les paramètres mesurés, des valeurs propres assez proches. Cette situation découle sans doute du fait que les relevés soumis à l'analyse ont été effectués à la fois dans les formations dégradées et peu dégradées.

Les résultats de la régression « pas à pas » (Tableau 4.6) effectuée sur l'ensemble des variables permet de retenir la surface terrière (STC), la densité de la régénération (DER), la richesse spécifique (RSP) et la densité des ligneux toutes catégories confondues (DTC), comme variables les plus discriminantes pouvant servir de base à la séparation des différentes phytocénoses étudiées.



Tableau 4.5 : Matrice de confusion pour l'échantillon d'estimation de la classification des types de formations végétales recensées

de \ Vers	FC	FD	FG	SA	SB	SE	SI	SX	Total	% correct
FC	5	0	2	9	4	2	1	0	23	21.74%
FD	2	1	2	1	0	0	1	0	7	14.29%
FG	2	1	9	4	0	0	0	0	16	56.25%
SA	0	0	1	23	2	1	10	1	38	60.53%
SB	1	0	2	5	9	0	6	0	23	39.13%
SE	0	0	0	3	0	11	6	0	20	55.00%
SI	0	0	0	11	6	4	20	1	42	47.62%
SX	1	0	0	5	0	0	3	3	12	25.00%
Total	11	2	16	61	21	18	47	5	181	44.75%

Tableau 4.6: Résultats de la sélection des variables les plus discriminantes

Stepwise Selection Summary										
Step	Number In	Entered	Label	Partial R-Square	F Value	Pr > F	Wilks' Lambda	Pr < Lambda	Average Squared Canonical Correlation	Pr > ASCC
1	1	STC	STC	0.3599	13.89	<0.0001	0.64014	<0.0001	0.05140	<0.0001
2	2	DER	DER	0.1692	5.00	<0.0001	0.53185	<0.0001	0.07143	<0.0001
3	3	RSP	RSP	0.1126	3.10	0.0042	0.47195	<0.0001	0.08587	<0.0001
4	4	DTC	DTC	0.1018	2.75	0.0099	0.42393	<0.0001	0.09504	<0.0001

Il ressort des résultats qui précèdent que les pressions exercées sur les types de formations à différents niveaux tendent à induire des confusions dans une classification physiologique précise des différents faciès ligneux. Il nous paraît plus judicieux de prendre en compte des considérations d'ordre écologique et structural pour mieux caractériser ces formations et, par là, apprécier leur état.

#### 4.4.3 Caractérisation structurale et écologique des types de formations

Cette description vise à rendre compte du potentiel sylvicole des formations dominantes et de leur richesse spécifique afin d'apprécier leur degré de dégradation. Par souci de clarté et pour faciliter la comparaison de nos résultats avec des travaux effectués dans d'autres zones écogéographiques plus ou moins similaires, la synthèse présentée se limite aux faciès ligneux les plus fréquents et les plus importants en terme spatial et donc les plus représentatifs des zones étudiées.

##### 4.4.3.1 Cas du secteur sahélo-soudanien

Les groupements identifiés concernent les localités de Bodjékali, Tomboutou, Garou et Madjékali dans la commune de Malanville. Il s'agit principalement de:

- la savane boisée à *Adansonia digitata* et *Parkia biglobosa* : elle se développe sur des sols minces à concrétion gravillonnaire. Le couvert très ouvert est marqué par la présence de

quelques baobabs parsemés par endroits d'individus isolés de nérés (*Parkia biglobosa*). Au total, 10 espèces arborescentes ont été recensées. Les espèces ligneuses caractéristiques sont *Parkia biglobosa* et *Adansonia digitata* ; on retrouve également par endroits les espèces telles *Vietx doniana*, *Mytragyna inermis* (au niveau des dépressions et en bordure des mares), *Acacia spp*, *Piliostigma reticulatum*, *Prosopis africana*. La surface terrière varie entre 9,8 à 14,3 m<sup>2</sup>/ha (en fonction de la fréquence des baobabs). La densité moyenne du peuplement arborescent est de 60 arbres/ha avec une régénération très faible (20 brins/ha).

- la savane arborée à *Daniellia oliveri* et *Borassus aethiopium*: le peuplement arborescent ici est dominé par les espèces *Daniellia oliveri* et *Borassus aethiopium*, suivies accessoirement par les espèces telles que *Vitellaria paradoxa*, *Prosopis africana*, *Piliostigma reticulatum*, *Lecaniodiscus cupanoïdes*, *Acacia spp*, *Ziziphus spp*. On les retrouve sur des sols lourds assez filtrants. La surface terrière du peuplement arborescent est de 7,2 m<sup>2</sup>/ha avec une densité moyenne d'environ 40 arbres/ha et 60 brins/ha pour la régénération. La richesse spécifique de ce groupement est de 8 espèces arborescentes.

- la savane arbustive à *Combretum collinum* et *Terminalia avicenoides* : la strate dominante ici est majoritairement marquée par des arbustes de la famille des combretacées. Les espèces caractéristiques sont *Combretum collinum* et *Terminalia avicenoides* avec un sous-bois marqué par un tapis graminéen dense faisant l'objet de broutage par les troupeaux. On y retrouve de façon éparse des arbres de *Balanites aegyptiaca*. On note également des passages fréquents de feux de végétation occasionnés par les éleveurs pour favoriser le développement du fourrage pour le bétail. La surface terrière calculée pour les ligneux arborescents est de 2 m<sup>2</sup>/ha, avec une densité moyenne de 60 arbres/ha et une richesse spécifique de 7 espèces. La densité de la régénération est de 50 brins/ha.

#### 4.4.3.2 Cas du secteur nord-soudanien

La commune de Kandi a été retenue comme base représentative de la zone et de la physionomie du couvert végétal. Les sites d'échantillonnage sont situés dans les localités de Saah, Angaradébou, Sonsoro et Bensékou et les principaux groupements identifiés sont :

- les forêts claires à *Isoberlinia spp* : ces faciès végétaux se démarquent des autres formations ligneuses par la grande taille des individus qui les composent (plus de 6 mètres) avec un sous bois discontinu et dépourvu de graminées. Plusieurs variantes principales ont été recensées et leur spécificité est liée à la composition en espèces arborescentes caractérisant ces phytocénoses. La surface terrière du peuplement varie entre 9,5 et 12 m<sup>2</sup>/ha avec une densité moyenne du peuplement arborescent oscillant entre 71 et 92 arbres/ha. La richesse spécifique des arbres dominants varie entre 7 et 15 espèces selon l'endroit avec une densité moyenne de régénération variant de 60 à 110 brins/ha. Les principaux groupements de forêts claires recensés dans la zone soudanienne-nord sont les suivants :

La forêt claire à *Isoberlinia doka* et *Daniellia oliveri* : au sein de laquelle on retrouve de façon éparse en dehors des espèces caractéristiques (*Isoberlinia doka* et *Daniellia oliveri*) d'autres espèces arborescentes (*Vitellaria paradoxa*, *Crossopterix febrifuga*, *Diospiros mespiliformis*, *Burkea africana*...) et des arbustes tels *Ferretia ferruginea*, *Prosopis africana*, *Strychnos spinoza*, *Combretum collinum*.

La forêt claire à *Isoberlinia doka* et *Isoberlinia tomentosa* dont les espèces caractéristiques *Isoberlinia doka* et *Isoberlinia tomentosa*, sont souvent suivies d'autres espèces arborescentes (*Vitellaria paradoxa*, *Entada africana*, *Prosopis africana*, *Daniellia oliveri*, *Crossopterix febrifuga*,...) et des arbustes tels *Leucaniodiscus cupanoides*, *Gardenia ternifolia*, *Nauclea latifolia*, *Grewia mollis*, *Combretum collinum*, *Combretum glutinosum*.

- Savane boisée à *Diospiros mespilisormis* et *Vitellaria paradoxa* : elle se trouve disséminée un peu partout dans le paysage sous forme d'îlots boisés à côté de la savane arbustive sur sols sablo-argileux à argilo-sableux présentant parfois des cuirasses latéritiques. Au total, 14 espèces arborescentes ont été recensées dans ce groupement avec une densité moyenne de 270 arbres/ha et une surface terrière est de 7,1 m<sup>2</sup>/ha. La densité moyenne de la régénération est de 150 brins/ha. Cette phytocénose est aussi marquée par les espèces telles que *Pterocarpus erinaceus*, *Crossopterix febrifuga*, *Mayetenus senegalensis*, *Combretum glutinosum*, *Entada africana*.

- Savane arborée à *Anogeissus leiocarpus* et *Entada africana* : avec une surface terrière de 8,38 m<sup>2</sup>/ha, une densité moyenne de 330 arbres/ha et une régénération d'environ 210 brins/ha, cette phytocénose enregistre 16 espèces arborescentes dont les plus fréquentes sont *Anogeissus leiocarpus*, *Entada africana*, *Lannea acida*, *Detarium senegalensis*, *Feretia apodentera*, *Acacia macrostachya*, *Piliostigma reticulata*, *Terminalia avicenoides*, *Combretum collinum*.

- Savane arbustive à *Terminalia avicenoides* et *Monotes kerstingii* : la surface terrière de ce groupement est de 5,18 m<sup>2</sup>/ha, avec une densité arborescente moyenne de 300 arbres /ha et une richesse spécifique de 8 espèces ligneuses. La densité de régénération de ce groupement atteint en moyenne 140 brins /ha. Six autres espèces ligneuses arbustives ont été également recensées dont *Detarium microcarpum*, *Strychnos spinosa*, *Feretia apodentera*, *Combretum collinum*, *Prosopis africana* sont les principales.

#### 4.4.3.3 Cas du secteur sud-soudanien

Cette zone a fait l'objet d'une description détaillée des groupements eu égard à l'importance des ressources végétales dont elle regorge mais aussi à cause de la protection relative dont certains sites bénéficient du fait de leur proximité avec la forêt classée de Ouénou Bénou (commune de Bembéréké). Les relevés effectués dans ce secteur ont abouti à la constitution d'une matrice de 109 relevés et 127 espèces végétales toutes catégories confondues. Au total, 8 groupements végétaux ont donc été identifiés et leur description structurale se présente comme suit :

- Forêt galerie à *Berlinia grandiflora* et *Khaya senegalensis* - La forêt galerie à *Berlinia grandiflora* et *Khaya senegalensis* se développe sur des sols hydromorphes, de texture argilo-sableuse ou argilo-limoneuse présentant parfois des cuirasses latéritiques le long des berges. La litière au sol est très importante dans cette formation. Au total 76 espèces ont été recensées dans cette phytocénose. Les espèces ligneuses caractéristiques de ce groupement sont *Berlinia grandiflora* et *Khaya senegalensis*. Les principales espèces de valeur sont *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Diospyros mespiliformis*, *Berlinia grandiflora* et *Daniellia oliveri*. La densité moyenne du peuplement arborescent est de 370 arbres/ha. La surface terrière est de 22,7 m<sup>2</sup>/ha avec une densité de régénération importante (2490 brins/ha).

- La forêt dense sèche à *Anogeissus leiocarpus* - Elle est souvent adjacente à la forêt galerie et on la retrouve dans les plaines d'inondation à hydromorphie temporaire. La forêt dense sèche à *Anogeissus leiocarpus* regroupe au total 66 espèces. Les principales essences de valeur de ce groupement sont *Anogeissus leiocarpus*, *Antiaris toxicaria*, *Pterocarpus erinaceus* et *Khaya senegalensis*. La densité moyenne du peuplement arborescent est de 260 brins /ha avec densité de régénération atteignant 1710 brins /ha. La surface terrière est de 16,9 m<sup>2</sup>/ha.

- La forêt claire à *Isoberlinia doka* et *Monotes kerstingii* - La richesse spécifique de cette phytocénose est de 75 espèces. Les espèces caractéristiques de ce groupement sont

*Isoberlinia doka*, *Monotes kerstingii* et *Pterocarpus erinaceus*. Les principales espèces de valeur sont *Afzelia africana*, *Isoberlinia doka*, *Anogeissus leiocarpus*, *Pterocarpus erinaceus*. La densité du peuplement arborescent est de 310 arbres/ha. La surface terrière est de 12,6 m<sup>2</sup>/ha. La densité moyenne de régénération de groupement est de 1080 brins /ha.

- Savane boisée à *Isoberlinia tomentosa* et *Pterocarpus erinaceus* – celle-ci se trouve disséminée sous forme d'îlots fortement boisés au milieu de la savane arborée et arbustive. La litière au sol est pratiquement inexistante et les troncs d'arbres calcinés témoignent du passage des feux de brousse durant la saison sèche. Au total, 41 espèces ont été recensées dans ce groupement. Avec une densité moyenne de 220 arbres/ha pour le peuplement et 400 brins/ha pour la régénération, la savane boisée à *Isoberlinia tomentosa* et *Pterocarpus erinaceus* est dominée par les espèces telles que *Isoberlinia tomentosa*, *Pterocarpus erinaceus*, *Strychnos spinosa*, *Pavetta crassipes*, *Daniellia oliveri*, *Pseudocedrela kotschyi*, *Burkea africana*. La surface terrière ici est de 9,1 m<sup>2</sup>/ha.

- Savane saxicole à *Detarium microcarpum* et *Burkea africana* - Cette formation se retrouve sur les collines et sols rocaillieux. Elle présente une richesse spécifique de 68 espèces et une densité du peuplement arborescent de 270 brins/ha et 140 brins/ha pour la régénération. La surface terrière est de 7,3 m<sup>2</sup>/ha. Ce groupement est caractérisé par les espèces telles que *Detarium microcarpum*, *Burkea africana*, *Hymenocardia acida*, *Hexalobu monopetalus*, *strychnos spinosa*.

- Savane arborée à *Isoberlinia tomentosa* et *Strychnos spinosa* - elle se retrouve par endroits et se distingue nettement par l'abondance de graminées dans la strate herbacée. La savane arborée à *Isoberlinia tomentosa* et *Strychnos spinosa* présente une richesse spécifique de 50 espèces, une densité moyenne du peuplement arborescent de 150 arbres/ha et densité de régénération de 550 brins/ha. La surface terrière est de 5,2 m<sup>2</sup>/ha. Cette phytocénose est caractérisée par les espèces telles que *Isoberlinia tomentosa*, *Strychnos spinosa*, *Combretum collinum*, *Combretum ghasalense*.

- Savane arborée et arbustive à *Combretum hypopilinum* et *Vitellaria paradoxa* - elle présente une richesse spécifique de 50 espèces avec une densité du peuplement arborescent de 220 arbres/ha et 530 brins/ha pour la régénération. La surface terrière est de 6,1 m<sup>2</sup>/ha. Cette phytocénose est caractérisée par les espèces telles que *Combretum hypopilinum*, *Combretum collinum*, *Combretum ghasalense*, *Vitellaria paradoxa*.

- Savane à emprise agricole à *Vitellaria paradoxa* et *Securinega virosa* - Avec une richesse spécifique de 45 espèces et une densité moyenne du peuplement arborescent de 80 arbres/ha, sa surface terrière est de 3,5 m<sup>2</sup>/ha avec une densité moyenne de régénération atteignant 770 brins/ha. Ce groupement est caractérisé par les espèces telles que *Vitellaria paradoxa*, *Securinega virosa*, *Parkia biglobosa*.

## 4.5. DISCUSSIONS

### 4.5.1 Productivité, diversité spécifique et régénération des peuplements ligneux

Les facteurs tels que la pluviosité et les conditions édaphiques sont vraisemblablement déterminants pour expliquer non seulement la répartition des types de formations végétales, mais encore leur richesse spécifique et leur productivité. Comme en témoigne la synthèse des caractéristiques structurales (tableau 4.7) des groupements identifiés au sein des forêts villageoises de la région d'étude, les formations végétales les plus productives (12 à 22 m<sup>2</sup>/ha) sont plus abondantes dans le secteur sud-soudanien (caractérisé par une pluviométrie moyenne de 1200 mm/an) tandis que les secteurs nord-soudanien et soudano-sahélien sont

marqués par des peuplements à faible productivité. Les résultats obtenus montrent également que les valeurs de la densité du peuplement ( $dbh \geq 10$  cm) et de la surface terrière sont très variables d'un groupement à l'autre. La surface terrière des peuplements est plus élevée dans les formations forestières fermées : forêts galeries et forêt dense sèche (12,6 à 22,7 m<sup>2</sup>/ha) que dans les formations ouvertes savaniques (3,6 à 9,1 m<sup>2</sup>/ha). Toutefois, les forêts claires identifiées dans les secteurs nord et sud soudaniens exhibent une certaine stabilité de la surface terrière qui s'établit en moyenne autour de 12m<sup>2</sup>/ha. Cette valeur se situe dans les mêmes ordres de grandeur (10 à 14m<sup>2</sup>/ha) que celles obtenues par Sokpon *et al.* (2006) pour les forêts claires du nord-Bénin. Par ailleurs, l'importance de la richesse spécifique des peuplements arborescents affiche une préférence particulière pour les formations forestières fermées (forêts galeries, forêts denses sèches, forêts claires et dans une certaine mesure savanes boisées) de la zone sud-soudanienne où on dénombre entre 41 et 76 espèces selon les groupements végétaux. Par contre, les groupements recensés dans les secteurs nord-soudanien et soudano-sahélien sont caractérisés par une faiblesse de la richesse spécifique, qui ici est comprise entre 7 et 15 espèces. Cette faiblesse de la richesse spécifique des phytocénoses de cette zone s'explique principalement par le fait que ce sont des milieux perturbés régulièrement (feux saisonniers) et soumis à de fortes contraintes anthropiques (emprise agricole, exploitation du bois). Des observations similaires ont été faites par Orthmann (2005) dans le centre du Bénin.

La densité de la régénération naturelle ( $dbh < 10$  cm) des groupements végétaux identifiés dans les différents secteurs écogéographiques de la région d'étude montre une tendance similaire à celle observée au niveau de leur productivité. En outre, nos résultats montrent des valeurs très faibles de la densité de régénération des groupements du secteur soudano-sahélien (20 à 60 brins/ha), faibles pour ceux du secteur nord-soudanien (60 à 210 brins/ha), relativement faibles pour les groupements ouverts du secteur sud-soudanien (140 à 400 brins/ha) et très importantes pour les formations fermées (1080 et 2490 brins/ha) du même secteur. Cette faiblesse de la régénération s'explique surtout par la conjonction de deux facteurs d'ordre naturel et anthropique. De façon générale, les plantules issues de nouvelles germinations des graines sont très rares ou absentes dans les peuplements. Ces plantules sont encore plus vulnérables que les rejets végétatifs et ne survivent pratiquement pas à la saison sèche. Les jeunes plants de grande taille survivent mieux aux feux et à la sécheresse que ceux de petite taille. Les premiers ont plus de chance de conserver au moins une partie de leur tige vivante même lorsque le système aérien se dessèche en saison sèche, ce qui est souvent le cas. A cela s'ajoutent les effets combinés des feux et du pâturage qui induisent une mortalité très élevée à la régénération, compromettant sérieusement le recrutement des espèces ligneuses dans les peuplements.

#### **4.5.2 Facteurs de dégradation des formations naturelles.**

##### **4.5.2.1 L'agriculture**

Dans la zone d'étude, l'agriculture est en partie responsable de la dégradation des ressources naturelles. La culture itinérante sur brûlis, dominée par la cotonculture, a provoqué la dispersion des agriculteurs et entraîné la multiplication de fermes agricoles, même à l'intérieur des zones protégées. Il est important de souligner que les départements du Borgou et de l'Alibori produisent à eux seuls plus des deux tiers de la production cotonnière du pays (Akogbeto *et al.* 2005) et cette spéculation procure aux producteurs agricoles de la zone entre deux tiers et trois quarts de leurs revenus monétaires (Ton & Wankpo, 2004).

Tableau 4.7: Caractéristiques structurales et sylvicoles des principaux groupements identifiés par secteur écogéographique

Secteurs écogéographiques	Types de formations	Groupements végétaux caractéristiques	Caractéristiques sylvicoles et écologiques			
			Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	Densité peuplement (arbres/ha)	Densité régénération (brins/ha)	Richesse spécifique (espèces)
Soudano-sahélien (Z1)	Savane arbustive	- à <i>Combretum collinum</i> et <i>Terminalia avicenisoides</i>	2	60	50	7
	Savane arborée	- à <i>Daniellia oliveri</i> et <i>Borassus aethiopicum</i>	7,2	40	60	8
	Savane boisée	- à <i>Adansonia digitata</i> et <i>Parkia biglobosa</i>	9,8	90	20	10
Nord-soudanien (Z2)	Savane arbustive	- à <i>Terminalia avicenisoides</i> et <i>Monotes kerstingii</i>	5,2	300	140	8
	Savane arborée	- à <i>Anogeissus leicarpus</i> et <i>Entada africana</i> ,	8,4	330	210	16
	Savane boisée	- à <i>Diopiros mespilisformis</i> et <i>Vitellaria paradoxa</i>	7,1	270	150	14
	Forêt claire	- à <i>Isoberlinia doka</i> ou <i>Isoberlinia tomentosa</i>	9,5-12	71-92	60-110	7-15
Sud-soudanien (Z3)	Savane à emprise agricole	- à <i>Vitellaria paradoxa</i> et <i>Securinea virosa</i>	3,5	80	770	43
	Savane saxicole	- à <i>Detarium microcarpum</i> et <i>Burkea africana</i>	7,3	270	140	68
	Savane arborée	- à <i>Isoberlinia tomentosa</i> et <i>Strychnos spinosa</i>	5,2	150	550	50
	Savane arborée et arbustive	- à <i>Combretum hypopilinum</i> et <i>Vitellaria paradoxa</i>	6,1	220	530	50
	Savane boisée	- à <i>Isoberlinia tomentosa</i> et <i>Pterocarpus erinaceus</i>	9,1	220	400	41
	Forêt claire	- à <i>Isoberlinia doka</i> et <i>Monotes kerstingii</i>	12,6	310	1080	75
	Forêt dense sèche	- à <i>Anogeissus leiocarpus</i>	16,9	260	1710	66
	Forêt galerie	- à <i>Berlinia grandiflora</i> et <i>Khaya senegalensis</i>	22,7	370	2490	76

Or, la culture du coton exige des investissements importants (surtout en intrants) que les agriculteurs ne consentent pas actuellement à faire, si bien que les sols s'épuisent au bout de peu d'années d'exploitation. Dans sa forme actuelle (semi-mécanisée, culture attelée), la culture du coton participe, avec la culture des tubercules d'igname, à la forte dégradation des terres. Pour les populations de cette partie du Bénin, la culture du coton est un gage de sécurité et de prospérité, étant donné l'assurance de revenu après une campagne agricole. Malgré une importante utilisation d'engrais chimiques, les pratiques culturales traditionnelles sont encore en vigueur chez les paysans. Les engrais chimiques coûtant cher, ils ne sont pas assez employés pour la culture du coton. Dès que le rendement baisse, le producteur se déplace et brûle de nouvelles parcelles pour gagner des terres cultivables. Dès lors, l'extension de la culture cotonnière se fait au détriment des formations forestières et des jachères.

#### 4.5.2.2. La pression sélective sur les essences ligneuses à valeur commerciale

La commercialisation du bois par des exploitants forestiers contribue également à la destruction du couvert végétal. Malgré la présence des services des forestiers, le phénomène d'abattage des bois d'œuvre se poursuit pour le lingué (*Azelia africana*) et le caïlcédrat (*Khaya senegalensis*). Nos enquêtes auprès des populations locales ont permis d'établir que les essences de valeur commerciale (bois d'œuvre, bois de service,...) ont été systématiquement exploitées, non seulement pour les besoins propres mais aussi pour des raisons économiques compte tenu de la demande en bois d'œuvre très souvent exprimés par les commerçants des pays limitrophes (principalement les Nigériens). L'inefficacité du contrôle de l'administration forestière combinée à la perméabilité des frontières ont largement contribué à cette exploitation sélective des essences de valeur. D'après les responsables de l'administration forestière et les petits exploitants forestiers interrogés, seuls les massifs classés et les domaines protégés de l'Etat constituent actuellement les zones refuges où l'on pourrait encore rencontrer des arbres à valeur commerciale. Cette affirmation est confirmée par nos relevés dans l'aire d'étude qui montrent une très faible proportion voire la rareté des essences commercialisées (entre 0,1 et 2% de la densité des peuplements selon le groupement) traduisant ainsi l'envergure et la sévérité de pression sélective exercées sur elles.

#### 4.5.2.3. La demande en bois-énergie

A cette pression sélective s'ajoute une crise énergétique entretenue par la demande sans cesse grandissante en bois-énergie des grandes zones urbaines adjacentes. Une étude récente conduite dans le Nord du pays (Ogoudéji *et al.*, 2007), a permis d'identifier les principaux axes d'approvisionnement ainsi qu'une estimation des flux d'approvisionnement en bois-énergie des centres urbains dans la région concernée par la présente recherche. On distingue respectivement par ordre d'importance les axes: Parakou-Kandi (9150,8 T d'équivalent bois par an), Ségbana-Kandi (3136,9T d'équivalent bois par an) et Malanville-Kandi (2154,2 T d'équivalent bois par an). Les axes d'exportation sont respectivement Kandi-Malanville (787,8T d'équivalent bois par an), Kandi-Banikoara (474,4 T d'équivalent bois par an) et Kandi-Parakou (284,4 T d'équivalent bois par an). La commune de Kandi se présente donc comme un important centre de transit de bois-énergie en direction de Parakou (au Sud), Malanville (au Nord), Ségbana (à l'Est) et Banikoara (à l'Ouest).

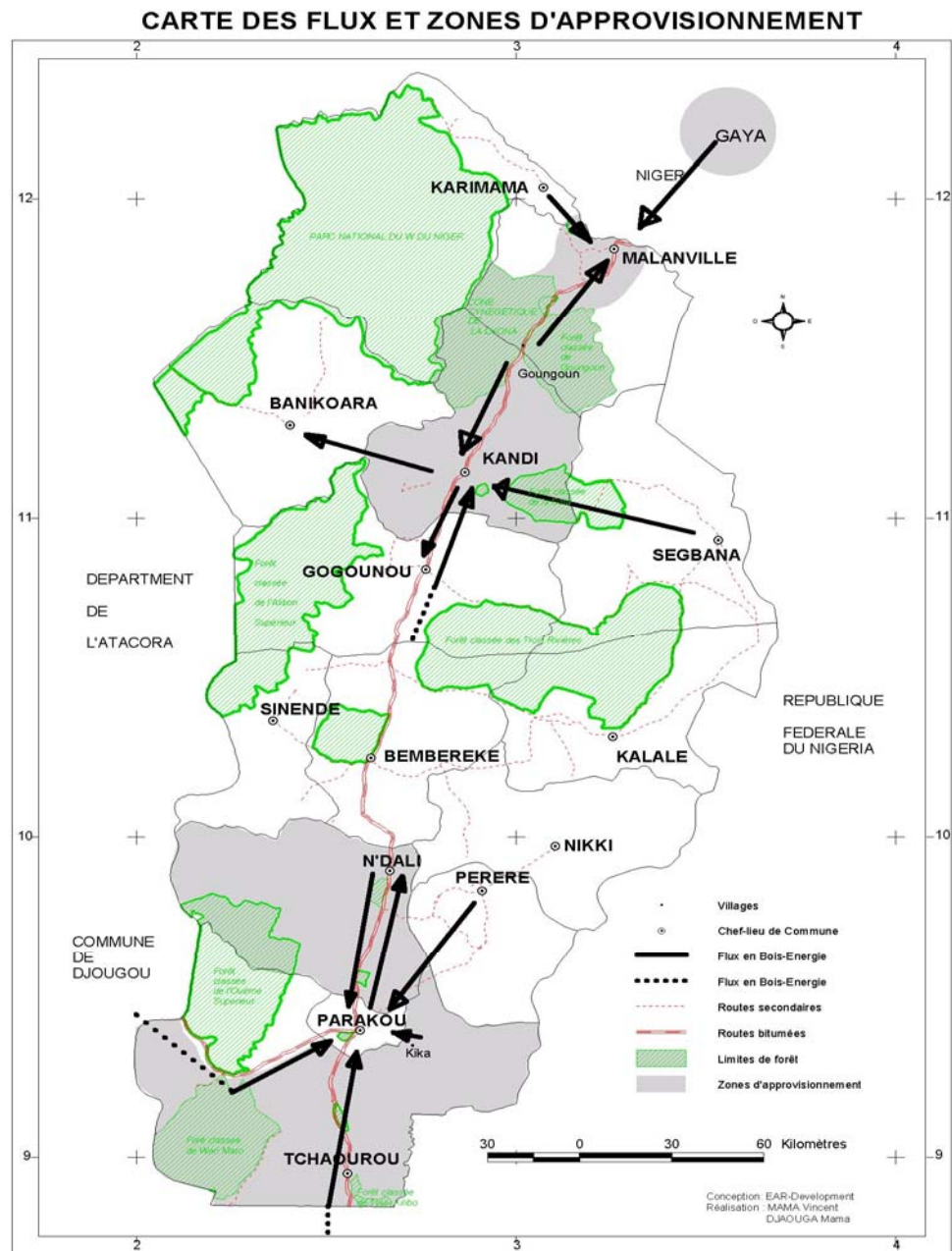


Figure 4.4 : Flux d’approvisionnement en bois-énergie dans la zone d’étude.

Source : Ogoudéji et al., (2007)

Sur l’axe Parakou-Malanville, le bois-énergie transite dans les deux sens vers Parakou comme vers Malanville (Figure 4.4). Les auteurs soulignent également le caractère autonome des grands centres de consommation tels que Kandi (au Centre de la zone d’étude) et Malanville (à l’extrême Nord) qui s’auto-approvisionnent au-delà des agglomérations urbaines principalement à proximité et au niveau des massifs forestiers classés. Il faut malheureusement souligner que la documentation de ces pratiques rétrogrades se trouve confrontée à une faible disponibilité de données quantitatives et à des difficultés d’harmonisation dans les approches méthodologiques utilisées.

Au plan national, la plus forte tension sur les ressources ligneuses se situe sur le rapport entre l’offre soutenable et la demande de combustibles ligneux (bois de feu et charbon de bois).



Actuellement, il se trouve que l'offre soutenable, c'est-à-dire celle qui pourrait être satisfaite sans prélèvement sur le stock et donc sans causer de déforestation, est déjà globalement inférieure à la demande au plan national. D'après les statistiques fournies par le Programme Régional pour le Secteur des Energies Traditionnelles (Tchiwanou, 2001), la consommation journalière de bois de feu équivaut à 1,2 kg/personne en milieu rural et en milieu urbain et la consommation journalière de charbon de bois est estimée à 0,3 kg/personne en milieu urbain contre 0,2 kg/personne en milieu rural. 93% de la population utilisent du bois-énergie en milieu rural, contre 80% en milieu urbain. La même source rapporte que la consommation des branches d'activités économiques serait d'environ 10% de celle des ménages pour le charbon de bois et 20% pour le bois de feu. Les projections de la demande globale en bois-énergie pour l'an 2027 (Annexe 4.1) seraient de 17 816 587 tonnes /an alors que le potentiel global du bois-énergie à la même échéance ne serait que de 5 786 462 tonnes (Annexe 4.2).

#### 4.5.2.4. L'élevage transhumant

Ce mode de gestion du cheptel bovin est perçu comme un système de production dégradant pour l'environnement, en raison du fait qu'il occasionne des déplacements massifs de cheptels à la recherche de pâturages et de points d'eau. Ici, la dégradation est perçue comme un processus de diminution des ressources pastorales, suite à leur utilisation irrationnelle par l'élevage. Au Bénin, la transhumance s'opère essentiellement dans le sens nord-sud. Le cheptel bovin national est essentiellement concentré dans les départements du nord, notamment dans les zones du Borgou, de l'Alibori, de l'Atacora et du Donga, qui possèdent à eux seuls 85 % des effectifs nationaux avoisinant les 1 200 000 têtes (MEHU, 2002). Chez les éleveurs du Borgou et de l'Alibori, les bovins présentent un taux moyen de fécondité de 76 à 79%, alors que le seuil critique est de 50% (Adamou-N'diaye *et al.*, 2001). Cette forte fécondité accroît les effectifs, le surpâturage, la dégradation des parcours et la destruction des habitats sauvages. A cela s'ajoute le fait que depuis la sécheresse des années 70 et 80, la transhumance des bovins en provenance des pays frontaliers (Niger, Nigeria, Burkina Faso) s'est fortement accentuée : près de 200 000 têtes de bovins et 17 000 têtes d'ovins / caprins au cours de la saison sèche 1994–1995 (Capo-Chichi, 2000). Or, les systèmes de production agro-pastoraux et pastoraux établis dans ces milieux favorisent un mode d'élevage transhumant. Les massifs forestiers (notamment les forêts classées de la zone d'étude) sont les lieux de prédilection des éleveurs, en majorité Peuhl. Pour les Peuhl surtout, les aires de pâturage sont en premier lieu des espaces à accès libre pour le bétail. Quand ils font paître leurs bovins, surtout pendant la saison sèche, et qu'ils font le pâturage aérien et parfois des feux tardifs, ils se soucient peu des effets négatifs de ces pratiques sur la régénération de la végétation. Il est certain que ces pratiques freinent la régénération de la fertilité des jachères. Le pâturage aérien est également une pratique répandue; tous les éleveurs appliquent cette méthode néfaste pour nourrir leurs troupeaux, surtout en période de soudure. De plus, avec la forte croissance du cheptel, les éleveurs sont contraints de procéder plus tôt au pâturage aérien pendant la saison sèche qu'auparavant. Les passages répétés des troupeaux engendrent de vastes couloirs, dont la terre et le couvert végétal se dégradent du fait du piétinement répété du sol et de l'élagage quasi-systématique des arbres. Ce phénomène crée par ailleurs des situations conflictuelles entre les paysans et les éleveurs, à cause des destructions de cultures engendrées par le passage des animaux.

#### 4.5. CONCLUSION

Les résultats présentés dans ce chapitre ont montré, pour les trois zones éco-géographiques étudiées, qu'il existe des différences significatives au regard des paramètres dendrométriques et écologiques mesurés. Au gradient climatique naturel existant se superpose un gradient écologique marqué par une diversité décroissante des types de peuplements ligneux tendant vers une certaine homogénéisation des faciès suivant un axe géographique Sud-Nord. La zone sahélo-soudanienne et la zone nord-soudanienne sont caractérisées par des formations moins denses, moins diversifiées et plus dégradées que celles étudiées dans la zone soudanienne-sud où on note la présence des plus grands massifs forestiers du pays, bénéficiant du coup d'une protection administrative du fait de leur statut de forêts classées. L'état de dégradation des faciès étudiés se traduit au plan physionomique, par un paysage composé d'une mosaïque de larges espaces cultivés et de petits bosquets (atteignant rarement 3 ha) disséminés à la périphérie des espaces emblavés. La plupart des formations ligneuses plus ou moins compactes fréquemment retrouvées sont de vieilles jachères, caractéristiques d'une recolonisation végétale suite à des activités agricoles antérieures; en témoignent les valeurs faibles de la surface terrière et de la richesse spécifique enregistrées. On note par ailleurs, la quasi-absence des espèces de valeur commerciale au sein des peuplements arborescents relictuels des zones Z1 et Z2. Les principales causes qui expliquent la dégradation observée sont les défrichements incontrôlés dus aux besoins croissants de superficies cultivables sous l'effet de la pression démographique; les mauvaises pratiques culturales (extension chronique des surfaces cultivées, disparition de la jachère, feux de végétation abusifs, absence d'apport fertilisant, monoculture, etc.); les prélèvements non contrôlés de bois de feu et de bois d'œuvre avec disparition des essences de valeur; la transhumance. Il reste cependant clair que la solution doit se situer au niveau local où se trouvent ces instigateurs et victimes, d'où la nécessité de l'association des indicateurs universellement retenus à d'autres qui auront les capacités de révéler dans le temps et dans l'espace les changements qui peuvent affecter le milieu naturel et les hommes qui en tirent profit. Ces indicateurs devraient être suivis sur des sites permanents proches des communautés rurales qui sont des unités de gestion de base susceptibles de contribuer grandement à la lutte contre la dégradation du couvert végétal et donc des terres. De là, la télédétection haute résolution peut être un outil efficace permettant d'évaluer la célérité ainsi que l'ampleur spatiale de la dégradation observée. Nous aborderons cet aspect dans le prochain chapitre.

ANNEXE 4.1: Prévisions de la demande de combustibles ligneux au Bénin pour la période de 1992 – 2027 (en tonnes/an). Source: TCHIWANOU, 2001

Produits	Niveau	1992	1997	2002	2007	2012	2017	2022	2027
<b>Bois de feu</b>	Ménages milieu urbain	630.685	786.560	993.796	1.269.631	1.638.488	2.129.819	2.758.349	3.559.635
	Ménages milieu rural	1.329.680	1.511.096	1.715.241	1.940.858	2.186.248	2.443.008	2.718.288	3.012.510
	Activités économiques	392.073	459.531	541.807	642.097	764.947	914.565	1.095.327	1.314.429
	Total	2.352.438	2.757.187	3.250.844	3.250.581	4.589.683	5.487.392	6.571.964	7.886.574
<b>Charbon de bois</b>	Ménages milieu urbain	153.826	191.844	242.389	309.666	399.631	519.468	673.768	868.204
	Ménages milieu rural	214.464	243.725	276.652	313.041	352.621	394.033	438.434	485.889
	Activités économiques	36.829	43.557	51.904	62.271	75.225	91.350	111.120	135.409
	Total	405.119	479.126	570.945	684.978	827.477	1.004.851	1.222.322	1.489.502
	Equivalent en bois	2.700.793	3.194.173	3.860.300	4.566.520	5.516.513	6.699.007	8.148.813	9.930.013
<b>Demande globale de bois-énergie</b>		5.053.231	5.951.360	7.057.144	8.419.101	10.106.196	12.186.392	14.720.777	17.816.587

ANNEXE 4.2: Evaluation du potentiel global en bois-énergie du Bénin de 1997 à 2027

Source: TCHIWANOU, 2001

Année	Formations naturelles (T/an)	Plantations (T/an)	Total (T/an)
1997	6.683.669	36.800	6.719.469
2002	6.517.264	36.800	6.554.064
2007	6.355.954	36.800	6.392.754
2012	6.198.636	36.800	6.235.436
2017	6.045.212	36.800	6.082.012
2022	5.895.586	36.800	5.932.386
2027	5.749.662	36.800	5.786.462

## CHAPITRE 5

### DYNAMIQUE DU COUVERT LIGNEUX ET CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DU SOL EN ZONE SOUDANIENNE : CAS D'ETUDE AU NORD DU BENIN

---

HOUNTONDI, Y.C., de LONGUEVILLE, F.M.R., SOKPON, N., & OZER, P.

(A soumettre)

#### RESUME

En vue de cartographier les aires de ligneux subissant des changements dans un contexte d'emprise agricole, un exemple d'application combinant l'imagerie satellitaire et des données d'inventaires forestiers a été étudié dans nord-est du Bénin. Nous orientons nos travaux vers la détection du changement, l'utilisation d'indices de végétation et l'analyse du comportement spectral des unités d'occupation du sol identifiées sur la base de la nomenclature suggérée par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). La composante spatiale observable des mutations du couvert végétal a été cartographiée sur la période 1986-2005 à partir d'images SPOT-XS. Les résultats obtenus suggèrent qu'au cours des deux dernières décennies, 19,6% de la surface de la zone autrefois constituée de formations ligneuses denses ont complètement disparu; 12,9% du secteur sont touchés par le déboisement, et 13,9% de cette superficie ont subi une dégradation des formations ligneuses. A l'opposé de cette tendance, on observe que 21,8% de l'aire d'étude n'ont subi aucun changement, tandis que moins du tiers (31,7%) de cette aire connaît une amélioration de la couverture ligneuse allant de l'amélioration modérée à la reconstitution de forestière (reboisement). L'analyse révèle également de nettes disparités au niveau des taux d'évolution des unités d'occupation du sol. Ces dynamiques sont plus marquées pour les classes d'occupation du sol à couverture ligneuse dense et les zones à emprise agricole que pour les zones habitées. Par ailleurs, les relations existant entre indices de télédétection et productivité des différentes formations ont été examinées. Pas à pas, nous avons tenté de corrélérer les caractéristiques radiométriques de différents types de couverts ligneux à leurs caractéristiques structurales. Les résultats montrent des régressions linéaires très significatives, mais seuls les modèles prenant en compte l'indice de brillance (IB) comme variable explicative sont plus performants. Toutefois, ce modèle n'explique que 50% des variations de la densité des arbres et arbustes toutes classes confondues contre 86,24% de la variation de la densité de régénération (DER) sur le terrain. Ces résultats demandent néanmoins confirmation et analyses complémentaires. En définitive, l'étude a mis en évidence le déclin des formations boisées de la zone d'étude, remettant en question les affirmations qui évoquent une situation mitigée de l'évolution des processus de désertification au-delà des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest.

## 5.1. INTRODUCTION

La compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'évolution des ressources naturelles et l'optimisation de leur rôle exige une prise en compte de l'insertion de ces ressources dans l'aménagement du territoire. Dans cette perspective, l'utilisation de l'imagerie spatiale apporte, depuis plusieurs années, une contribution non négligeable. En outre, grâce à leur large couverture spatiale et leur répétitivité élevée comparativement à des photographies aériennes, les images satellitaires constituent des données privilégiées pour identifier les différences d'état d'une zone en l'observant à des dates différentes (Inglada, 2001). L'exploitation des données satellitaires pour cartographier les changements d'occupation du sol est désormais largement répandue (Girard & Girard, 1999; Chavez & MacKinnon, 1994; Ulbricht & Heckenford, 1998), d'autant plus que l'intervalle temporel maximal est maintenant de deux décennies pour les images SPOT, voire plus de trente ans pour les images LANDSAT. Aussi, les données qui concernent les types d'occupation des sols et leurs changements dépendent des niveaux d'observation de la couverture terrestre et des rythmes des changements qui l'affectent. A moyenne échelle, les données télédéteectées autorisent la mise en place d'inventaires des ressources végétales avec une certaine précision (en fonction de la résolution des capteurs choisis). Elles apportent également une information non négligeable sur la relation végétation-géomorphologie (Lacaze & Joffre, 1987, Manière *et al.*, 1993). A grande échelle, avec l'avènement des données à haute résolution spatiale, la perception des phytocénoses devient plus complexe et exige des approches approfondies qui s'appuient sur des données de terrain (Escadafal & Pouget, 1986, Diouf & Lambin, 2001). Par ailleurs, il faut noter que l'utilisation de l'imagerie s'accompagne de certaines contraintes techniques. En effet, les principaux facteurs limitant la télédétection des changements sont les différences de conditions atmosphériques, de géométrie d'acquisition et de conditions au sol (Muchoney & Haack, 1994; Song *et al.*, 2001).

L'expérience exposée à travers la présente étude s'inscrit dans le cadre général de la compréhension des mécanismes qui sous-tendent le phénomène de déforestation. Au Bénin, à l'exception des informations fragmentaires fournies par les cartes topographiques de l'Institut Géographique National dans les années 1970 et d'une carte nationale de végétation dressée en 1990 par le Centre National de Télédétection, aucune étude ne permettait d'établir un diagnostic quantitatif, global et fiable de ces dynamiques. Pour cette étude des changements d'occupation du sol dans le nord du Bénin, les données satellitaires SPOT-XS ont été utilisées. Conduite sur une zone représentative du domaine soudanien, l'étude vise à évaluer l'état des formations ligneuses dans une séquence de dégradation, en combinant des données de terrain (inventaires forestiers) et des images satellitaires à haute résolution (SPOT-XS). Dans un premier temps, nous présentons les traitements appliqués aux images pour détecter les changements. Les dynamiques spatiales observées sont ensuite analysées globalement puis identifiées par unité d'occupation du sol. Pour des fins de prédiction, des modèles d'estimation des caractéristiques structurales des ressources ligneuses ont été proposés. L'objectif visé à terme est double : il s'agit de produire des supports thématiques mettant en évidence l'évolution quantitative et qualitative des modifications intervenues au niveau de la couverture végétale au cours des deux dernières décennies et d'ébaucher des possibilités d'estimation des ressources ligneuses à partir des données satellitaires à haute définition. La relation entre les dynamiques spatiales observées et les perspectives par rapport à la durabilité de leur mode de gestion a été analysée.

## 5.2. LE CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE

L'ensemble de l'étude a été menée dans une zone chevauchant les Communes de Bembereke et de Ndali situées au Nord-est du Bénin (Figure 5.1). Avec une superficie totale de 7096 km<sup>2</sup>, les deux communes regroupent au total 63 villages et quartiers de villes qui, pour la plupart, sont groupés le long des axes routiers. D'après le dernier recensement général de la population et de l'habitation (INSAE, 2003), la population des deux communes est passée de 103.243 habitants en 1992 à 160.583 habitants (2002), ce qui correspond à un taux d'accroissement intercensitaire moyen de 4,26%, valeur supérieure à la moyenne nationale qui est de 3,23%.

La production agricole occupe plus de 80% de la population active de la région. La zone d'étude est bordée par deux massifs forestiers classés : au nord on retrouve la forêt classée de Ouénou Bénou (36605 ha) et au sud-est, la forêt classée de Ndali (4847 ha) (CENATEL, 2002). Les formations végétales naturelles les plus importantes sont les forêts claires, suivies des savanes boisées-arborées et des arbustives et elles fournissent aux populations du bois d'œuvre, du bois de feu et du bois de service. Les variantes anthropisées des formations végétales sont dominées par des mosaïques de cultures – jachères, des savanes à emprise agricole et quelques plantations. Située au cœur même du domaine soudanien, la zone d'étude est caractérisée par une saison pluvieuse et une saison sèche avec des écarts thermiques et hygrométriques relativement importants.

Avec des précipitations moyennes annuelles de 1120 mm, les pluies ne couvrent de façon certaine que cinq mois dans l'année (mai à septembre). Les études climatiques réalisées ces dernières années (Boko, 1988 ; Afouda, 1990 ; Houndénou, 1999) ont montré que la péjoration pluviométrique, la réduction de la durée de la saison agricole, la persistance des anomalies négatives et la hausse des températures minimales caractérisent désormais les climats du Bénin et modifient les régimes pluviométriques. La zone d'étude ne constitue pas une exception à la règle. En outre, l'analyse des tendances pluviométriques au cours des quarante dernières années à Bembereke montre une baisse sensible des précipitations totales annuelles (Figure 5.2). Cette diminution est d'environ 10 mm/an sur les vingt dernières années, ce qui dénote donc d'une péjoration climatique persistante liée à une intensification des sécheresses qui se sont produites pendant la même période, notamment dans les années 1970 et qui se sont prolongées après les années 1980. Ces phénomènes climatiques auraient eu des impacts certains sur les secteurs de l'agriculture et de la foresterie.

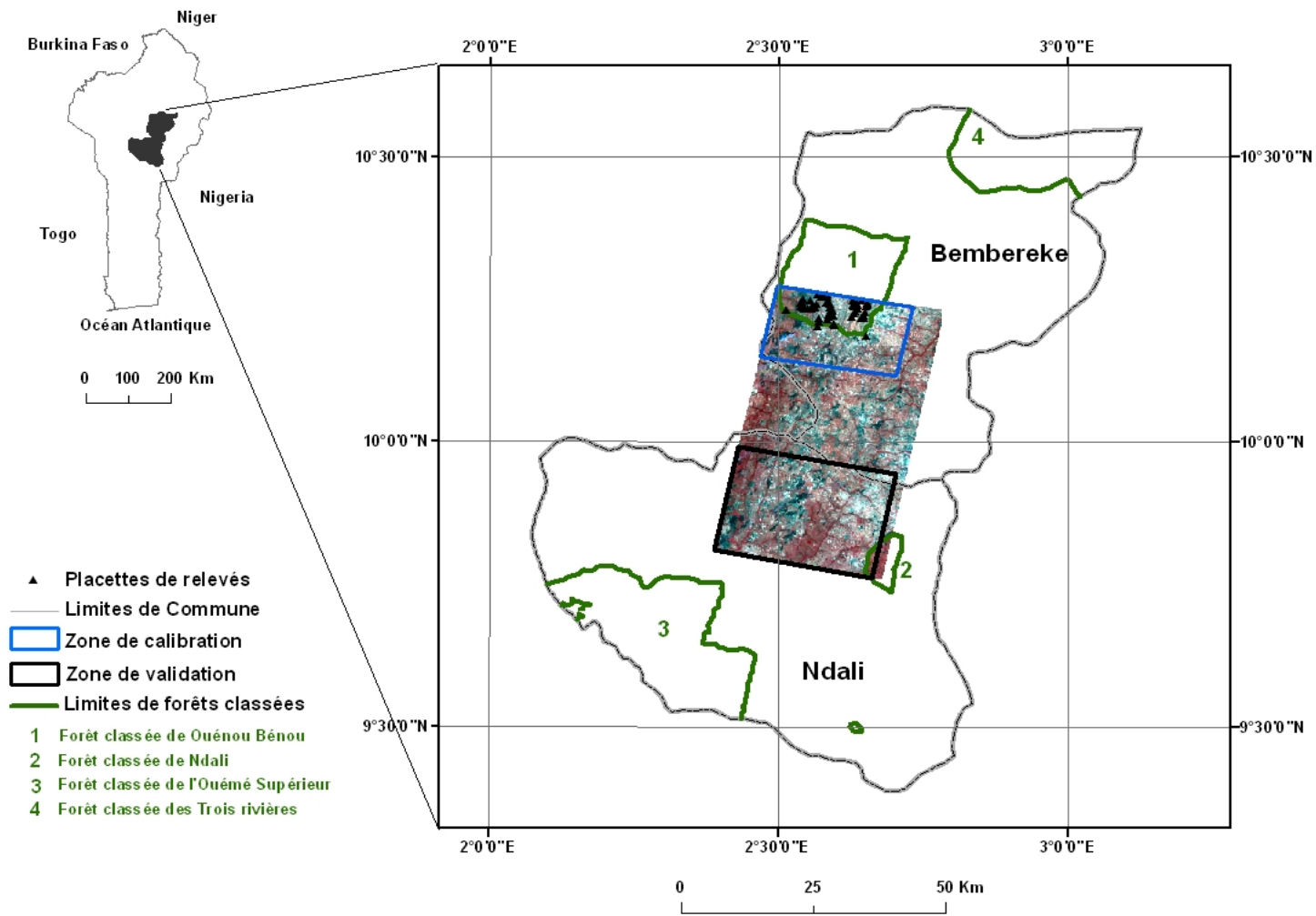


Figure 5.1. Localisation de la zone d'étude (Scène HRV-XS 064-330 SPOT-4 du 15/11/2005, Copyright ©1986 et 2005 CNES, OASIS programme, Distribution SPOT Image)

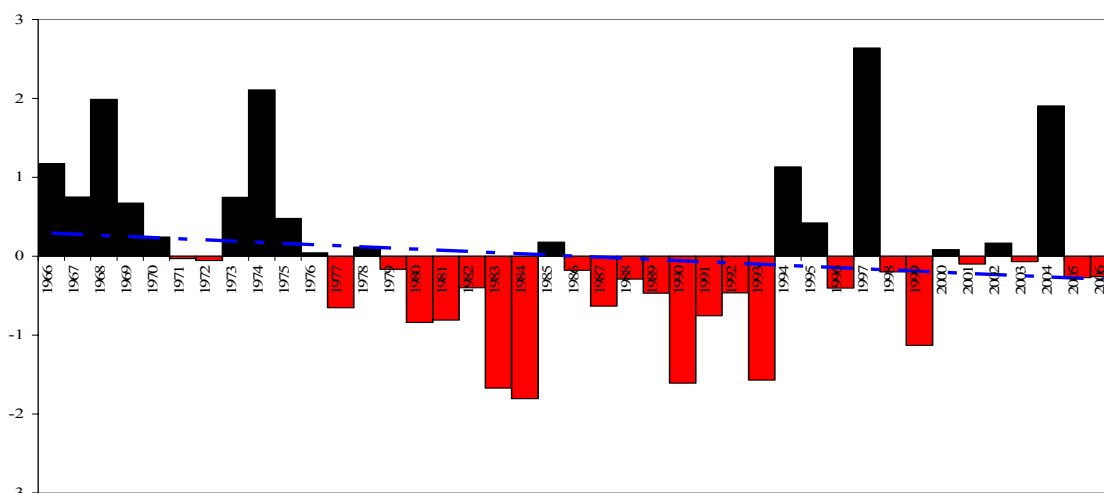


Figure 5.2: Ecart moyen normalisé des précipitations annuelles à Bembereke (1966 – 2006).

### 5.3. DONNEES ET METHODES

#### 5.3.1. Données de terrain

Des inventaires forestiers ont été effectués dans la partie méridionale et les environs de la forêt classée de Ouénou-Bénou (zone de calibrage) comme l'indique la figure 5.1. Le choix de cette zone a été motivé par la nécessité de disposer d'un éventail le plus diversifié possible d'occupations du sol par la végétation ligneuse, prenant en compte le maximum de faciès boisés dans la localité. Aussi, pour mettre en évidence la dynamique régressive ou progressive des formations végétales boisées, nous avons pris en considération différentes séquences de dégradation du couvert ligneux allant des formations denses fermées aux zones à emprise agricole caractérisées par un couvert arboré épars. A cet effet, des relevés ont été effectués entre octobre et décembre 2005, période de l'année durant laquelle la végétation ligneuse est encore verte, tandis que la végétation herbacée est sénescence et où les feux de végétation n'ont pas encore fait de grands ravages. L'emplacement des relevés a été choisi dans les zones paraissant les plus représentatives compte tenu des objectifs retenus (inventaire des ligneux) et des niveaux de perception spatiale explorés (résolution au sol de 20 mètres sur images SPOT).

Les observations ont lieu suivant un plan d'échantillonnage stratifié qui s'appuie à la fois sur nos observations directes sur le terrain, sur des travaux d'inventaires botaniques et forestiers antérieurs (Trekpo, 1999; Sokpon *et al*, 2004) et sur un ensemble d'informations cartographiques existantes. Les mesures *in situ* ont été réalisées au moyen de placettes circulaires de 0,1 ha (soit 17,84m de rayon) et portent essentiellement sur les caractéristiques dendrométriques de la couverture végétale. Il s'agit notamment de:

- la densité totale de ligneux (DTC);
- la densité du peuplement (DEP : pour les arbres ayant un diamètre à hauteur d'homme (dbh)  $\geq 10$  cm);
- la densité de la régénération (DER : ici, on considère les individus de diamètre compris entre  $1 \text{ cm} \leq \text{dbh} < 10$  cm);
- la surface terrière (STC : calculée pour tous les arbres et arbustes ayant un dbh  $\geq 10$  cm) et



- la richesse spécifique (RSP : nombre totale d'espèces recensées sur chaque placette échantillon).

L'ensemble des relevés effectués a permis de constituer une matrice de 77 placettes géo-référencées et suffisamment réparties dans différentes phytocénoses considérées comme représentatives de la diversité écologique de la zone d'étude.

### 5.3.2. Données satellitaires

La réalisation des objectifs fixés implique un choix judicieux des images satellitaires. Il fallait non seulement couvrir l'ensemble de la zone d'intérêt, choisir les dates appropriées qui s'accordent avec les relevés de terrain, mais tenir également compte de la disponibilité des images satellites. A cet sujet, Jensen (1983) affirme que les images prises pendant les périodes ensoleillées présentent un très bon contraste entre les différents détails, en particulier entre ceux de l'urbain et du non urbain. Le même auteur suggère d'utiliser des images acquises dans la même période de l'année pour la détection du changement et ce, afin de réduire les problèmes dus aux différences des angles solaires, aux changements phénologiques de la végétation et aux différences dans l'humidité des sols. Dans le présent chapitre, deux images satellitaires datant du 10 octobre 1986, et du 15 novembre 2005, ont été analysées. Les scènes prises par les satellites français SPOT ont été fournies par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES - France) via le programme OASIS (Optimising Access to Spot Infrastructure for Science). L'empreinte spatiale couvre le sud de la Commune de Bembèrèkè et le Nord de la Commune de Ndali comme l'indique la figure 5.1. Les scènes SPOT utilisées sont de type multispectral et l'image la plus récente disponible a été acquise de façon quasi contemporaine à la période de réalisation de l'inventaire de terrain (novembre-décembre, 2005), période optimale pour la meilleure perception des communautés végétales ligneuses dans la zone d'étude. Les scènes nous ont été livrées au format 2A après des corrections géométriques et radiométriques. Ces traitements sont nécessaires pour localiser et calibrer la mesure physique provenant des détecteurs du satellite et finalement obtenir des données géographiques et thématiques pertinentes. Les caractéristiques techniques des images exploitées figurent au tableau 5.1.

En complément d'informations pour l'image de 1986, des photographies aériennes (noir et blanc) à l'échelle du 1/75000, datant de décembre 1974 et janvier 1975 (Mission Kenting, FAO / UNDP) ont servi comme réalité de terrain pour le repérage des points de contrôle au sol et la reconnaissance des grands types physiologiques de la végétation.

Tableau 5.1: Caractéristiques techniques des images SPOT-XS utilisées.

Région géographique	Référence GRS	Dates d'acquisition	Satellite	Spectre électromagnétique	Bandes spectrales	Résolution spatiale
Bembèrèkè - Ndali	064-330	15/11/2005 10:36:44	Spot 4	X1 : Vert	0.50 - 0.59 µm	20 m
				X2 : Rouge	0.61 - 0.68 µm	20 m
				X3 : Proche Infrarouge	0.78 - 0.89 µm	20 m
				X4 : Moyen Infra - Rouge	1.58 - 1.75 µm	20 m
	064-330	11/10/1986 10:25:21	Spot 1	X1 : Vert	0.50 - 0.59 µm	20 m
				X2 : Rouge	0.61 - 0.68 µm	20 m
				X3 : Proche Infra - Rouge	0.78 - 0.89 µm	20 m

### 5.3.3. Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol

#### 5.3.3.1. Classification et post-classification des images SPOT

La technique de classification a pour objectif de réduire la quantité d'informations contenues dans les images satellitales pour définir des sous-ensembles homogènes en regroupant plusieurs pixels appelés groupes thématiques (ou classes). Dans la présente étude, nous avons soumis les deux images retenues à la méthode de classification supervisée. Cette dernière permet de regrouper automatiquement des objets semblables à des objets de référence identifiés sur le terrain. Par ailleurs, l'utilisation de la comparaison post-classification convient à cette étude, puisque les données des différentes deux dates ont été classées séparément (Weismiller *et al.*, 1977). Selon Singh (1989), cette méthode, permet de minimiser les effets des conditions atmosphériques différentes et de l'utilisation de capteurs différents lors de l'acquisition des images multi-dates.

#### 5.3.3.2. Évaluation de la précision des classifications

Des matrices de confusion ont été générées après la classification des scènes retenues. Les erreurs d'omission et de commission ont été calculées pour chaque unité d'occupation du sol et les valeurs obtenues indiquent la précision de l'interprétation de chaque classe. En considérant l'exemple de la forêt dense, on parle d'erreur d'omission quand des zones de forêt dense se retrouvent dans une autre classe du résultat de la classification. L'erreur de commission par contre intervient, lorsque des pixels classés en forêt dense ne seraient pas de la forêt dense sur le terrain. Enfin, précision totale est donnée par l'indice de Kappa (Pontius, 2000). Cet indice incorpore tous les éléments de la matrice de confusion et est largement utilisé dans l'évaluation de la précision d'une classification d'image satellitaire et dans les méthodes de détection du changement (Foody, 1992). Signalons que l'indice traduit un niveau de concordance d'autant plus élevé que sa valeur est proche de 1.

#### 5.3.3.3. Identification et typologie des zones de changement

Le postulat fondamental de l'utilisation de la télédétection spatiale pour la détection du changement se résume à ce que tout changement dans la couverture du sol résulte en un changement dans les valeurs spectrales. Encore appelée analyse diachronique dans la pratique, cette opération permet d'apprécier les changements biophysiques qui ont lieu dans la zone d'étude au cours des deux dernières décennies (1986 - 2005). Etant donné que l'essentiel de l'étude se rapporte à la thématique forestière, il nous paraît important, pour éviter toute ambiguïté, d'apporter quelques éléments de précision terminologique que nous utiliserons dans la suite de notre texte. Les définitions figurant ci-dessous sont tirées des documents du Département des forêts de l'Organisation des Nations-Unis pour l'alimentation et l'agriculture FAO (FAO, 2000a). Les cinq termes définis se rapportent essentiellement au couvert forestier et la figure 5.3 donne un aperçu de la façon dont ils sont reliés. Des informations plus détaillées sont mentionnées dans les notices explicatives consignées dans l'annexe 5.2. Ceci étant, nous entendons par :

- *Déboisement*: la conversion de la forêt en une autre utilisation du sol *ou* la réduction à long terme du couvert forestier en dessous du seuil de 10%.
- *Dégradation forestière*: une réduction du couvert forestier ou du matériel sur pied dans une forêt.

- *Amélioration forestière*: l'accroissement du couvert forestier ou du matériel sur pied dans une forêt.
- *Reboisement*: le rétablissement des formations forestières après une situation temporaire où le couvert forestier était inférieur à 10% du fait de perturbations d'origine humaine ou naturelle.
- *Boisement*: la conversion des terres utilisées en des espaces boisés, ou l'accroissement du couvert forestier pour atteindre une densité supérieure au seuil de 10%.

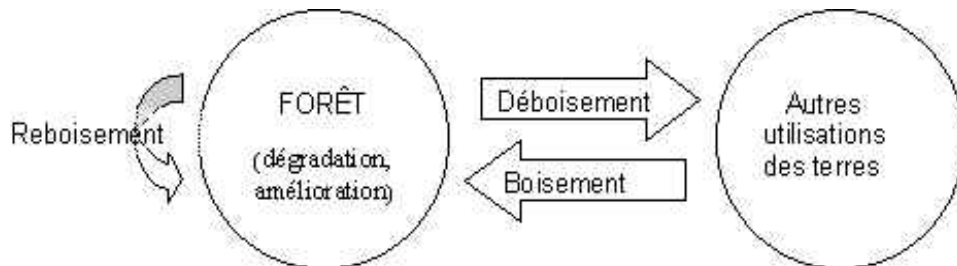




Figure 5.3 : Relations entre les termes indiquant les changements du couvert forestier dans les régions tropicales (source : <http://www.fao.org/docrep/meeting/003/X9835f/X9835f01.htm>)

Dans l'optique d'identifier et de cartographier les impacts humains sur le couvert végétal, nous nous sommes basé sur l'analyse des contrastes locaux comme suggéré par Gond *et al.*, (2004). Ainsi, les zones d'impact sont clairement perceptibles par l'amplification des contrastes formations végétales / non-végétales et par la superposition des néo-canaux (indices calculés pour chaque image). Un seuillage a été ensuite effectué pour isoler les pixels répondant aux critères de réflectances caractéristiques des activités humaines (sol nu, champs, recrus forestières). Ainsi, chaque image classifiée a été transformée en comptes numériques suite à une codification des pixels correspondant au même type d'occupation du sol dont les valeurs sont comprises entre 1 et 6 comme indiqué dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Grille de classification et règle de pondération des différentes classes d'occupation du sol (fonction de la productivité des unités d'occupation du sol)

Sigles	Nomenclature de la classe	Valeur de pondération	 Gradient de d'amélioration	 Gradient de dégradation
FDG	Forêts denses - Forêts galeries	6		
FCL	Forêts claires	5		
SARB	Savanes boisées et savanes arborées	4		
SAI	Savanes arbustives	3		
MCJP	Mosaïques champs-jachères-Plantations	2		
ZBR	Zones brûlées	1		
AGGLO	Agglomérations, routes et voies d'accès			
SNAR	Sols nus, dalles et affleurements rocheux			

Ces valeurs, attribuées de façon empirique, répondent à une logique de succession régressive correspondant aux strates d'occupation du sol allant des formations végétales denses (forêts denses sèches –forêts galeries, forêts claires) aux formations peu recouvrantes (savanes arborées-boisées, savanes arbustives, mosaïques champs–jachères-plantations,...). Une fois les pixels isolés, leur vectorisation automatique a permis leur intégration dans un Système d'Information Géographique (SIG).

La détection des changements a été effectuée grâce au calcul de la variation des valeurs pondérées de chaque pixel entre la date de référence (1986) et la période la plus récente (2005). Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta(i) = [V(i)_{(1986)} - V(i)_{(2005)}]$$

Avec :  $\Delta(i)$  : variation du compte numérique du pixel (i) entre 1986 et 2005 ;  $V(i)_{(1986)}$  : valeur pondérée du pixel(i) en 1986 ;  $V(i)_{(2005)}$  : valeur pondérée du même pixel en 2005.

Sur la base des résultats numériques obtenus après cette soustraction d'image, une typologie du changement prenant en compte sept modalités de changements qualitatifs a été élaborée comme l'indique le tableau 5.3. Une matrice de changement entre les deux images a également été élaborée. Celle-ci rend compte non seulement des proportions respectives des unités d'occupation du sol affectées (ou non) par les changements, mais aussi de la répartition des changements sur les autres classes concernées par ces changements d'affectation.

Tableau 5.3 : Typologie des changements intervenus au niveau des unités / classes d'occupation du sol

Variation du compte numérique $\Delta(i)$	Typologie du changement
$\leq - 3$	Déforestation
- 2	Déboisement
-1	Dégradation
0	Zone stable
+1	Amélioration
+2	Boisement
$\geq +3$	Reboisement

A partir du SIG, des statistiques spatiales ont été réalisées (surfaces individuelles et cumulées, répartition spatiale). Le logiciel Arc-GIS 9.2 (ESRI, 2004) a été d'une grande contribution pour l'affichage et le calcul des résultats numériques. Enfin, pour chaque unité de l'occupation du sol, le taux d'évolution annuelle été calculé.

### 5.3.4. Estimation de la productivité des formations végétales à partir des données radiométriques

#### 5.3.4.1. Etalonnage et extraction des valeurs radiométriques sur les sites tests

L'étalonnage radiométrique des données satellitaires nous a permis de convertir le signal enregistré par le satellite en une variable physique telle la luminance, puis en réflectance (Annexe 5.1). Le positionnement géographique des relevés de terrain sur les images a été réalisé par GPS. Après géo-localisation des placettes de relevés sur l'image, les valeurs de réflectance de ces placettes dans chaque canal SPOT (XS1, XS2 et XS3) sont extraites à partir d'une auréole 50 m de rayon axé sur chaque pixel correspondant au centre des placettes de relevés. Ceci permet, d'une part, de prendre en considération les valeurs des pixels immédiatement juxtaposés au pixel central, contournant de fait les erreurs de localisation liées à la précision théorique du GPS (10 m) et d'autre part, d'avoir des points échantillons sur l'image ayant une surface presque équivalente à celle des placettes (1000 m<sup>2</sup>).

### 5.3.4.2. Calcul d'indices de végétation

Le calcul d'un indice de télédétection se révèle comme un paramètre indicatif de l'état de l'environnement et une source d'information potentiellement utile sur les milieux naturels. Les indices de télédétection synthétisent l'intensité d'un phénomène trop complexe pour être décrit par des paramètres simples et connus (Bannari *et al.*, 1995). Dès lors, leur utilisation requiert un examen attentif de la situation et une définition claire des renseignements que l'on souhaite extraire de l'image. A ce jour, il en existe plus d'une vingtaine (Bariou *et al.*, 1985; Girard & Girard, 1999; Jensen, 2000; Caloz & Collet, 2001). La réflectance de la végétation en milieu naturel est le résultat de nombreux facteurs et ses caractéristiques essentielles dépendent, d'une part, de la biomasse verte active et d'autre part, de la rugosité de surface liée à la structure et à la quantité de cette végétation (Maxwell, 1983). Dans la pratique, la plupart des indices de végétation reposent sur le fait que la végétation a une absorption maximale pour les longueurs d'ondes entre 0,45  $\mu\text{m}$  et 0,6  $\mu\text{m}$  à l'usage de la photosynthèse et qu'elle réfléchit une importante quantité d'énergie dans la partie proche infrarouge du spectre.

Eu égard au fait que la thématique étudiée dans le présent travail se rapporte principalement au couvert végétal qui, lui-même, dépend de la nature du sol, nous avons sélectionné quatre types d'indices de végétation couramment utilisés dans les travaux se rapportant à la thématique forestière et un indice de sols qui, quant à lui, est sensible aux caractéristiques découlant de la nature et de la couverture des sols (tableau 5.4).

Tableau 5.4: Tableau des indices de télédétection retenus (Adapté de Girard & Girard, 1999)

Nom de l'indice	Sigle	Equation	Propriétés	Auteurs
Difference Vegetation Index (Indice différentiel de végétation)	DVI	$XS3 - XS2$	Renseigne sur une couverture suffisante ou non du sol par la végétation. Permet une bonne discrimination des éléments du paysage.	Richardson & Everitt (1992)
Ratio Vegetation Index (indice Ratio)	RVI	$XS3 / XS2$	Bonne représentation de la végétation là où la valeur du rapport est le plus grande.	Knipling (1970), Viollier <i>et al.</i> (1985)
Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation à différence normalisée)	NDVI	$\frac{(XS3 - XS2)}{(XS3 + XS2)}$	Maximise l'effet du couvert végétal dense et minimise l'effet du couvert très clairsemé. La différence normalisée permet de rendre compte de ces deux phénomènes sur une même image.	Rouse <i>et al.</i> , (1973) Tucker (1979)
Soil Adjusted Vegetation Index (Indice de végétation ajusté au sol)	SAVI	$\frac{(XS3 - XS2)}{(XS3 + XS2 + L)}(1 + L)$	Varie avec la densité de végétation, la constante ( $L=0,5$ ) réduit l'influence du sol à travers une série de densités de végétation.	Huete (1988)
Brightness (Indice de Brillance)	IB	$\sqrt{XS1^2 + XS2^2 + \frac{XS3^2}{3}}$	Sensible à la brillance des sols, il oppose les surfaces bâties, dénudées très réfléchissantes, aux surfaces absorbantes (zones brûlées et couverts végétaux plus ou moins denses).	Pouget <i>et al.</i> , (1991)

### 5.3.4.3. Modèles d'estimation de la productivité ligneuse

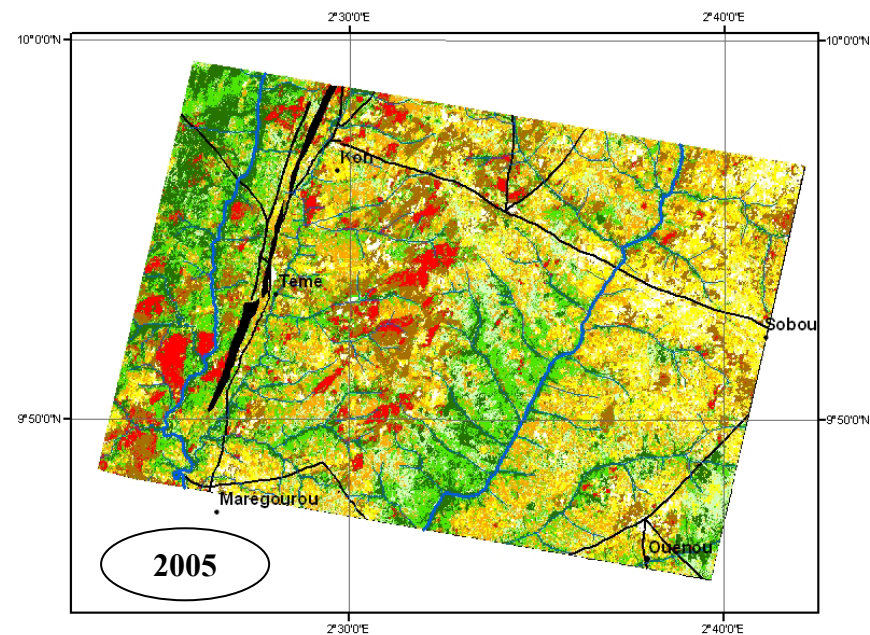
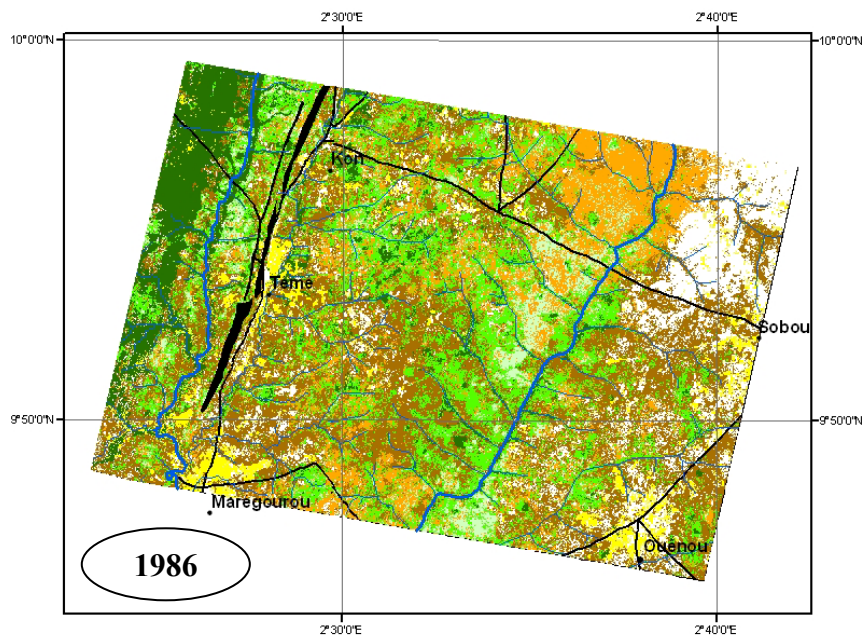
Dans l'optique d'une spatialisation de la productivité de chaque unité d'occupation du sol, nous avons tenté d'établir des relations mathématiques entre les paramètres dendrométriques mesurés sur le terrain et les indices radiométriques calculés à partir de l'image SPOT de 2005. Grâce au positionnement géographique sur les images néo-canaux issues du calcul des indices radiométriques sur l'image SPOT du 15/11/2005, les valeurs de chaque indice associées à chaque placette échantillon ont été extraites. Une matrice de corrélation entre données radiométriques et valeurs moyennes des paramètres dendrométriques a été élaborée. Cette dernière donne, un aperçu statistique de la significativité des liaisons existant entre variables de télédétection et variables dendrométriques mesurées *in situ*, toutes strates confondues. Ensuite, des régressions simples ont été calculées entre les indices les plus pertinents et chacune des variables dendrométriques les mieux corrélés à ces indices afin de choisir les modèles les plus appropriés à la prédiction de la productivité des classes d'occupation du sol à partir des variables de télédétection. La performance de chaque modèle de prédiction a été appréciée grâce aux estimateurs tels le  $R^2$  ajusté (qui augmente avec le pouvoir explicatif du modèle et diminue avec les pertes en degrés de liberté), le critère d'AIC (Akaike Information Criterion : entre deux modèles, il est préférable d'opter pour celui dont la valeur du critère d'Akaike est le plus faible) et la significativité  $p$  des régressions. Une analyse globale de résultats obtenus a permis de discuter de leur validité ainsi que des perspectives d'amélioration.












## 5.4. RESULTATS

### 5.4.1. Dynamique d'occupation du sol

#### 5.4.1.1 Analyse des résultats de la classification des images SPOT.

Les résultats présentés dans cette section découlent de la classification supervisée des images SPOT du 10/10/1986 et du 15/11/2005 (Figures 5.4), suivant la technique du maximum de ressemblance (Maximum Likelihood). Il importe de signaler la présence de nuages sur l'image du 10/10/1986 (image de référence fournie par le CNES). Cette couverture nuageuse estimée à 5% de la scène, est assez localisée dans la zone nord-est de l'image ; un masque a donc été élaboré sur les nuages pour les isoler du reste de la scène. Les savanes saxicoles ont elle aussi été masquées sur les scènes traitées ; ceci est justifié par la situation topographique particulière de ce faciès végétal, difficilement accessible aux populations riveraines et que par conséquent, subit moins de pressions. Au total, huit classes communes d'occupation du sol ont été identifiées sur les deux images retenues (1986 et 2005). Toutefois, l'image de 2005 se distingue de celle de 1986 par l'apparition d'une classe supplémentaire : les zones brûlées. Cette situation suggère en particulier que les feux de végétation utilisés par les populations comme outil de gestion des exploitations agricoles et comme technique de chasse, gagnent de plus en plus en ampleur spatiale. Les matrices de confusion calculées pour l'évaluation de la précision de la classification de chaque image (Annexes 5.3a et 5.4a) fournissent une précision statistique globale allant de 80,22% à 84,98% avec des indices de Kappa de 0,756 et 0,828 respectivement pour l'image de 1986 et 2005. D'après Pontius (2000), dans une étude de l'occupation du sol, lorsque l'indice de Kappa évalué dans les opérations de classification est supérieur à 75%, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés.



	Forêts galeries et forêts denses : 9761 ha (15,6%)		Cours d'eau principaux
	Forêts claires : 16788 ha (26,9%)		Cours d'eau secondaires
	Savanes boisées et arborées : 7133 ha (11,4%)		Voies d'accès
	Savanes arbustives : 8601 ha (13,8%)		
	Savanes saxicoles : 693 ha (1,1%)		
	Mosaïques champs-jachères-plantations : 3086 ha (4,9%)		
	Sols nus et affleurements rocheux : 12343 ha (19,8%)		
	Agglomérations et zones habitées : 4074 ha (6,5%)		
<b>Superficie totale : 62479 ha (100%)</b>			













	Forêts galeries et forêts denses : 4313 ha (6,9%)		Cours d'eau principaux
	Forêts claires : 11838 ha (18,9%)		Cours d'eau secondaires
	Savanes boisées et arborées : 6766 ha (10,8%)		Voies d'accès
	Savanes arbustives : 11395 ha (18,2%)		
	Savanes saxicoles : 693 ha (1,1%)		
	Zones brûlées : 2090 ha (4,6%)		
	Mosaïques champs-jachères-plantations : 9604 ha (15,4%)		
	Sols nus et affleurements rocheux : 10586 ha (16,9%)		
	Agglomérations et zones habitées : 4394 ha (7%)		
<b>Superficie totale : 62479 ha (100%)</b>			

Figure 5.4 : Carte d'occupation du sol du secteur Nord de Ndali en 1986 et en 2005. Source : Scène HRV-XS 064-330, SPOT-1 du 10/10/1986 SPOT-4 du 15/11/2005 (Copyright ©1986 et 2005 CNES, OASIS programme, Distribution SPOT Image)



L'analyse des classes d'occupation du sol (Annexe 5.3b et Annexe 5.4b) montre, pour l'image du 10/10/1986, qu'à l'exception des savanes arbustives, savanes arborées et boisées et forêts claires qui donnent des précisions de classification comprises entre 46,3% et 67%, toutes les autres classes affichent des précisions spécifiques supérieures à 78%. Par contre, pour l'image du 15/11/2005, les précisions les plus faibles sont comprises entre 65% et 71,6% et concernent les mosaïques champs-jachères et plantations, les savanes arbustives et savanes arborées-boisées. Remarquons qu'en dépit d'une classification individuelle des deux images, les précisions observées pour les zones à couverture végétale dense (forêts denses, galeries forestières, plantations), de même que les zones bâties, les hameaux et les sols nus, sont partout supérieures à 90%. La faiblesse de précision de classification de l'image de 1986 pourrait être liée d'une part à la couverture nuageuse (sur-évaluation des zones bâties) et d'autre part, au choix des zones d'entraînement sur la même image comme en témoignent les valeurs des erreurs par omission et par commission (Annexe 5.3b et Annexe 5.4b). En outre, pour l'année 1986, en l'absence de mesures directes sur le terrain, ce sont les photographies aériennes (Mission Kenting, FAO / UNDP, 1974-75) de la zone qui ont servi de base au choix des zones d'entraînement. Ce qui n'est pas le cas pour l'année 2005, où les campagnes d'inventaires effectuées ont servi de vérité terrain. En résumé, les résultats obtenus témoignent d'une bonne performance de la technique de classification supervisée et de l'utilisation des contrastes locaux pour la séparation des éléments (végétation / non-végétation) dans les images exploitées.

#### 5.4.1.2. Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2005

L'examen de la situation des différentes unités d'occupation du sol en 2005 par rapport à l'année de référence (1986) montre une forte extension des champs, jachères et plantations (211,2%), suivis des savanes arbustives (32,5%) et des zones brûlées (5% de la superficie de la zone d'étude) et une augmentation sensible des zones habitées (Figure 5.5).

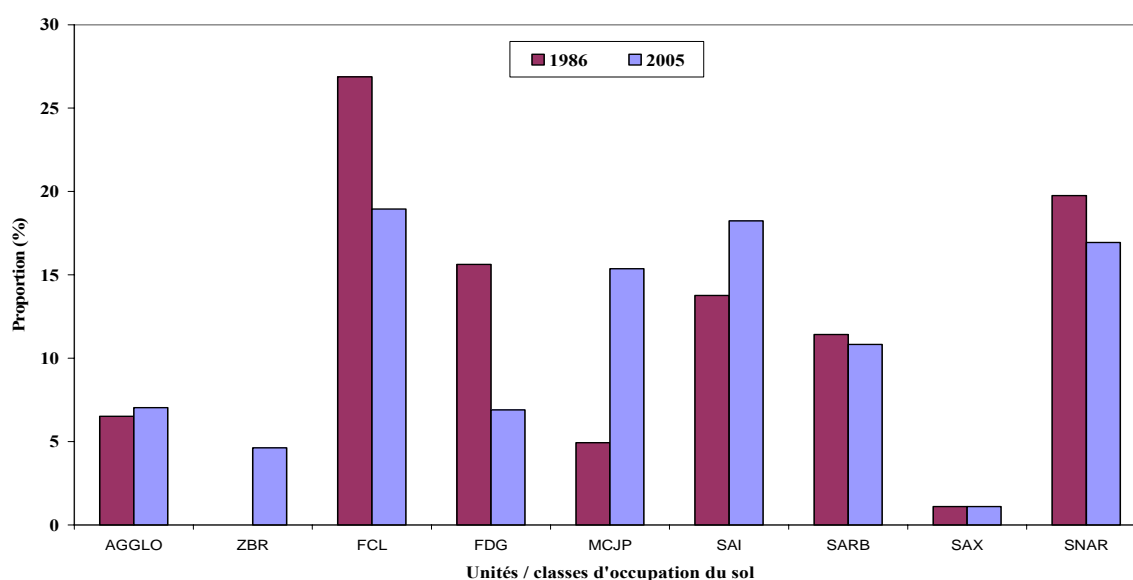


Figure 5.5: Dynamique de l'occupation du sol en 20 ans (1986-2005) dans la zone d'étude.  
 Légende : FDG (Forêts denses - Forêts galeries) ; FCL (Forêts claires) ; SARB (Savanes boisées et savanes arborées) ; SAI (Savanes arbustives) ; MCJP (Mosaïques champs-jachères -Plantations) ; ZBR (Zones brûlées) ; AGGLO (Agglomérations, hameaux, routes et voies d'accès) ; SNAR (Sols nus, dalles et affleurements rocheux).



Ces résultats mettent en lumière l'emprise spatiale des activités de production agricole et concordent avec l'augmentation des besoins de facteurs de production supplémentaire (nouvelles terres agricoles) pour faire face à la croissance démographique galopante de la zone. Il s'en suit d'importantes modifications dans la couverture végétale qui s'opèrent principalement au détriment des zones boisées. Ainsi, au cours des deux dernières décennies, les forêts denses et forêts galeries de la zone d'étude ont perdu plus de la moitié de leur superficie initiale (-55,8%). La même tendance à la réduction spatiale a été observée au niveau des forêts claires (-29,5%) et dans une moindre mesure, au niveau des savanes arborées et boisées (-5,1%). Corrélativement à la réduction des strates boisées, on note une tendance à l'extension des zones brûlées qui, pratiquement absentes en 1986, occupent en 2005 près de 5% de la superficie de la zone d'étude. Parallèlement à la diminution des formations boisées, on note une extension des formations ligneuses marginales, notamment les savanes arbustives. Ces dernières ont, au cours des deux dernières décennies, connu une progression de près d'un tiers (+32,5%) de la superficie qu'elles occupaient initialement.

#### **5.4.2. Typologie et répartition spatiale des changements intervenus**

Les différentes modifications qualitatives intervenues au niveau de l'ensemble des unités d'occupation du sol au cours la période analysée ont été examinées grâce aux variations des valeurs pondérées des différentes classes entre 1986 et 2005. En fonction de l'amplitude de ces variations, la typologie des changements intervenus a été notée conformément à la nomenclature suggérée dans le tableau 5.4 (*op.cit.*), puis la distribution spatiale des pixels est illustrée par la figure 5.6.

Les résultats obtenus (tableau 5.5) montrent qu'au cours des deux dernières décennies, 19,6% de la surface de la zone, autrefois constitués de formations ligneuses plus ou moins denses ont complètement disparu et ont été convertis en terres arables (déforestation) ; 12,9% du secteur sont déboisés, et 13,9% de cette superficie sont concernés par une légère dégradation des formations ligneuses. A l'opposé de cette tendance, on observe que 21,8% de l'aire d'étude n'ont subi aucun changement, pendant que moins du tiers (31,7%) de cette zone connaît une amélioration de la couverture ligneuse répartie comme suit : 11,7% d'amélioration (recrût forestier); 8,6% de boisement modéré et 11,4% de l'aire d'étude où la forêt s'est reconstituée (reboisement).

Somme toute, 46,5% de la superficie de l'aire d'étude ont subi un déclin de la couverture végétale, tandis que 31,7% de cette surface connaissent une augmentation sensible du couvert ligneux et seulement 21,8% de la zone est demeuré stable au cours de la période étudiée.

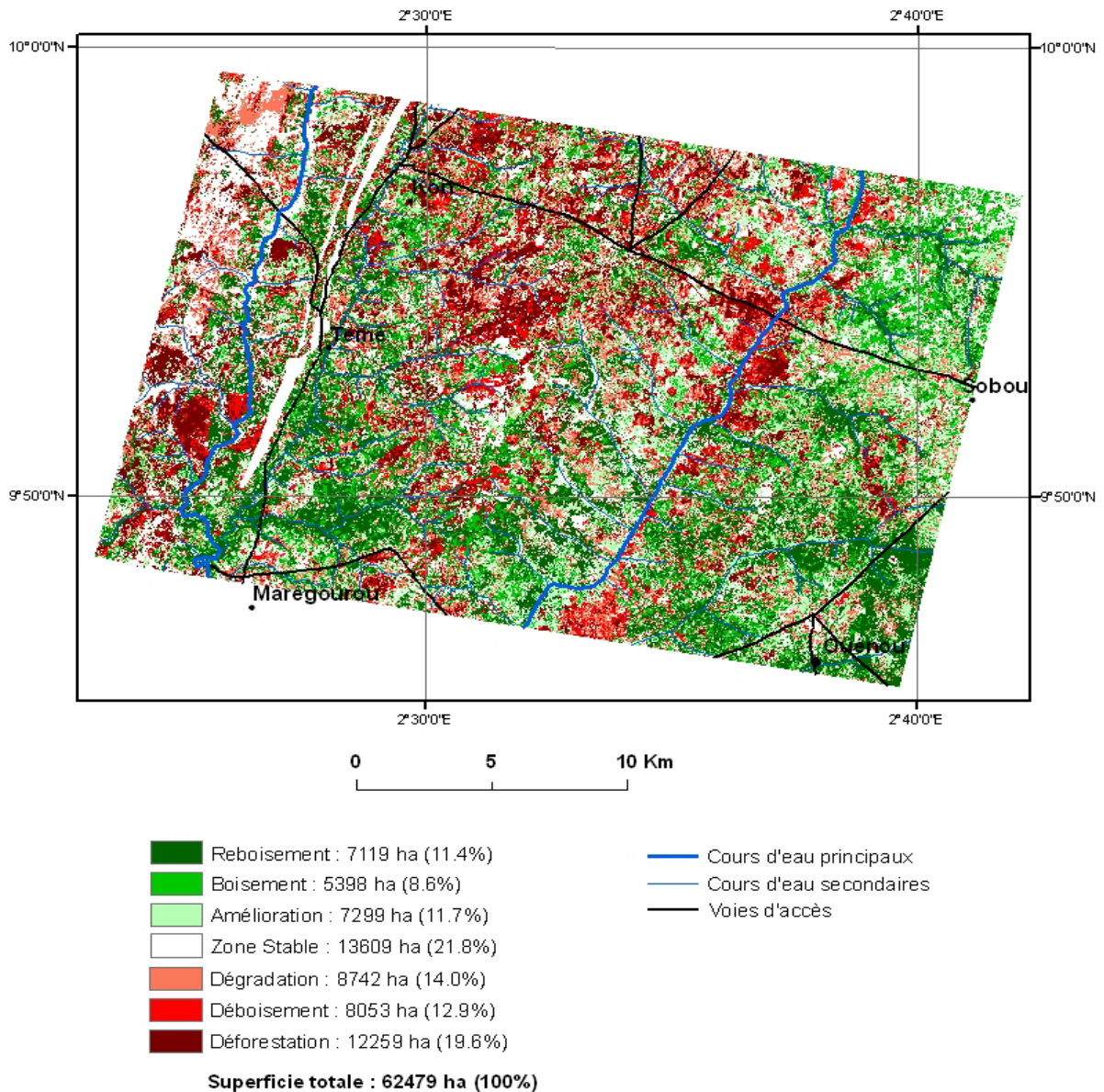


Figure 5.6: Dynamique de changement du couvert végétal dans la zone de calibrage. Sources : Scènes HRV-XS 064-330, SPOT-1 du 10/10/1986 et SPOT-4 du 15/11/2005 (Copyright ©1986 et 2005 CNES, OASIS programme, Distribution SPOT Image)

Tableau 5.5 : Classification des pixels en fonction des changements notés dans les unités d'occupation du sol entre 1986 et 2005.

Typologie du changement	Superficie concernée		Proportion (%)	Sous-total (%)
	(Ha)	(Km <sup>2</sup> )		
Déforestation	12259,3	122,6	19,6	<b>46,5</b>
Déboisement	8053,2	80,5	12,9	
Dégradation	8741,6	87,4	13,9	
Stable	13608,8	136,1	21,8	<b>21,8</b>
Amélioration	7299,2	72,9	11,7	
Boisement	5397,7	53,9	8,6	<b>31,7</b>
Reboisement	7119,3	71,2	11,4	
<b>TOTAL</b>	<b>62479,2</b>	<b>624,8</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Afin de comprendre les changements intervenus et d'identifier les forces causales qui les expliquent, des observations plus détaillées ont été faites sur chacune des unités d'occupation du sol. L'examen conjoint de la matrice de changement des classes d'occupation du sol (Annexe 5.5) et des taux d'évolution annuelle (Tableau 5.6) de ces classes montre que les changements intervenus varient d'une unité d'occupation du sol à une autre avec une grande amplitude. Les plus grandes variations ont été observées sur les classes de mosaïque champs-jachères-plantations et de forêt galerie.

Tableau 5.6: Taux d'évolution des unités d'occupation du sol au sein de la même classe (période : 1986-2005)

STRATES	Surface / Proportion (1986)		Surface / Proportion (2005)		Changement (1986-2005) (Ha)	Taux d'évolution au sein de la classe (%)	Taux annuelle d'évolution (%)
	(Ha)	%	(Ha)	%			
FGD	9761	15,6	4313	6,9	-5448	-55,8	<b>-2,8</b>
FCL	16788	26,9	11838	18,9	-4951	-29,5	<b>-1,5</b>
SARB	7133	11,4	6766	10,8	-367	-5,1	-0,3
SAX	693	1,1	693	1,1	ND	ND	ND
SAI	8601	13,8	11395	18,2	2795	32,5	+1,6
MCJP	3086	4,9	9604	15,4	6517	211,2	<b>+10,6</b>
ZBR	ND	ND	2890	4,6	2890	100	+5
AGGLO	4074	6,5	4394	7,0	320	7,9	+0,4
SNAR	12343	19,8	10586	16,9	-1757	-14,2	-0,7
Total	62479	100	62479	100			

Légende: FDG (Forêts denses - Forêts galeries) ; FCL (Forêts claires) ; SARB (Savanes boisées et savanes arborées) ; SAI (Savanes arbustives) ; MCJP (Mosaïques champs-jachères -Plantations) ; ZBR (Zones brûlées) ; AGGLO (Agglomérations, hameaux, routes et voies d'accès) ; SNAR (Sols nus, dalles et affleurements rocheux), ND : Non Déterminé.

Par ailleurs, consécutivement à l'amplitude des variations, les taux d'évolution au sein même des unités varient aussi d'une classe à une autre. En outre, au niveau de:

- la forêt dense sèche - galerie forestière : le taux de diminution moyen annuel est estimé à -2,8% et représente l'un des plus élevés sur l'ensemble du site étudié. La tendance régressive relevée au niveau de cette classe s'explique principalement par l'exploitation forestière. Cette dernière se traduit par la disparition progressive de certaines espèces végétales nobles comme le caïlcédrat (*Kaya senegalensis*), le lingué (*Azelia africana*), et le vène (*Pterocarpus erinaceus*) qui sont des essences protégées par l'administration forestière. En dehors de l'exploitation sélective des essences de valeur, les forêts denses sèches et les galeries forestières subissent également les assauts saisonniers des éleveurs transhumants et de leur cheptel à la recherche des ressources fourragères et de l'eau. En outre, elles constituent les seules formations denses qui conservent encore de la verdure pendant la période sèche. La réduction de la surface de ces deux strates denses réunies est estimée à - 272 ha/an. Si elles ne disparaissent pas complètement, elles sont principalement converties en des variantes boisées dégradées telles la forêt claire ou les savanes arborées - boisées.
- la forêt claire: cette formation est dégradée au profit principalement des savanes arborées /boisées, savanes arbustives, mosaïques champs-jachères, jachères et espaces cultivés. L'exploitation du bois et la production du charbon de bois expliquent en partie la transformation progressive de la forêt claire en d'autres formations moins denses et plus marginales (savane arbustive). Une partie de cette classe est aujourd'hui transformée en

zone d'habitation / hameaux. Le taux moyen annuel de régression est de -1,5 %, ce qui correspond à diminution de 248 ha/an.

- la savane arborée -boisée : cette classe d'occupation du sol affiche un taux de régression moyen annuel de -0,3% (l'un des taux les plus faibles observés dans la zone au cours de la période d'étude), correspondant à une diminution de 18 ha/an. Les savanes arborées/boisées, lorsqu'elles sont dégradées, sont principalement converties en formations plus marginales et moins boisées comme les savanes arbustives ou en zones de culture et jachères. Le faciès végétal qui marque typiquement cette classe est le parc à karité-néré.
- la savane arbustive : à l'opposé des formations boisées précédemment citées, l'extension de la savane arbustive s'explique à la fois par deux phénomènes antagonistes. Elle résulte d'une part de la dégradation des formations boisées et d'autre part du vieillissement des jachères caractérisé par un recouvrement ligneux de plus en plus important. Ce sont les vestiges de la reconstitution du couvert végétal boisé suite à une exploitation humaine plus ou moins récente. Le taux annuel moyen d'extension de la savane arbustive est estimé à +1,6 % ce qui correspond à une emprise spatiale de 140 ha/an dans la zone d'étude.
- les mosaïques champs-jachères-plantations : sous cette classe sont regroupées les unités d'occupation du sol issues de l'action directe de l'homme. Elles ont connu une forte extension spatiale au cours des deux dernières décennies (+326 ha/an). La nécessité pour les populations rurales d'étendre les surfaces de production vivrière et industrielle (coton-culture) explique principalement ce phénomène. En outre, suite à de nombreux travaux de recherches agronomiques et technologiques, de longues années de vulgarisation, de formation et d'information des producteurs agricoles, la place de la culture du coton a fortement évolué dans les systèmes de production agricole. En effet, le coton qui était autrefois essentiellement une culture associée aux vivriers est devenu actuellement une spéculacation exclusivement installée en culture pure et surtout le moteur de l'économie des zones de savanes. Dès lors, chaque année, les surfaces agricoles et les zones à emprise agricole augmentent de + 10,6%. Aussi, faut-il remarquer qu'en dehors des populations autochtones, on note l'afflux des migrants agricoles des régions voisines, en quête de terres vierges et la sédentarisation de plus en plus fréquente des pasteurs Peulhs, qui aujourd'hui s'adonnent à l'agro-élevage. Ces colons agricoles érigent le plus souvent des hameaux au cœur des formations végétales, où ils s'installent pour pratiquer l'agriculture (pratiques culturelles très souvent destructrices des ressources végétales) et d'autres activités génératrices de revenus. Par ailleurs, nos observations directes sur le terrain, révèlent que les plantations dans la zone sont constituées en grande partie d'espèces comme le teck (*Tectona grandis*) et l'anacardier (*Anacardium occidentale*); ce dernier a été adopté récemment pour occuper les terres mises en jachère. Compte tenu des revenus importants que les agriculteurs tirent de la vente des noix d'*Anacardium occidentale*, cette essence a pris progressivement de l'ampleur.
- les zones brûlées : à peine perceptible sur l'image du 10/10/1986, cette classe a été détectée sur une superficie de 2890 ha le 15/11/2005. Cette situation s'explique principalement par le choix de la période de prise des images utilisées. En effet, le mois d'octobre correspond à la fin de la saison des pluies dans la zone d'étude. Cette période correspond également au moment d'intervention des feux (ici feux précoces), partie intégrante des techniques culturelles caractéristiques de l'agriculture subsaharienne (cultures itinérantes sur brûlis). Ainsi, dans les zones boisées, cette pratique est également associée à l'abattage des arbres pour l'obtention du bois de chauffe et la fabrication de charbon de bois. De plus, on observe parfois des incendies volontairement allumés principalement pour la régénération des pâturages (cas des éleveurs), lors de la préparation des champs

(agriculteurs), le nettoyage des pare-feux (plantations) et la pratique de la chasse collective par feu encerclant. La non-maîtrise de ces feux génère chaque année des dégâts importants aussi bien au niveau de la faune que de la flore.

- les agglomérations et hameaux: le taux d'occupation du sol par les agglomérations est passé de 6,5% en 1986 à 7% en 2005, soit une augmentation de 320 hectares. Cette augmentation de la superficie des agglomérations s'est faite surtout au détriment des superficies des champs et jachères, de la forêt claire, de la savane arbustive, de la savane arborée-boisée et des sols autrefois plus ou moins dénudés. La principale cause de cet accroissement est la poussée démographique accrue durant ces dernières décennies. L'essor du développement agricole dans le milieu, avec l'installation de nouveaux colons agricoles, expliquent la création de nouvelles agglomérations, hameaux et villages. De plus, certaines agglomérations ont vu le jour avec le développement et l'amélioration des pistes de desserte rurale au bord desquelles elles se sont fixées.

### 5.4.3. Relations entre paramètres mesurés sur les formations végétales et indices radiométriques

De l'analyse des résultats issus de la confrontation entre indices de télédétection et paramètres mesurés sur les formations végétales, il se dégage des corrélations particulièrement élevées entre les indices RVI, NDVI et SAVI (tableau 5.7).

Tableau 5.7 : Corrélations entre descripteurs du couvert végétal et indices de télédétection (\*En gras : coefficient corrélation ; en italique : significativité p de la corrélation).

	DTC	STC	DEP	DER	RSP	NDVI	RVI	SAVI	DVI
STC	<b>0,16*</b> <i>0,17</i>								
DEP	<b>0,53</b> <i>0,00</i>	<b>0,11</b> <i>0,36</i>							
DER	<b>0,84</b> <i>0,00</i>	<b>0,12</b> <i>0,29</i>	<b>-0,01</b> <i>0,95</i>						
RSP	<b>0,30</b> <i>0,01</i>	<b>0,25</b> <i>0,03</i>	<b>0,33</b> <i>0,00</i>	<b>0,14</b> <i>0,22</i>					
NDVI	<b>0,15</b> <i>0,20</i>	<b>0,17</b> <i>0,14</i>	<b>-0,27</b> <i>0,02</i>	<b>0,34</b> <i>0,00</i>	<b>0,05</b> <i>0,70</i>				
RVI	<b>0,22</b> <i>0,06</i>	<b>0,15</b> <i>0,18</i>	<b>-0,25</b> <i>0,03</i>	<b>0,41</b> <i>0,00</i>	<b>0,04</b> <i>0,75</i>	<b>0,99</b> <i>0,00</i>			
SAVI	<b>0,49</b> <i>0,00</i>	<b>0,13</b> <i>0,25</i>	<b>-0,24</b> <i>0,03</i>	<b>0,73</b> <i>0,00</i>	<b>0,02</b> <i>0,87</i>	<b>0,85</b> <i>0,00</i>	<b>0,88</b> <i>0,00</i>		
DVI	<b>0,69</b> <i>0,00</i>	<b>0,10</b> <i>0,39</i>	<b>-0,16</b> <i>0,18</i>	<b>0,91</b> <i>0,00</i>	<b>0,02</b> <i>0,88</i>	<b>0,61</b> <i>0,00</i>	<b>0,67</b> <i>0,00</i>	<b>0,93</b> <i>0,00</i>	
IB	<b>0,71</b> <i>0,00</i>	<b>0,07</b> <i>0,57</i>	<b>0,13</b> <i>0,26</i>	<b>0,93</b> <i>0,00</i>	<b>0,01</b> <i>0,94</i>	<b>0,40</b> <i>0,00</i>	<b>0,46</b> <i>0,00</i>	<b>0,81</b> <i>0,00</i>	<b>0,96</b> <i>0,00</i>

Ce résultat indique l'information radiométrique qu'ils contiennent présente en effet, une configuration analogue traduisant ainsi une certaine équivalence entre ces indices. Par contre, l'indice de brillance caractéristique de l'influence du sol sur le signal radiométrique, se démarque nettement de cette tendance généralisée. Cet indice est en effet, faiblement corrélé aux indices NDVI, RVI et fortement corrélé au DVI et SAVI. L'utilisation de l'IB, s'annonce

prometteuse puisqu'il n'est que faiblement corrélé avec la majorité des indices sélectionnés, ce qui suggère qu'il regorge d'informations complémentaires par rapport à l'ensemble des autres indices.

Quant aux relations entre indices de télédétection et variables décrivant les formations végétales, les résultats montrent que seuls le SAVI, DVI et l'IB sont significativement corrélés à la densité de la régénération ( $R^2 \sim [0,73 - 0,93]$ ), puis à la densité toutes classes confondues ( $R^2 \sim [0,5 - 0,72]$ ). Bien qu'exhibant une certaine sensibilité à la densité du peuplement et à la densité de la régénération, le NDVI montre par contre une faible corrélation avec ces dernières. La surface terrière et la richesse spécifique, quant à elles, ne montrent aucune corrélation significative avec les indices sélectionnés.

Au regard de ces résultats, il apparaît que seules la densité des individus toutes classes confondues (DTC) et la densité de la régénération (DER) sont fortement corrélées aux indices SAVI, IB, et DVI pour justifier l'élaboration d'un modèle de prédiction des variables descriptives des formations ligneuses à partir des indices découlant des réflectances obtenues par télédétection. Toutefois, ces indices étant auto-corrélés entre eux, on ne saurait les inclure dans une régression multiple traduisant les relations mathématiques entre variables de télédétection et variables dendrométriques. Ainsi, pour l'ensemble des sites, la couverture totale de la végétation en début de saison sèche peut être estimée par les relations suivantes :

Prédiction de la densité des arbres et arbustes, toutes classes confondues, en fonction des indices fournis par télédétection :

- ▶ Equation 1:  $DTC = -689.3 + 12808 IB$  ( $R^2$  ajusté = 0.5019,  $F = 77,5$ ;  $p < 0.0001$ ,  $AIC = 1262.834$ )
- ▶ Equation 2:  $DTC = 416.6 + 15038.5 DVI$  ( $R^2$  ajusté = 0.464,  $F = 66,8$ ;  $p < 0.0001$ ,  $AIC = 1268.471$ )
- ▶ Equation 3:  $DTC = -46.73 + 11742.07 SAVI$  ( $R^2$  ajusté = 0.2265,  $F = 23,25$ ;  $p < 0.0001$ ,  $AIC = 1296.718$ )

Pour la prédiction de la densité de régénération, on obtient les expressions suivantes :

- ▶ Equation 4:  $DER = -1888.0 + 14074.4 IB$  ( $R^2$  ajusté = 0.8624,  $F = 477,5$ ;  $p < 0.0001$ ;  $AIC = 1137.418$ )
- ▶ Equation 5:  $DER = -694.37 + 16853.06 DVI$  ( $R^2$  ajusté = 0.8306,  $F = 373,7$ ;  $p < 0.0001$ ;  $AIC = 1153.439$ )
- ▶ Equation 6:  $DER = -1423.1 + 14842.4 SAVI$  ( $R^2$  ajusté = 0.5261,  $F = 85,37$ ;  $p < 0.0001$ ;  $AIC = 1232.660$ )

Les résultats montrent qu'à chaque niveau, les régressions sont toutes très significatives et fournissent des droites d'équations presque similaires. Mais lorsqu'on considère le  $R^2$  ajusté et le critère d'AIC, seuls les modèles prenant en compte l'indice de brillance (IB) sont plus performants (Equation 1 et Equation 4). Cependant, il importe de signaler que ce modèle n'explique que 50% des variations de la densité des arbres et arbustes toutes classes confondues (DTC) contre 86,24% de la variation de la densité de régénération (DER) sur le terrain.

## 5.5. DISCUSSIONS

La classification de l'occupation du sol résultant de l'analyse des images SPOT a donné une précision globale supérieure à 80 %. Mais, si les résultats sont acceptables, ils ne doivent pas nous faire perdre de vue les contraintes rencontrées. En effet, l'analyse de certaines parties de l'image a été rendue difficile par la présence de nuages ; l'image SPOT du 10/10/1986 utilisée était la seule disponible qui présentait une couverture nuageuse acceptable pour secteur d'étude. Toutefois, en nous référant aux valeurs de l'indice de Kappa ( $Kappa > 0,5$ ), on peut, d'après Pontius (2000), conclure que les résultats de cette analyse sont statistiquement acceptables. Une analyse *in fine* des erreurs enregistrées au niveau des différentes classes a

révéle que les erreurs d'omission sont beaucoup plus faibles au niveau de chaque classe et pour l'ensemble de toutes les classes que les erreurs de commission. Les classes difficiles à discriminer visuellement sont celles dont les signatures spectrales sont similaires, c'est d'ailleurs ce qui expliquerait le fait que les agglomérations pourraient se confondre aux nuages. Mais les valeurs des erreurs de commission enregistrées sont acceptables dans la mesure où aucune de ces erreurs n'est au-dessus de 70 %, souvent considéré comme valeur limite (Pontius, 2000).

La dynamique de l'occupation du sol montre que les formations végétales denses, par opposition aux formations claires, régressent de façon importante. Les taux annuels de régression constatés au niveau de la forêt dense sèche et galerie forestière (-1,8%) et de la forêt claire (-1,5%) sont des plus élevés dans la zone d'étude. Pour une étude couvrant l'ensemble des formations forestières du Bénin, ce taux a été évalué à -1,2 % pour la période de 1990 à 1995 (FAO, 1997). Les valeurs obtenues dans le secteur d'étude montrent une diminution plus rapide des zones boisées comparativement à la moyenne nationale. Le rapprochement des variables démographiques et économiques met en évidence un déséquilibre entre les besoins des populations et les ressources disponibles (Onibon, 1999). Il en résulte un amenuisement de la capacité productive des terres d'année en année et une augmentation de la précarité et de la pauvreté des populations rurales. L'extension des terres agricoles en réponse à leur baisse de rendement touche désormais les zones classées et protégées. Dès lors, les zones qui renferment généralement l'essentiel du potentiel agro-sylvo-pastoral se trouvent ainsi soumises à une pression humaine et animale se traduisant par l'extension des terres de cultures de surpâturage, de transhumance et de défrichement (MEHU, 2002). Un autre facteur d'aggravation de la destruction des ressources forestières réside dans le système de production basé sur le brûlis. Le feu est souvent employé sans contrôle nécessaire et réduit en cendres d'importantes surfaces en fonction du combustible, de l'humidité de la végétation, du vent et des températures. Si les feux représentent une cause de destruction des milieux forestiers, la majorité des scientifiques admettent qu'ils ne détruisent pas les savanes, mais qu'ils sont au contraire le principal facteur de leur maintien. Cette idée correspond à la notion d'« incorporation » d'une perturbation récurrente (Allen & Starr, 1982; Fournier, 2001). En outre, un certain contrôle rendra possible leur régulation et leur stabilisation. La suppression totale des feux ou la pratique des feux précoces ferait ainsi évoluer les savanes vers des milieux plus fermés et modifierait la physionomie et la composition de la végétation ainsi que l'équilibre de l'écosystème dans son ensemble. L'augmentation notée au niveau des savanes arbustives (+140 ha/an) illustre bien cette affirmation. Par ailleurs, dans la sous-région, quelques études relatives aux effets des feux sur la végétation de savane ont été effectuées à une échelle locale, mais elles ne concernent pas l'ensemble des milieux et les résultats sont souvent difficiles à transposer à d'autres sites (Pomel *et al.*, 1994). Il reste cependant difficile de faire le lien entre ces informations quantitatives extraites des données satellitaires et les effets sur la végétation, particulièrement dans le cas des savanes soudaniennes.

La plupart des travaux sur l'estimation par télédétection de la production végétale portent sur la production agricole des principales cultures en zone tempérée à l'échelle locale, ou à l'opposé, sur des estimations de production primaire à l'échelle globale. Dans les deux cas, les couverts végétaux sont généralement considérés comme homogènes. L'existence de telles corrélations avait d'abord été rapportée à l'échelle régionale par Tucker *et al.*, (1985) et Goward & Dye (1987) pour différents biomes, puis confirmée dans le cas des prairies semi-arides par les travaux de Diallo *et al.*, (1991), Wylie *et al.*, (1991), Prince (1991), Mougnot *et al.*, (2000) à l'échelle régionale, et De Wispelaere *et al.*, (1987) à l'échelle locale.

L'expérience menée dans la présente étude semble démontrer que les données satellitaires peuvent fournir une information quantitative sur la biomasse ligneuse. Ce travail a mis en

évidence des relations très étroites entre indice de végétation et variables d'intérêt descriptives des formations ligneuses. Une forte corrélation a été observée entre l'indice de brillance et la densité des ligneux toutes strates confondues. Toutefois, les résultats acquis demandent néanmoins confirmation et analyses complémentaires. En effet, des études plus récentes ont montré que les relations linéaires obtenues empiriquement dépendaient de la saison de croissance et de la région considérée, limitant ainsi l'opérationnalité de la méthode à moins de disposer d'un réseau d'échantillonnage au sol très dense dans le temps et dans l'espace (Guérif *et al.*, 2001). La date d'acquisition des données satellitaires et le capteur utilisé (Mougenot *et al.*, 2000) sont également d'importants facteurs de variation de ces relations empiriques. Par ailleurs, en zone tropicale sèche, l'hypothèse de recouvrement total du sol par la végétation n'est généralement pas confirmée (Defourny, 1989) et les conditions environnementales de croissance constituent souvent un facteur limitant. Il serait intéressant d'envisager à l'avenir, une estimation strate par strate afin de tester la sensibilité des modèles empiriques en fonction de la couverture végétale. Il faudrait notamment approfondir l'influence de l'humidité du sol sur les indices et la manière de réduire ces erreurs au niveau des zones humides (par exemple : forêt galerie, forêt marécageuse, forêt riveraine...).

Avant toute extrapolation de la méthode, il est nécessaire voire indispensable de vérifier la stabilité des relations tant au niveau spatial qu'au niveau temporel. Il serait également intéressant d'identifier l'influence de la résolution spatiale des capteurs au niveau des résultats d'une telle expérience. Finalement, il serait envisageable de poursuivre des travaux dans le domaine de la télédétection en étudiant par exemple le potentiel des capteurs radar aéroportés présentant des configurations originales. Une approche prospective devrait être mise en œuvre, laquelle serait supportée par l'interprétation de modèles d'estimation des variables d'intérêt descriptives des couverts forestiers, pour expérimenter la spatialisation de la productivité ligneuse des biomes.

## 5.6. CONCLUSION

Comment évoluent les ressources ligneuses en zone soudanienne dans un contexte de pression démographique et sous la menace d'une péjoration climatique ? Quels sont les éléments constitutifs du paysage naturel qui subissent des changements ? Quelles en sont les causes ? A quelle vitesse les modifications observées s'opèrent-elles ? Quelles sont les perspectives en termes de durabilité pour la gestion des ressources naturelles de la zone ? En apportant une réponse quantitative et localisée à ces questions d'aménagement récurrentes, cette étude a contribué à la compréhension des représentations des dynamiques territoriales dans le Nord du Bénin. Ces dynamiques révèlent que les pressions humaines actuelles sur les ressources forestières sont sans commune mesure en rupture avec les capacités d'auto-régénérescence de ces formations végétales naturelles qui sont sérieusement menacées. En outre, on note une extension rapide des zones à emprises agricoles au détriment des formations boisées denses. Ce mouvement global centrifuge partant des noyaux d'agglomérations et hameaux ruraux, associé à une intensification des activités humaines, questionne la durabilité des processus écologiques, économiques et sociaux dans une zone écogéographique fortement dépendante des conditions climatiques. Il semble donc urgent de développer une stratégie de gestion intégrée et participative aussi bien à l'échelle locale que régionale pour préserver ses ressources et en garantir la résilience. Les principes de cette gestion reposent sur l'élaboration concertée, entre décideurs locaux et populations, de plans d'aménagement prenant en compte la densification urbaine, la définition claire des espaces agricoles, la protection des zones naturelles ainsi que des flux et processus dont ces zones dépendent. Si le Programme National de Lutte Contre la Désertification intègre théoriquement ces lignes stratégiques, son application à l'échelle locale reste néanmoins soumise à de nombreuses incertitudes. La



présente contribution vise à proposer une démarche à caractère pragmatique qui cherche à utiliser quelques-unes des possibilités offertes par la télédétection, les données de terrain et les outils de cartographie numérique, pour apporter une contribution à la compréhension de la dynamique paysagère. De part sa relative simplicité de mise en œuvre, l'adoption de la démarche méthodologique suggérée permettra d'alimenter une base de données nationale concernant l'identification des zones d'actions prioritaires pour la lutte contre la dégradation des terres et la désertification. Ces résultats pourraient d'ailleurs enrichir les réflexions d'une société en pleine mutation socio-économique, qui s'interroge sur la durabilité des choix d'utilisation de l'espace, dans un contexte de changements climatiques et de mondialisation des échanges.

## ANNEXE 5.1 : Etalonnage et extraction des valeurs radiométriques sur les sites tests (Forêt classée de Ouénou Bénou)

La réflectance mesurée par le satellite nécessite des corrections car elle est influencée par des phénomènes atmosphériques (diffusion, réflexion, absorption). En outre, la gamme électromagnétique mesurée sur les images SPOT 4 se compose de quatre canaux distincts (trois pour SPOT 1) : le Vert (G), le Rouge (R) informant sur la structure interne des feuilles et sur la biomasse) le Proche Infra-Rouge (PIR) et Moyen Infra-Rouge (MIR) qui est sensible à la structure foliaire et au contenu en eau de la végétation (Boyd *et al.*, 1996; Ceccato *et al.*, 2001). C'est dans les longueurs d'onde des trois derniers canaux que les végétaux réfléchissent le plus de rayonnement électromagnétique. Ils ont en outre l'avantage d'être peu affectés par l'absorption et la diffusion de l'atmosphère causées par la vapeur d'eau, les particules solides en suspension et certains gaz (méthane et ozone principalement). La couverture nuageuse étant nulle pour la scène SPOT 4 du 15/11/2005, aucune correction atmosphérique ne lui a donc été appliquée. Les impulsions électriques enregistrées à bord du satellite sont transcrites en comptes numériques codés sur 8 bits. Des informations liées aux paramètres de localisation du satellite sont attachées aux comptes numériques. Une chaîne de traitement permet alors de transformer les comptes numériques en luminance (énergie réfléchie par la surface exprimée en Watt/m<sup>2</sup>/sr/μm) puis en réflectance (pourcentage d'énergie réfléchie en fonction de l'énergie reçue du soleil). La procédure de passage en luminance (équation 1) puis en réflectance (équation 2) a été réalisée par nos soins avec les informations du CNES (Meygret, 2004).

(1)  $L = (CN / A) + B$  : où, **L** représente la luminance exprimée en W/m<sup>2</sup>/sr/μm, **CN** : le compte numérique, **A** : le gain de la calibration absolue et **B** : l'offset de calibration.

(2)  $f_{toa} = (p * L * D2) / (E * \cos(\theta_s))$ : où **f<sub>toa</sub>** représente la réflectance extra-atmosphérique, **L** la luminance précédemment calculée, **D2** la distance Terre-Soleil en fonction du jour julien de l'acquisition satellite, **E** l'éclairement solaire (en W/m<sup>2</sup>/sr/μm) et **θ<sub>s</sub>** l'angle zénithal solaire.

ANNEXE 5.2 : Définitions de base relatives à l'évaluation des ressources forestières en 2000 (FAO, 2001): <http://www.fao.org/docrep/meeting/003/X9835f/X9835f01.htm> (consulté le 20/12/2007)

*Déboisement* : Le déboisement est la conversion de la forêt à une autre utilisation du sol ou la réduction à long terme du couvert forestier en dessous du seuil de 10%.

Note explicative: Le déboisement comporte la perte à long terme ou permanente de couvert forestier. Cette perte ne peut être causée et maintenue que par une perturbation humaine ou naturelle continue. Le déboisement comprend, par exemple, les zones où la forêt a été convertie à l'agriculture (y compris l'agro-foresterie), au pâturage, aux réservoirs d'eau et aux zones urbaines. Le terme exclut spécifiquement les zones dont les arbres ont été abattus à des fins, par exemple, de récolte ou d'exploitation, et où il est prévu que la forêt se régénère naturellement ou à l'aide de mesures sylvicoles dans le long terme. Si le restant de la forêt exploitée n'est pas défriché pour de nouvelles utilisations du sol, et que les clairières ne persistent pas du fait de perturbations continues, les forêts se régénèrent normalement, bien que souvent, elles acquièrent une condition différente et secondaire. Dans les zones sujettes à l'agriculture itinérante, les forêts, les jachères forestières et les terres agricoles assument un aspect dynamique où le déboisement et le retour de la forêt ont lieu souvent en petites poches. Pour simplifier les rapports sur ces zones, on applique le changement net sur une zone plus étendue. Le déboisement inclut aussi les zones où la surexploitation ou l'évolution des conditions environnementales influencent la forêt dans une mesure telle qu'elle ne peut (actuellement) soutenir un couvert forestier supérieur au seuil de 10%, et ce notamment pour les zones brûlées où les conditions défavorables du sol ou les feux périodiques sur le long terme interdisent le retour des formations forestières, ou les zones qui, après une coupe rase, ne peuvent se régénérer en raison des gelées, de la présence d'une végétation concurrentielle ou d'autres conditions naturelles. Le concept de "long terme" est vital dans cette définition et représente une période de 10 ans. Les conditions météorologiques locales, le contexte de l'utilisation du sol ou l'objectif de l'analyse pourraient, toutefois, justifier le prolongement du cadre temporel.

*Boisement* : Le boisement est la conversion à la forêt de terres utilisées à d'autres fins, ou l'accroissement du couvert forestier pour atteindre une densité supérieure au seuil de 10%.

Note explicative: Le boisement est l'inverse du déboisement et comprend les zones qui sont converties activement à la forêt à partir d'autres utilisations du sol par des mesures sylvicoles. Le boisement comprend aussi les transitions naturelles à la forêt de terres agricoles abandonnées, par exemple, ou de zones brûlées qui n'ont pas été classées comme forêts pendant la période où elles étaient dénudées. Comme pour le déboisement, la conversion devrait être à long terme, c'est-à-dire que les zones où la transition à la forêt devrait durer moins de dix ans, en raison par exemple d'incendies périodiques, ne devraient pas être classées comme zones de boisement. Le concept "long terme" est crucial dans cette définition et représente dix ans. Les conditions climatiques locales, le contexte de l'utilisation des sols et l'objectif de l'analyse pourraient toutefois justifier le prolongement du cadre temporel.

*Reboisement* : Le reboisement est le rétablissement des formations forestières après une situation temporaire où le couvert forestier était inférieur à 10% du fait de perturbations d'origine humaine ou naturelle.

Note explicative: La définition de forêt indique clairement que les forêts en cours de régénération sont considérées comme telles même si le couvert est temporairement inférieur à 10%. De nombreux régimes d'aménagement des forêts comportent la coupe rase suivie de la

régénération, et plusieurs processus naturels, notamment les feux et le chablis, peuvent conduire à une situation temporaire où le couvert forestier est inférieur à 10%. Dans ces cas, la zone est encore considérée comme forêt, à condition que le rétablissement (c'est-à-dire le reboisement) du couvert jusqu'à plus de 10% pour cent ait lieu dans un avenir relativement proche. Comme pour le déboisement, le cadre temporel a une importance vitale. Le concept de "temporaire" revêt une importance cruciale dans cette définition et se rapporte à une période inférieure à dix ans. Les conditions climatiques locales et le contexte de l'utilisation des sols, ou l'objectif de l'analyse, pourraient toutefois justifier le prolongement du cadre temporel.

*Dégradation forestière* : La dégradation forestière est une réduction du couvert forestier ou du matériel sur pied dans une forêt.

Note explicative: Pour que les définitions concernant les forêts et les changements du couvert forestier forment un ensemble harmonisé qui soit mesurable suivant les techniques conventionnelles, on peut établir que la dégradation forestière se traduit par une réduction du couvert et/ou du matériel sur pied d'une forêt du fait de l'exploitation, du feu, du chablis ou d'autres circonstances, à condition que le couvert reste au-dessus de 10% (cf. définition des forêts). D'une manière plus générale, la dégradation forestière est la réduction à long terme des disponibilités potentielles totales des avantages procurés par la forêt, y compris le bois, la biodiversité et tout autre produit ou service.

*Amélioration forestière* : L'amélioration forestière est l'accroissement du couvert forestier ou du matériel sur pied dans une forêt.

Note explicative: Pour que les définitions concernant les forêts et les changements du couvert forestier forment un ensemble harmonisé qui soit mesurable suivant des techniques conventionnelles, on peut établir que l'amélioration forestière se traduit par un accroissement du couvert et/ou du matériel sur pied de la forêt grâce à la croissance. D'une manière plus générale (cf. dégradation forestière), l'amélioration forestière est l'accroissement à long terme des disponibilités potentielles totales des avantages procurés par les forêts, y compris le bois, la biodiversité et tout autre produit ou service.

ANNEXE 5.3a : Matrice de confusion pour l'évaluation de la précision de la classification de l'image SPOT-1 du 10/10/86 (Secteur sud-Bembereke / nord-Ndali)

Points de contrôle (%)							
Classes	vali_agglo	vali_fcl	vali_fgfd	vali_mcjp	vali_sai	vali_sarb	vali_snd
AGGLO	<b>97,82</b>	1,52	0,09	0,53	2,13	0	2,03
FCL	0,05	<b>39,05</b>	9,53	0	3,48	28,71	2,46
FDG	0,05	4,1	<b>87,48</b>	0,07	0	1,31	0,12
MCJP	0,66	0,05	1,63	<b>99,28</b>	0	0	4,79
SAI	0,3	23,74	0	0	<b>76,09</b>	8,7	0,43
SARB	0	27,52	1	0	2,48	<b>60,46</b>	0
SNAR	1,11	4,01	0,27	0,13	15,82	0,82	<b>90,17</b>
Total	100	100	100	100	100	100	100

**Précision globale= 80,22% ; Indice de Kappa = 0,7568**

Légende : FDG (Forêts denses - Forêts galeries) ; FCL (Forêts claires) ; SARB (Savanes boisées et savanes arborées) ; SAI (Savanes arbustives) ; MCJP (Mosaïques champs-jachères –Plantations) ; ZBR (Zones brûlées) ; AGGLO (Agglomérations, hameaux, routes et voies d'accès) ; SNAR (Sols nus, dalles et affleurements rocheux).

ANNEXE 5.3b : Erreur de confusion et d'omission dans la classification d'occupation du sol en 1986

Classes	Erreurs de commission (%)	Erreurs d'omission (%)	Précision du Producteur (%)	Précision de l'utilisateur (%)
FDG	2,18	12,52	87,48	97,82
FCL	53,69	60,95	39,05	<b>46,31</b>
SARB	48,53	39,54	60,46	<b>51,47</b>
SAI	32,97	23,91	76,09	<b>67,03</b>
MCJP	10,83	0,72	99,28	89,17
AGGLO	5,62	2,18	97,82	94,38
SND	21,59	9,83	90,17	78,41

Légende : FDG (Forêts denses - Forêts galeries) ; FCL (Forêts claires) ; SARB (Savanes boisées et savanes arborées) ; SAI (Savanes arbustives) ; MCJP (Mosaïques champs-jachères –Plantations) ; ZBR (Zones brûlées) ; AGGLO (Agglomérations, hameaux, routes et voies d'accès) ; SNAR (Sols nus, dalles et affleurements rocheux).

ANNEXE 5.4 a : Matrice de confusion pour l'évaluation de la précision de la classification de l'image SPOT-1 du 15/11/2005 (Secteur sud-Bembereke / nord-Ndali)

Points de contrôle (%)								
Classes	vali_mcjp	vali_fgfd	vali_agglo	vali_zbr	vali_snd	vali_sai	vali_sarb	vali_fcl
MCJ	<b>56,85</b>	0,5	17,89	0	0,95	4,05	5,28	0,53
FDG	0,33	<b>87,73</b>	0	0,15	0	0	1,06	2,67
AGGLO	6,64	0	<b>81,11</b>	0	0,05	0,2	0	0,04
BRULE	0	0	0	<b>95,93</b>	0,24	0	0	0,15
SNAR	0,57	0	0,17	3,71	<b>95,79</b>	0,2	0,05	0,04
SAI	24,54	0,08	0,44	0	1,51	<b>89,47</b>	5,61	1,37
SARBO	8,2	3,78	0,26	0	0,24	3,51	<b>80,37</b>	3,17
FC	2,87	7,9	0,13	0,21	1,23	2,57	7,63	<b>92,02</b>
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

**Précision globale = 84,98% ; Indice de Kappa = 0,8281**

Légende: FDG (Forêts denses - Forêts galeries) ; FCL (Forêts claires) ; SARB (Savanes boisées et savanes arborées) ; SAI (Savanes arbustives) ; MCJP (Mosaïques champs-jachères –Plantations) ; ZBR (Zones brûlées) ; AGGLO (Agglomérations, hameaux, routes et voies d'accès) ; SNAR (Sols nus, dalles et affleurements rocheux).

ANNEXE 5.4 b : Erreur de confusion et d'omission dans la classification d'occupation du sol en 2005

Classes	Erreurs de commission (%)	Erreurs d'omission (%)	Précision du producteur (%)	Précision de l'utilisateur (%)
FDG	4,66	12,27	87,73	95,34
FCL	16,98	7,98	92,02	83,02
SARB	20,39	19,63	80,37	<b>79,61</b>
SAI	28,4	10,53	89,47	<b>71,6</b>
MCJP	34,93	43,15	56,85	<b>65,07</b>
AGGLO	7,33	18,89	81,11	92,67
SNAR	4,44	4,21	95,79	95,56
ZBR	0,48	4,07	95,93	99,52

Légende: FDG (Forêts denses - Forêts galeries) ; FCL (Forêts claires) ; SARB (Savanes boisées et savanes arborées) ; SAI (Savanes arbustives) ; MCJP (Mosaïques champs-jachères –Plantations) ; ZBR (Zones brûlées) ; AGGLO (Agglomérations, hameaux, routes et voies d'accès) ; SNAR (Sols nus, dalles et affleurements rocheux).

ANNEXE 5.5: Matrice de changement des classes d'occupation du sol dans le secteur d'étude (1986-2005). Les proportions de chaque classe sont exprimées en pourcentage (%) du total des classes considérées.

CLASSES	Proportion par classe (%)						
	FDG	FCL	SARB	SAI	MCJP	AGGLO	SNAR
FDG	<b>45,6</b>	14,4	11,2	4,3	6,7	2,9	8,3
FCL	24,1	<b>22,5</b>	24,2	16,4	13,8	10,3	20,3
SARB	7,2	14,2	<b>13,6</b>	13,4	5,9	6,6	11,0
SAI	5,9	16,6	18,0	<b>25,3</b>	20,9	19,7	19,5
MCJP	4,4	11,7	14,2	17,0	<b>22,4</b>	26,4	15,3
ZBR	5,2	5,7	5,0	3,9	4,0	2,7	5,1
AGGLO	1,4	4,5	6,7	7,0	9,9	<b>16,2</b>	6,6
SNAR	6,3	10,4	7,2	12,6	16,4	15,1	<b>14,0</b>
<i>Total</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
% des classes ayant Changés	54,4	77,5	86,4	74,7	77,6	83,8	86,0
% Evolution de la classe	<b>-55,8</b>	<b>-29,5</b>	<b>-5,1</b>	<b>+32,5</b>	<b>+211,2</b>	<b>+7,9</b>	<b>-14,2</b>

Légende : FDG (Forêts denses - Forêts galeries) ; FCL (Forêts claires) ; SARB (Savanes boisées et savanes arborées) ; SAI (Savanes arbustives) ; MCJP (Mosaïques champs-jachères –Plantations) ; ZBR (Zones brûlées) ; AGGLO (Agglomérations, hameaux, routes et voies d'accès) ; SNAR (Sols nus, dalles et affleurements rocheux).

## **4<sup>e</sup> Partie**

### **DISCUSSIONS GENERALES— CONCLUSIONS - PRESPECTIVES**



## CHAPITRE 6

### DISCUSSIONS - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

#### 6.1. DISCUSSIONS GENERALES

##### 6.1.1. De la dégradation environnementale à la désertification

Pour certains auteurs, la désertification correspond à un état du milieu marqué par la manifestation de conditions ultimes de la dégradation des terres (Rapp, 1974; Ahmad & Kassas, 1987; Mainguet, 1991). A l'inverse, d'autres auteurs (Rozaanov, 1982; Dregne & Chou, 1992) considèrent la désertification comme le processus de dégradation de la végétation et des sols entraînant la perte de la productivité réversible ou non. Ces deux points de vue sont importants dans l'évaluation de l'étendue du problème. En effet, les zones affectées par des conditions désertiques ne représentent qu'une faible part des zones sèches, par contre de vastes étendues sont affectées par la dégradation des ressources naturelles. Aussi, cette différence de vision a des répercussions sur les stratégies de lutte, portant ainsi les priorités sur la restauration des zones dégradées ou sur la lutte contre les facteurs causaux et les mesures préventives. Toujours est-il que ces définitions ne quantifient pas le degré de dégradation des terres qui caractérisent la désertification. Pour suppléer à cette lacune, Katyal & Vlek (2000) proposent de considérer comme affectées par la désertification les terres dont la perte de productivité est supérieure à 15%, mais sans toutefois en définir les méthodes de mesure. En général, la dégradation débute par une altération de la végétation, une modification de la composition floristique, conduisant à la raréfaction voire la disparition des espèces les plus utilisées ou les plus appréciées. Parallèlement à ce processus, le couvert s'éclaircit, la production de biomasse diminue et les capacités de reproduction et de régénération de la végétation se réduisent de plus en plus. La spirale de dégradation ainsi constituée sans intervention, conduira à une désertification irréversible (Le Houérou, 1968; Rozaanov, 1982; Mainguet, 1991; Le Houérou, 1995; Le Floch, 1996). L'irréversibilité d'après Floret & Pontanier (1982) est entendue comme une évolution de la végétation et des sols telle qu'elle ne permet pas de retour vers un état primitif malgré des conditions de protection totale (ou quasi-totale) de l'environnement pendant la durée d'une génération, c'est-à-dire 25 ans. Pour Warren & Agnew (1988), la dégradation des terres englobe la désertification qui en est la forme extrême. Dès lors, il apparaît que la désertification limitée aux zones arides est considérée comme le stade ultime de dégradation des écosystèmes naturels et exploités. Selon Le Floch (1996), le « seuil d'irréversibilité » permet de différencier ces deux notions. L'auteur suggère que la dégradation liée à la perte de productivité totale et de résilience n'est pas un phénomène soudain, au contraire, elle apparaît au terme d'un processus insidieux de la dégradation des terres qui conduit à une désertification irréversible. Si, sur le plan scientifique, il est judicieux de déterminer les seuils d'évolution et d'irréversibilité au sein de ce processus, sur le plan opérationnel, la dégradation des terres est incontestablement plus courante et constitue une menace beaucoup plus grave pour le maintien de leur utilisation et de leur fonction écologique. De nos jours, bon nombre d'études scientifiques semblent retenir la thèse suivant laquelle, la désertification en Afrique de l'Ouest semble résulter à la fois de l'influence climatique et de l'action anthropique. Tout d'abord, alors que les éléments dont on dispose indiquent que la sécheresse joue un rôle dans l'écologie des zones sahélienne et soudanienne, les courtes et moyennes périodes d'aridité de par le passé ont eu peu d'effet permanent sur l'environnement. Par contre, les tendances à un

sérieux assèchement durant un siècle ou davantage ont modifié sans aucun doute le couvert végétal naturel. Cependant, depuis le début du siècle dernier, où des sécheresses d'une durée de deux décennies ou moins ont prédominé, la destruction des ressources a été en grande partie le fait des hommes, dont le nombre a augmenté beaucoup plus rapidement qu'auparavant. Deuxièmement, à la différence du climat qui est une donnée de fait, le comportement humain peut être modifié pour faire face à une évolution de l'environnement. Le processus de désertification est lent et insidieux, et les gouvernements ainsi que les communautés rurales ont par conséquent été lents à réagir malgré l'accroissement rapide de la population. A partir du moment où il existe des techniques inexploitées, il serait mal avisé de les ignorer en supposant, sur la base d'informations contestables, que la principale cause de la désertification est le climat. Le problème de la désertification n'en est pas moins grave dans la mesure où il crée une situation dans laquelle l'utilisation collective à long terme des ressources et leur mauvaise utilisation à court terme par les particuliers sont en conflit. Il est néanmoins évident que les gens sont de plus en plus nombreux à quitter les zones à peuplement dense pour des endroits plus accueillants des zones écoclimatiques soudanienne et guinéenne. Somme toute, il est aisé de constater que la désertification et la dégradation des sols résultent de mécanismes et processus complexes et interactifs, pilotés par un ensemble de facteurs agissant à différentes échelles spatiales et temporelles. Leur suivi exige d'une part la description des conditions biophysiques et socio-économiques des milieux subissant ces phénomènes et, d'autre part, la compréhension des mécanismes et processus résultant de ces conditions. Ce suivi repose tout d'abord sur l'acquisition de paramètres de base permettant de décrire les états du milieu et leur dynamique aux échelles spatio-temporelles pertinentes, puis sur l'analyse des interactions entre facteurs induisant des processus contribuant à la désertification. Sans développer tous ces aspects qui donnent lieu à de nombreuses investigations très spécifiques, nous avons abordé à travers cette première partie, les aspects axés sur : les indicateurs de suivi de la dégradation, les facteurs déterminant le processus de dégradation des milieux, et la contribution des outils spatiaux à l'identification des zones en proie au phénomène de désertification.

### **6.1.2. Déterminisme de l'évolution des écosystèmes en Afrique tropicale sèche**

Depuis le début des années soixante-dix, il existe un grand débat sur les causes de la dessiccation du Sahel. Les premières théories développées par Charney ont mis en cause la dégradation et la désertification provoquées par le surpâturage, ainsi que l'utilisation inappropriée des terres (Charney *et al.*, 1975 ; Charney *et al.*, 1977). Près de deux décennies plus tard, cette idée selon laquelle la sécheresse et la désertification à grande échelle dans le Sahel ont été causées par l'abus systématique de la terre par les pasteurs a été rejetée par la bien d'autres travaux (Mace, 1995; Fairhead & Leach, 1996a ; Fairhead & Leach, 1996b). Toujours est-il que, si l'érosion du sol et la surexploitation des ressources sont incontestablement des problèmes dans certaines régions, il n'existe pas de preuves de dégradation des terres causée par des facteurs anthropogènes ayant conduit à la sécheresse dans la région sahélienne et les zones adjacentes. Il est maintenant établi que, plutôt qu'une conséquence de l'abus dans l'utilisation des terres par les humains et les animaux, la dessiccation ouest-africaine au cours du 20<sup>e</sup> siècle est plutôt le résultat d'une variation climatique de longue durée impulsée par des changements dans la configuration de la température de surface au niveau mondial. En outre, il a été démontré que la dégradation du couvert végétal au Sahel, et les changements dans l'albédo, l'évapotranspiration et la rugosité de la surface, ont contribué à la sécheresse qui s'est produite dans les zones semi-arides et subhumides en Afrique de l'Ouest dans les années 1970 et 1980 (Xue & Shukla, 1993). Les conditions de sécheresse dans le Sahel se produisent à des périodes où les océans de

l'hémisphère sud et de l'Océan Indien sont plus chauds que les océans de l'hémisphère nord. Et c'est le passage à cette configuration de la température qui est maintenant largement accepté comme étant responsable de l'installation de l'aridité dans le Sahel à la fin des années soixante (Giannini *et al.*, 2003).

### **6.1.3. Les zones arides et semi-arides: des biomes en Equilibre ou non-équilibre?**

Des théories récentes sur la dynamique des parcours dans les régions arides et semi-arides ont soulevé des doutes sur la valeur du modèle écologique décrivant un développement de successions végétales vers un état d'équilibre stable (Westoby *et al.*, 1989; Friedel, 1991; Behnke & Scoones, 1991). Selon l'approche de l'équilibre dynamique des pâturages, la pression anthropique soutenue serait la principale cause de la dégradation de l'écosystème sahélien. Dans ce milieu, l'utilisation des ressources naturelles par l'élevage apparaît souvent comme le mode de valorisation le plus pertinent et les sociétés pastorales concernées n'ont d'ailleurs parfois aucune alternative économique fiable à cet élevage extensif, ce qui a pour conséquence de favoriser la mobilisation accrue du cheptel dans cette région (De Leeuw & Tothill, 1990). La concentration du cheptel affecte la structure et la composition de la strate herbacée, ce qui réduit la productivité des pâturages et augmente la vulnérabilité du système à la sécheresse (Breman & de Wit, 1983; Schlesinger *et al.*, 1990; Illius & O'Connor, 1999).

A l'opposé du modèle de l'équilibre, l'approche stochastique dite du « non-équilibre » met l'accent sur l'importance des perturbations externes comme moteur des changements observés au niveau des écosystèmes sahéliens (Westoby *et al.*, 1989). D'après ce modèle, les précipitations annuelles et leur variabilité sont les principaux moteurs de l'évolution des écosystèmes sahéliens, les fortes pressions exercées par pâturage n'ayant qu'un impact marginal sur la productivité de la strate herbacée et arborée. Ce modèle suggère qu'après une sécheresse, quelques années avec une bonne pluviométrie permettrait de restaurer pleinement l'état et la productivité de la couverture végétale (Ellis & Swift, 1988; Rohde & Sullivan, 2002). La compréhension de la dynamique du couvert végétal dans cette région requiert une analyse minutieuse de la manière dont la végétation a évolué au cours des dernières décennies en fonction des modes de gestion imposés par l'homme et de la variabilité du climat. Cette vision réductrice voire univoque des facteurs causaux de l'évolution des écosystèmes des zones semi-arides n'a pas toujours facilité la compréhension des mécanismes qui régissent le fonctionnement de cet environnement. Dès lors, des études récentes suggèrent que les modèles écologiques de l'équilibre et du non-équilibre sont deux approches nécessaires pour comprendre la dynamique du couvert végétal dans les zones semi-arides (Briske *et al.*, 2003; Vetter, 2005). Leur importance relative dépendrait des caractéristiques des parcours (Fernandez-Gimenez & Allen-Diaz, 1999; Walker & Wilson, 2002) et des échelles spatiales et temporelles examinées (Ryerson & Parmenter, 2001; Vetter, 2005).

Une série d'études ont examiné la dégradation du couvert végétal au Sahel en utilisant des images satellitaires (Tucker *et al.*, 1991; Nicholson *et al.*, 1998; Prince *et al.*, 1998; Anyamba & Tucker, 2005; Olsson *et al.*, 2005). Ces études ont conclu qu'il n'existe aucune preuve de la dégradation du couvert végétal du Sahel. Selon les termes de Kerr (1998), les données satellitaires ne révèlent pas de dégradation à long terme de la végétation dans le Sahel. D'autres études plus récentes ont abondé dans le même sens, concluant par surcroît à un « reverdissement » progressif des prairies sahéliennes qui ne peut pas être entièrement expliqué par l'augmentation des pluies depuis le milieu des années 1980 (Anyamba & Tucker, 2005; Olsson *et al.*, 2005). Toujours est-il qu'à ce jour, aucune explication claire du reverdissement du Sahel n'a encore été trouvée (Olsson *et al.*, 2005). Du fait que ces données spatiales semblent n'indiquer aucune incidence élevée de la pression pastorale sur la végétation du Sahel, il existe aujourd'hui une tendance à se concentrer sur le climat

conducteur de modes de gestion des terres au Sahel. Cette interprétation est conforme à l'éclairage dans les parcours dynamiques fourni par l'approche du « non-équilibre » (Mortimore & Turner, 2005). Le rôle déterminant des variations de la distribution des pluies sur la végétation et l'ampleur des fluctuations interannuelles de la composition floristique de la strate herbacée ont fait de l'écosystème sahélien un prototype du modèle « en non-équilibre » de la dynamique de la végétation (Behnke & Scoones, 1991). Pour Ellis & Galvin (1994) les états dans lesquels se trouve la végétation ne sont plus mis en rapport avec un état d'équilibre idéal (stade climacique). Ils sont plutôt considérés comme états transitoires au gré de forçages abiotiques (principalement climatiques), les variables biotiques, pâturage inclus, n'ayant qu'une influence mineure (Scoones, 1994). Toutefois, la pression de pâture est néanmoins reconnue comme une cause possible de dynamique de type non-équilibre pourvu que la charge animale soit découplée des disponibilités en ressources fourragères (Boudet, 1984; Illius & O'Connor, 1999). Les larges fluctuations temporelles des disponibilités fourragères, en quantité comme en qualité, empêchent qu'un équilibre s'établisse entre la densité du cheptel, qui de plus est mobile, et les ressources fourragères. Mais les types d'évolution observés de la végétation sahélienne, herbacée comme ligneuse, ne relèvent pas tous de changements brusques attendus des systèmes en non-équilibre (Loehle, 1989; Rietkerk *et al.*, 1996). En outre, des changements progressifs et orientés ont été observés, soit sous l'influence d'événements climatiques ou hydrologiques répétés (sécheresse ou inondation), soit sous l'influence de changement de gestion (pression de pâture, régime de feux, cycles cultures-jachères). Dès lors, ces changements brusques ou progressifs apparaissent comme deux modes extrêmes, mais compatibles, de la dynamique de la végétation, la nature des forçages déterminant le mode de changement (Wiens, 1984 ; Briske *et al.*, 2003; Hiernaux, 2004).

On retiendra que la dynamique des écosystèmes et parcours semi-arides de l'Afrique de l'Ouest ne relève pas exclusivement du modèle de non-équilibre. Ce hiatus conceptuel a conduit à la proposition d'un modèle d'état-et-transition (« *state-and-transition* ») qui décrit l'évolution de la végétation au travers d'une série d'états alternatifs et d'une série de transitions entre les états. Ainsi, ce modèle suggère que la végétation peut amorcer une transition après avoir subi des influences naturelles ou anthropiques. Une fois tombé en-dessous d'un certain seuil de dégradation caractérisé par une productivité inférieure, il devient très difficile de ramener le sol à son état de productivité antérieur. Aussi, dans la zone soudanienne, la sécheresse affecte plusieurs espèces ligneuses. Dans cette zone également, l'impact des activités humaines prend une importance toujours plus grande, par rapport aux influences naturelles.

#### **6.1.4. L'efficacité d'utilisation des précipitations comme indicateur de désertification**

L'indice d'efficacité d'utilisation des précipitations par le couvert végétal (Rain Use Efficiency : RUE) a été défini par Le Houérou (1984) comme le quotient de la production primaire (en kilogrammes de matière sèche par hectare et par an) par la pluviosité annuelle en millimètres. Ce paramètre synthétique, relativement indépendant des régimes pluviométriques et de la diversité végétale, traduit l'état dynamique de la végétation des zones arides et celui de la surface du sol. Les deux composantes étant liées, ce paramètre est fortement influencé par les impacts anthropozoïques. Toutes choses égales par ailleurs, il peut être considéré comme un indicateur de désertification (Le Houérou, 1984). Les données expérimentales concernant le RUE étant peu nombreuses et ponctuelles, il apparaît donc intéressant de tenter de cartographier ce paramètre en utilisant des valeurs spatialisées de production végétale, obtenues par télédétection. En effet, dans les régions arides

subsahariennes, l'indice de végétation NDVI cumulé a pu être relié linéairement à la production primaire (Prince, 1991; Prince & Goward, 1996). Ainsi Nicholson *et al.* (1998) et Prince *et al.* (1998) ont utilisé cette approche d'évaluation du RUE en région sahélienne pour les années 1982 à 1990 et ils avaient conclu qu'il n'y a pas eu de baisse du RUE durant cette période. Ils notèrent même une légère augmentation moyenne, qu'ils ont attribué à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau, qui serait une conséquence des changements climatiques à l'échelle du globe. Dans cette partie de notre étude, nous avons repris une approche similaire sur près de 400 localités des zones sahélienne et sahélo-soudanienne pour une période de 19 ans (1982-1999).

Contrairement à ce qui a été observé à partir de mesures *in situ* (Le Houérou, 1988; Le Houérou, 1992), nous ne constatons pas une variabilité plus grande de la productivité végétale par rapport à celle de la pluviosité. Ceci peut provenir de la résolution spatiale grossière utilisée, qui tend à uniformiser les réponses spectrales et ne permet pas de déceler des couverts végétaux très localisés ou linéaires. D'autre part, les couverts végétaux pérennes, dont le rôle est important pour limiter les processus de désertification, sont mal identifiés lorsqu'ils sont peu ou pas chlorophylliens. Malgré ces limites dans la détection de la production végétale, la variabilité temporelle observée pour le RUE est très significative : on retrouve ici le fait qu'une variabilité élevée est un facteur supplémentaire et aggravant de l'aridité induite par de faibles moyennes pluviométriques.

### **6.1.5. Processus de désertification: les tendances observées aux échelles locale et régionale**

Les effets de la dégradation environnementale dans les zones tropicales sont tels que l'année 2006 a été déclarée «Année internationale des déserts et de la désertification» par les Nations Unies. La désertification menace 34 % des terres de la planète ainsi que les moyens de subsistance de près du tiers de la population mondiale en 2000, soit approximativement deux milliards d'individus (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Malgré ce constat alarmant, un certain nombre d'études (Tucker *et al.*, 1991; Tucker *et al.*, 1994) ont tenté de montrer que cette « dégradation » du couvert végétal en milieu sahélien n'est pas irréversible. Ces travaux soulignent que la désertification apparente dans les zones sahélienne et soudanienne est généralement perçue comme une réponse passagère à la réduction de la pluviométrie. Abondant dans le même sens, une étude commanditée par les Nations Unies dans le cadre de l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire apaise les inquiétudes relatives à l'avancée des processus de désertification en Afrique de l'Ouest (Lepers *et al.*, 2005) : « *Existing data do not support the claim that the African Sahel is a desertification hotspot.* » (Contrairement à ce qui est généralement admis, les données existantes ne confirment pas que le Sahel est une région fortement touchée par les processus de désertification). Certes, le Sahel connaît une amélioration manifeste de la pluviosité depuis la fin des années 1980 (Ozer *et al.*, 2003). A cela s'ajoutent plusieurs études régionales à partir d'images satellitaires à basse résolution qui suggèrent un « reverdissement du Sahel » significatif sur la période 1982-1999 (Eklundh & Olsson, 2003; Hickler *et al.*, 2005). A l'opposé de cette tendance, nos travaux menés sur le Burkina Faso et sur tout le Sahel ont montré, sur la base des mêmes données satellitaires, que le rapport entre l'indice de végétation normalisé (NDVI) et la pluviométrie était constant dans 54 % des stations analysées, alors qu'une dégradation de ce ratio s'observait dans 44,7 % des cas (Hountondji *et al.*, 2006 ; Hountondji *et al.*, 2008). Quoi qu'il en soit, ces études régionales ne s'intéressent qu'aux évolutions environnementales de ces deux dernières décennies. Sur le long terme, la vérité de terrain montre une dégradation aiguë des ressources naturelles. Ainsi, la vitesse annuelle moyenne de changement des unités paysagères forestières est très importante, selon diverses études récentes dans différentes localités

(Chamard & Courel, 1999 ; Gonzalez, 2001 ; Ozer, 2004). A titre d'exemple, sur 44 sites forestiers analysés en Afrique de l'Ouest par Ariori & Ozer (2005), 15 ont disparu durant la seconde moitié du XXe siècle, et tous les autres ont enregistré une diminution de plus de 50 % de leur superficie. Il ressort clairement de cette étude que les coupes abusives de végétaux ligneux pour satisfaire les besoins en énergie des populations ainsi que la demande en bois d'œuvre et l'expansion agricole représentent les trois principales causes directes de déboisement. Ce déboisement continu a clairement réduit la richesse floristique des formations boisées du domaine soudanien et sahélien.

A l'échelle locale, des inventaires réalisés dans 14 terroirs villageois de la Mauritanie au Tchad montrent que la richesse floristique des formations forestières est restée stable dans deux terroirs et a diminué partout ailleurs, jusqu'à 57 % (Gonzalez *et al.*, 2004). Par ailleurs, sur un total de 123 espèces ligneuses répertoriées dans le Sahel, 20 ont disparu, 79 sont en déclin, 11 sont stables et 13 (dont 11 exotiques) ont progressé durant ces trente à cinquante dernières années (Wezel, 2004). Ainsi, l'observation d'un simple retour de la végétation ne permet pas d'affirmer que la désertification est en recul au Sahel, voire stabilisée. Pour preuve, la recolonisation actuelle par *Leptadenia pyrotechnica* des sols sableux totalement dénudés durant les années 1980, au plus fort de la grande sécheresse, n'est certainement pas un gage d'amélioration environnementale. Au contraire, cette installation monospécifique et grégaire de *L. pyrotechnica*, espèce typiquement saharienne, sur les sols sableux totalement dégradés ne laisse rien présager de bon, d'autant que ces zones étaient couvertes par des savanes arbustives ou arborées durant les années 1950 et 1960 (Ozer & Ozer, 2005). La présence et l'autodiffusion de *L. pyrotechnica* ne sont donc que le signe d'une dégradation accrue de l'environnement sahélien, et son extension est due au seul fait qu'elle est peu appréciée par le cheptel et qu'elle ne peut constituer une source de bois de feu pour les populations du fait de son très faible pouvoir calorifique. Les mêmes observations pourraient être faites sur l'extension de *Calotropis procera* qui tend à coloniser d'anciennes jachères et zones fortement dégradées sur des sols d'épandage limono-sableux, ou sur le développement de *Pergularia tomentosa* qui tend à envahir les zones de parcours dégradés.

Partant de ces constats qui précèdent, nous pouvons affirmer que l'environnement sahélien comme soudanien est bel et bien soumis à une pression anthropique soutenue et continue. En outre, les considérations socio-économiques et démographiques confirment nos propos, car, force est de constater que depuis 1950, la population des pays sahéliens a été multipliée par quatre; et elle devrait encore doubler d'ici à 2030 (Ozer & Ozer, *op.cit.*). Or, cette population reste fortement dépendante des ressources naturelles environnantes qui assurent sa survie. Dans les pays du Sahel, le bois énergie représente encore près de 85 % des besoins énergétiques de la population (Ozer & Ozer, *op.cit.*). Pour nourrir cette population croissante, les surfaces agricoles cultivées augmentent partout au Sahel, les périodes de jachère diminuent (disparaissent parfois) et les rendements des cultures se dégradent, forçant ainsi les agriculteurs à augmenter chaque année les emblavures agricoles. Ainsi, dans l'arrondissement de Dakoro (Niger), Mortimore et ses collègues (2001) ont mis en évidence une augmentation de près de 400 % des superficies cultivées en mil entre 1979 et 1998, alors que les rendements se sont réduits d'environ 25 %. Ailleurs, dans le sud-ouest du Burkina Faso, Gray et Morant (2003) rapportent que plus de 55 % des agriculteurs interrogés estiment que la fertilité de leurs sols a diminué au cours des dernières années, alors qu'aucun d'entre eux ne perçoit une amélioration. De ce fait, et malgré les meilleures conditions de pluviosité, il s'avère que la production céréalière totale par habitant s'est dégradée avec le temps au Sahel, ce qui rend les populations toujours plus vulnérables aux aléas de la nature (Ozer & Ozer, *op.cit.*).

Sachant que la population ouest africaine devrait, en principe, doubler d'ici à 2030, le pire reste à craindre, car le problème de la malnutrition au Sahel n'est plus une question de mauvaise conjoncture mais devient progressivement structurel. Le nombre de personnes

souffrant de sous-alimentation n'a fait qu'augmenter au cours des vingt dernières années, pour finalement affecter plus d'un sahélien sur quatre. Il s'avère difficile, vis-à-vis de ces populations, d'imaginer ce qui pourrait advenir lors d'une sécheresse similaire à celles des années 1970 ou 1980. L'avenir est plus qu'incertain puisque la majorité des modèles climatiques montre qu'il est fort probable que le Sahel subisse une réduction structurelle et importante de la pluviosité dès le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle, du fait du réchauffement climatique (Held *et al.*, 2005; Milly *et al.*, 2005). Étant donné ce qui précède, il n'est guère possible d'accepter l'assertion (précédemment citée) selon laquelle le Sahel ne serait pas une région fortement touchée par la désertification et dont le processus dépendrait principalement des fluctuations de pluviosité.

## 6.2. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 6.2.1. Approche multi-échelle pour l'étude de l'évolution du couvert végétal

Dans notre région d'étude, la diversité des zones bioclimatiques qui la caractérisent, associée à la différence de résolution spatiale des images satellitaires, autorisent une analyse multi-échelle par une approche de type hiérarchique descendante. Celle-ci consiste à décrire le comportement spectral du couvert végétal en partant du niveau régional au niveau local. Nous nous sommes intéressés à comprendre comment le couvert végétal réagit aux variations climatiques (pluviométriques) au cours des deux dernières décennies, à identifier les tendances progressives ou régressives de l'évolution du couvert ou forçage climatique et anthropique, à appréhender les processus sous-jacents, à identifier les facteurs déterminants de ces processus. Pour atteindre ces objectifs, il était nécessaire de disposer d'un set de données aux échelles spatiales et temporelles appropriées. Les résultats présentés aux chapitres 2 et 3 montrent que les images de faible résolution spatiale (NOAA AVHRR-Pathfinder) offrent une vision d'ensemble de la répartition des grands ensembles végétaux. La résolution au sol de ces images (8 km) autorise le repérage et la cartographie des zones ou localités marquées par une augmentation ou une diminution de grande ampleur, dans la productivité des sols (« *deforestation hot spot* », « *active deforestation area* ») au niveau régional ou continental. Cependant, la faible résolution spatiale de ce type d'images ne permet pas de préciser avec certitude si les espaces concernés correspondent aux zones de cultures, aux pâturages, aux jachères, aux forêts secondaires ou aux villes par exemple. La description est donc qualitative et quelque peu figée car elle ne prend pas en compte l'évolution spatio-temporelle de la déforestation. Nous convenons qu'à ce niveau d'observation, les investigations sont limitées à la reconnaissance panoramique du comportement des grandes structures spatiales sur une période déterminée. Dès lors, pour mettre en évidence les changements d'occupation du sol et les dynamiques des défrichements agricoles, il est indispensable d'utiliser les images multi-dates qui offrent la possibilité de suivre les modifications qui surviennent dans la configuration spatiale des paysages. Cette exigence nous a conduit à faire appel aux données d'inventaire (Chapitre 4) pour la caractérisation écologique des écosystèmes et aux images de haute résolution spatiale (SPOT) pour affiner la description géographique en termes de contenu thématique de l'occupation du sol à l'échelle locale (Chapitre 5).

De nombreux travaux ont montré que dans plusieurs domaines, les processus qui s'opèrent dans le paysage sont le résultat des interactions entre systèmes sociaux et environnementaux et surviennent dans des plages d'échelles caractéristiques (Quattrochi *et al.*, 1997; Easterling, 1997). De plus, le choix de l'échelle d'analyse influence le type d'explication donné aux processus et même la validité des observations. La réponse à ce dilemme entre les petites et les grandes échelles réside dans l'analyse à plusieurs échelles et le développement d'approche

hiérarchique pour l'observation et l'explication des processus. Pour Lambin (1994), à petite échelle, le niveau d'agrégation assez élevé peut obscurcir la variabilité des situations ou des relations et produire des résultats insignifiants qui n'aident ni à comprendre le vrai mécanisme véhiculé, ni à prédire la tendance du phénomène étudié. A l'opposé, les études entreprises à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation agricole ont un avantage certain en ce qui concerne la compréhension de la dynamique locale des systèmes agricoles ou pastoraux. Cette échelle paraît la plus appropriée pour identifier les éléments structurants, comprendre leur logique d'organisation et leur mode de gestion, évaluer les dysfonctionnements et préciser les critères d'optimisation. Force est de constater cependant que les analyses à l'échelle du terroir montrent déjà les limites des approches locales qui, d'après Milleville *et al.* (1994), présentent, dans certains domaines techniques, un caractère sectoriel. Dès lors, les approches à très grande échelle seraient d'un moindre intérêt soit parce que les processus étudiés s'opèrent sur une plus grande étendue, soit parce qu'il n'existe pas de possibilité de généralisation des résultats à des échelles plus petites. De plus en plus, les expériences révèlent que ce n'est qu'à l'échelle de la petite région et plus encore à l'échelle régionale, que certains processus clés et que certains contrastes plus marqués se manifestent dans les systèmes de mise en valeur des espaces et leurs niveaux de productivité (Veldkamp *et al.*, 1996; Verburg, 1999).

### **6.2.2. La dynamique environnementale à l'échelle régionale.**

Les données à faible résolution, telles que celles fournies par l'instrument NOAA-AVHRR sont de plus en plus utilisées pour la surveillance des milieux forestiers. Il semble en effet qu'elles réalisent un compromis unique entre la puissance de résolution au sol, le contenu en informations sur la végétation, la fréquence de l'acquisition et l'étendue de la couverture géographique. A l'heure actuelle, les données AVHRR semblent être la seule solution pratique à l'obtention, jusqu'ici impossible, d'une couverture terrestre de l'ensemble de la planète. Par ailleurs, ces données constituent une source d'information de premier ordre pour des problématiques de suivi environnemental telle que l'appréhension qualitative de la dynamique de la végétation à très petite échelle. L'appréhension de la dynamique interannuelle du couvert végétal est très riche en enseignement. Elle permet de comprendre les mécanismes régissant les cycles saisonniers de la végétation, mais aussi et surtout de comprendre une répartition globale de la végétation beaucoup moins simpliste que le schéma généralement proposé. La présente étude a montré que l'indice de végétation intégré, combiné au total pluviométrique pendant la saison de végétation constitue un bon indicateur pour apporter une information qualitative sur l'état du couvert végétal dans les zones sahélienne et soudano-sahélienne. L'analyse de la dynamique végétale a, au bout d'une vingtaine d'années, permis d'obtenir une tendance d'évolution et d'appréhender ainsi les variations locales par rapport à un ensemble plus large. Grâce à ce procédé, on a montré que la zone sèche de l'Afrique de l'Ouest n'est pas touchée par une désertification massive et inéluctable, mais que la végétation exhibe une certaine résilience, faiblement suivie d'années de reconquête végétale après les années de forte sécheresse. Dès lors, l'exploitation des données à basse résolution convient beaucoup mieux pour assurer un suivi des transformations qui affectent la biosphère pour des raisons techniques et de coût ; celles de SPOT, de LANDSAT TM ou MSS n'étant pas adaptées à la connaissance des phénomènes de grande surface.

La question qu'on est en droit de se poser est relative à l'aspect qualitatif de cette reconquête mais aussi le mitage important qui gagne les zones naturelles autrefois épargnées. Les nouveaux peuplements végétaux seront-ils aussi résistants que les anciens ? S'agit-il d'espèces pionnières qui annoncent le développement d'une végétation plus adaptée et plus robuste ? Seules des études de terrain précises peuvent répondre à ces questions, la télédétection



spatiale à basse résolution trouve ici ses limites. En effet, ces données fournies par le capteur AVHRR autorisent principalement une recherche de contrastes entre les formes de végétation dans un ou plusieurs canaux spectraux. Il n'existe donc pas de méthode applicable universellement puisque les caractéristiques de la réflectance, les mosaïques de végétation, les effets saisonniers notamment, diffèrent largement d'une région à l'autre. Par ailleurs, le caractère saisonnier de la végétation tropicale est un autre critère important de classement et une caractéristique écologique fondamentale. Aussi, à la résolution du kilomètre, l'indice de végétation (NDVI) calculé à partir des données basse résolution Pathfinder, reste insuffisant pour caractériser les paysages complexes des zones soudanaises et guinéennes. Le suivi de l'indice de végétation normalisé en région soudanienne et en région guinéenne nous montre qu'à l'intérieur de chaque zone, il n'est pas possible de séparer les surfaces de cultures des milieux naturels. Par ailleurs, les données à basse résolution ne sont pas bien adaptées à l'approche conventionnelle de la description de la végétation dans l'état actuel de nos connaissances notamment dans la distinction des phytocénoses. La faible résolution spatiale des images Pathfinder n'autorise pas une interprétation sur des régions de faible envergure, mais elle permet par contre de constater les grandes tendances annuelles et interannuelles du couvert végétal. Il faudrait donc développer les méthodes de cartographie de la végétation en y intégrant l'information satellitaire et progresser dans l'utilisation des données à faible résolution spatiale pour mieux comprendre les mécanismes (assez complexes) du fonctionnement des massifs forestiers tropicaux.

### **6.2.3. Résilience du couvert végétal suite aux épisodes de sécheresse**

Les résultats issus de nos travaux ont montré que la région d'extraction étudiée connaît une régression accrue de 1982 à 1985, période dramatique de sécheresse pour l'ensemble de la frange sahélienne. Il est manifeste que la régression végétale obéit plus à un mitage progressif de l'espace qu'à une avancée régulière. L'explication de ce mitage spatial est maintenant relativement connue. Différents travaux ont établi la nécessité d'une appréhension systémique du phénomène de sécheresse. Il n'y a sécheresse que par rapport à une relation entre pluviométrie et besoin pluviométrique des populations, entre milieu et activités humaines. Pendant les années de pluviométrie déficitaire, la production agricole de même que les activités économiques voient leurs potentialités diminuer, facteur débouchant sur un système de crise. Ce système est alors le témoignage d'une rupture d'équilibre entre un milieu sensible et une exploitation humaine de plus en plus importante pour des populations en croissance démographique constante. Cette rupture d'équilibre n'est pas uniforme, elle est localisée dans des îlots d'exploitation agricole, de défrichements nécessaires à l'accroissement de la production pour satisfaire les demandes nutritionnelles d'une population à démographie galopante. A l'opposé de cette tendance, les années suivant cette phase de sécheresse offrent une information capitale. Les images de 1988 et 1999 montrent un ré-accroissement du couvert végétal, consécutif à la reprise des précipitations. La capacité de régénération de la végétation relativise une fois encore les effets présentés comme habituels d'un phénomène de sécheresse plus complexe. Il ne s'agit pas de sous-estimer l'impact dramatique de toute crise pluviométrique dans ces régions sensibles. Les régressions existent, produisant un mitage de l'espace, détruisant surtout un équilibre vital pour les populations. Mais l'analyse de la végétation, grâce à l'étude du NDVI, témoigne de la véritable complexité de ces périodes de crise et de post-crise. Elle semble indispensable pour comprendre l'évolution du couvert végétal, réclamant pour la compréhension la prise en compte de plusieurs facteurs, physiques et humains.

#### **6.2.4. Modifications du couvert végétal, dégradation des terres et désertification**

Les modifications et la dynamique de la végétation en Afrique de l'Ouest sont difficiles à appréhender sans tomber dans les stéréotypes d'usage et le catastrophisme. La désertification franche et massive, l'avancée inexorable du Sahara, la relation de cause à effet entre sécheresse et famine sont des clichés encore très présents. La télédétection spatiale à faible résolution permet pourtant un suivi à petite échelle, exhaustif et objectif, de la végétation. Les latitudes sahéliennes et soudaniennes sont certainement les régions du monde où les sécheresses ont les répercussions les plus importantes sur les sociétés humaines. De plus, la combinaison de facteurs politiques et de sécheresses particulièrement fortes est souvent la cause des tragédies humaines portées à la connaissance de tous. Qu'il s'agisse d'événements extrêmes ou d'une pluviométrie insuffisante, le risque n'est pas seulement environnemental car l'économie des populations rurales d'Afrique repose essentiellement sur la valorisation des ressources naturelles, notamment l'eau, la terre et leurs produits et services. L'interrelation étroite entre la sécheresse et les activités des hommes a pour conséquence la dégradation de l'environnement. Or cette dégradation réduit la possibilité de production des écosystèmes et pousse à une surexploitation des différentes ressources naturelles, ce qui fragilise encore davantage le milieu, accentue la sécheresse et perturbe les activités socio-économiques. A ce stade, il serait hardi et sans doute simplificateur de prétendre que la désertification est une manifestation du changement climatique. Cependant, il est évident que le changement climatique contribue déjà à accentuer les processus de désertification et les renforcera à l'avenir si les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) ne sont pas maîtrisées. Le changement climatique viendra accroître la vulnérabilité à laquelle la désertification les soumet. En effet, de nombreuses zones sèches appartiennent aux Pays les Moins Avancés (PMA): à un faible niveau de développement général, s'ajoute donc la combinaison d'écosystèmes fragiles et de systèmes de production ruraux caractérisés par peu d'apports technologiques. Des éléments qui indiquent l'état de grande vulnérabilité des populations de ces régions.

Eu égard à ce qui précède, il est indispensable de demeurer très prudent vis-à-vis de l'avancée du Sahara, qui loin d'être aussi massive, fatale et rapide qu'on l'indique souvent, n'en reste pas moins inquiétante. Comme nous l'avons montré, l'analyse du NDVI semble utile pour saisir ces facteurs. Elle est réalisée dans cette étude à une échelle à très faible résolution géométrique qui ne peut qu'introduire l'analyse tendancielle de la végétation. Elle doit être complétée par l'étude d'images plus précises, de réalités terrains plus concrètes, de la véritable dimension d'un milieu avant tout humain. L'étude a également montré que la caractérisation de l'état de surface constitue un complément très utile à la compréhension des tendances détectées grâce aux indices radiométriques. Nos conclusions suggèrent qu'il ne faut pas limiter l'utilisation de données satellitaires au seul paramètre «indice de végétation». Les données de terrain constituent des compléments très utiles aux indices radiométriques : ces paramètres permettent, d'une part, de mieux différencier les types de végétation et apportent d'autre part des informations supplémentaires sur leur intégrité.

#### **6.2.5. Du suivi de l'évolution du couvert végétal à l'échelle locale**

Le manque de données de terrain dans les régions subhumides fait de la télédétection spatiale, un outil privilégié pour le suivi des transformations de la végétation. La plupart des travaux effectués dans ces régions mettant en jeu les données satellitaires à haute résolution (SPOT) sont surtout orientés vers la cartographie des changements de la végétation (déforestation, occupation du sol...), alors que les études du suivi écologique (succession, biodiversité...) sont moins nombreuses. Notre travail visait à développer, à partir des images optiques multi-dates

de SPOT, une technique permettant le suivi de la dynamique des unités d'occupation du sol dans une région dominée par les formations savanicoles et autres formations marginales fortement anthropisées. La résolution des images SPOT est suffisante pour produire une classification automatique à grande échelle. L'hétérogénéité spatiale de la végétation naturelle en région soudanienne nécessite cette résolution pour obtenir une cartographie valide.

Nos résultats montrent qu'il est possible d'établir des correspondances entre les types de végétation représentatifs des états de succession et des indices radiométriques. Par la suite, à partir des variations temporelles de cet indice, nous avons pu repérer et identifier les transformations de la végétation entre 1986 et 2005. Aussi, l'interprétation des résultats nous suggère que le NDVI n'est pas, dans le cas de la zone soudanienne, le meilleur outil de différenciation des divers types de couvert végétal au point de vue de leur diversité et de leur productivité. Un indice des sols notamment l'indice de brillance, s'est avéré plus approprié pour l'estimation des variables indicatrices caractéristiques des formations ligneuses naturelles. Toutefois, les résultats acquis demandent (néanmoins) confirmation et analyses complémentaires. En effet, la surface terrière, la biomasse totale, le biovolume et l'éco-volume constituent les principaux paramètres écologiques d'évaluation de la dégradation des écosystèmes. Il serait intéressant, dans les études futures, d'envisager de développer des méthodes d'estimation de ces paramètres par des techniques de télédétection (optiques ou aéroportées actives), en vue de la prédiction de l'évolution des formations végétales.

Finalement, l'intégration des données physiologiques aux données spatialisées permet de dresser un bilan écologique pour la période d'observation. Nos résultats montrent que les processus de dégradation dépassent largement les capacités de reconstitution de la végétation forestière. Nous avons aussi montré qu'il est possible d'une part d'appréhender les processus de succession végétale et d'autre part, de dresser le bilan écologique de la végétation en milieu soudanien à partir de données de télédétection, à condition que les mécanismes de perturbation anthropique soient suffisamment connus. Il importe de noter que la multiplication des applications à grande échelle des séries de données à haute résolution est une tendance dont il faudra tenir compte à l'avenir. Les données à haute résolution jouent également un rôle important dans la validation des données à faible résolution. Celle-ci exige une analyse sur plusieurs niveaux, au cours de laquelle les informations les plus détaillées contribuent à valider celles qui le sont moins. Inversement, la perspective globale que procurent les données à faible résolution spatiale du capteur AVHRR de NOAA peut faciliter le choix de la méthode d'échantillonnage utilisée pour la sélection des sites faisant l'objet d'une analyse à résolution plus élevée. Elle implique que les systèmes de classement devront être adaptés non seulement aux besoins d'information, mais aussi aux capacités des techniques de télédétection à identifier les classes ou attributs. En outre, si la haute résolution doit devenir la norme en matière de surveillance de la végétation, il faudra soit réduire sensiblement le prix des données, soit se procurer des ressources supplémentaires, pour pouvoir effectuer des évaluations assez rapprochées. La couverture systématique et exhaustive d'importantes superficies boisées ne sera possible que si les responsables de la gestion des satellites prêtent une attention particulière aux problèmes que pose l'acquisition à intervalles réguliers d'une série de données complètes.

#### **6.2.6. Perspectives d'amélioration des indicateurs de désertification à partir des capteurs à large champ optique**

L'approche visant à confronter pluviosité et estimations de la productivité végétale apparaît indispensable pour suivre à moyen ou long terme les processus de désertification, en

s'affranchissant de la variabilité inter-annuelle toujours importante dans les zones arides et sub-arides. Les améliorations possibles de la méthode résident dans l'estimation spatialisée des pluies avec une maille inférieure à  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ : ceci est envisageable à partir de données des capteurs de Météosat (Rosema & Roozkrans, 1996) ou de TRMM (*Tropical Rainfall Monitoring Mission*), lancé en novembre 1997. D'autre part, des données satellitaires comme celles de SPOT-VEGETATION, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) et de MERIS (MEDIUM Resolution Imaging Spectrometer) d'ENVISAT devraient permettre d'affiner une meilleure estimation des couverts végétaux pérennes faiblement chlorophylliens. Le seul, inconvénient de ces types de données est qu'elles ne sont disponibles qu'à partir du milieu des années 1990, ce qui n'autorise pas des études conséquentes sur des phénomènes perceptibles à moyen et long terme comme la désertification. Il demeure donc nécessaire de poursuivre les analyses des données AVHRR qui, seules, permettent d'utiliser une archive établie depuis 1982, dont on peut souhaiter qu'une version à la résolution nominale de 1 km soit complétée et accessible facilement dans le futur.

### **6.2.7. De l'accès aux données pour les études environnementales en Afrique**

Le dilemme « exploitation/conservation » continue à diversifier les points de vue sur le rôle de la forêt dans l'économie locale, le développement national, la protection de l'environnement, les changements globaux, etc. Les besoins d'information sont aussi variés que les opinions et les prises de position sur les questions forestières. Dans l'état actuel des choses, la situation se complique encore du fait que la plupart des besoins d'information sont exprimés, de façon bien naturelle, à l'échelle humaine, qui est celle des observations visuelles ou des mesures au sol. Les systèmes de classification des zones forestières correspondent eux aussi à cette perspective, dans la mesure où ils reposent sur des critères tels que la composition et la structure de la flore. Il est évident que ces paramètres ne sont pas directement mesurables par des capteurs spatiaux, notamment par ceux qui fonctionnent à des résolutions au sol grossières. Il faut aussi noter que la complexité croissante de la demande de données relatives aux ressources végétales et des techniques de télédétection est à l'origine d'une attitude ambiguë à l'égard de la technologie. Alors que l'on a besoin d'établir des inventaires locaux et nationaux pour répondre à des besoins de gestion immédiate, on réclame en même temps de toute urgence des techniques de suivi permettant de détecter les changements survenant dans les forêts à l'échelle mondiale. Or, il apparaît de plus en plus clairement, même si cela n'est pas toujours compris, qu'il est extrêmement difficile de concilier des exigences aussi éloignées l'une de l'autre. Les techniques de télédétection utilisées à l'échelle continentale ou mondiale ne fourniront pas nécessairement les données intéressantes sur le plan local. L'«ancrage» encore nécessaire des analyses mondiales sur des exercices de validation locaux peut s'appuyer sur des approches très différentes de celles utilisées pour l'évaluation locale.

En définitive, il convient de souligner que la désertification constitue à la fois un problème d'environnement et un problème de développement. Elle affecte l'environnement local et le mode de vie des populations, mais ses effets ont des répercussions plus globales au niveau de la biodiversité, des changements climatiques et des ressources en eau. Etroitement liée à l'activité humaine, la dégradation des terres constitue à la fois une des conséquences du sous-développement et une entrave majeure au développement durable des zones sèches. Les efforts de lutte contre la désertification doivent s'accompagner, au-delà de l'utilisation de techniques appropriées, de mesures visant à encourager le changement économique et social et s'inscrire dans le processus même du développement. A ce sujet, la préparation des Programmes d'Actions Nationaux (PAN) a constitué un exercice de mobilisation et de sensibilisation des pays affectés. Leur évaluation est en voie d'achèvement, particulièrement

en Afrique. Même si les résultats restent décevants en termes de diagnostic de la situation et de définition de stratégie de lutte, leur élaboration a engendré de vrais processus participatifs qui ont amené les différentes couches de la population à prendre la parole, à exprimer leurs points de vue et leurs besoins. Ils auront été des exercices de gestion et de mobilisation importants, allant du renforcement des capacités des acteurs locaux à la sensibilisation de l'opinion publique, en passant par la révision des cadres législatifs et institutionnels. Dans bien des cas, leur élaboration aura mobilisé d'énormes ressources et soulevé des attentes importantes. Les processus des PAN ont une portée et des impacts induits jusqu'ici insoupçonnés, notamment au plan de la démocratisation des relations entre les acteurs de la société civile et les pouvoirs publics. A présent, il faudrait mettre en œuvre les programmes et projets et intégrer la lutte contre la désertification à la gestion des ressources naturelles et de l'environnement. C'est en effet à ce niveau que la question du financement de la lutte contre la désertification se pose avec de plus en plus d'acuité. Les pays développés seront-ils en mesure de répondre aux appels des pays en développement ? Le mécanisme mondial réussira-t-il à mobiliser une offre suffisante pour répondre à la demande ? La Convention des Nations Unies pour la Lutte Contre la Désertification deviendra-t-elle une institution hypertrophiée, désuète et inefficace ou sera-t-elle réellement l'outil de partenariat qu'elle devrait être ?

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAM, J.G., 1968. La flore et la végétation du parc national du Niokolo-Koba (Sénégal) *Adansonia*, 8, (4): 439-459.
- ADAMOU-N'DIAYE, M., OGODJA, O. J., GBANGBOCHE, A.B., ADJOVI, A. & HANZEN, C.H., 2001. Intervalle entre vêlage chez la vache Borgou au Bénin. *Annales de Médecine Vétérinaire*, 145: 130-136.
- ADOMOU, A.C., 2005. Vegetation patterns and environmental gradients in Benin: Implications for biogeography and conservation. PhD thesis, Wageningen University, 150p.
- AFOUDA, F., 1990. L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat, Univ. Paris IV (Sorbonne), Institut de Géographie, 428p.
- AHMAD, Y.J. & KASSAS, M., 1987. Desertification: Financial Support for the Biosphere, Kumarian Press, W. Hartford, CT., 236 p.
- AKOBUNDU, I.O. & AGYAKWA, C.W., 1989. Guide des adventices d'Afrique de l'ouest. IITA, 522p.
- AKOGBETO, M.C., DJOUAKA, R. & NOUKPO, H., 2005. Utilisation des insecticides agricoles au Bénin. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, Vol. 98, (5): 400-405.
- ALLEN, T.F. & STARR, T.H., 1982. Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Chicago, The University of Chicago Press, 310p.
- AMANI, A. & LEBEL, T., 1997. Lagrangian kriging for the estimation of Sahelian rainfall at small time steps. *Journal of Hydrology*, 192: 125-157.
- ANYAMBA, A. & TUCKER, C.J., 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, 63: 596-614.
- ARIORI, S.L. & OZER, P., 2005. Évolution des ressources forestières en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne au cours des 50 dernières années. *Geo- Eco-Trop*, 29: 61-68.
- AUBREVILLE, A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. *Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales*, Paris, 351p.
- AUBREVILLE, A., 1950. Flore forestière soudano-guinéenne de l'Afrique de l'Ouest Française. 525p.
- BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F. & HUETE, A.R., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, Harwood Academic Publishers, Vol. 13: 95-120.
- BARBIER, E.B. 1997. Economic determinants of land degradation in developing countries. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol 352, n°1356, 352: 891-899.
- BARIOU, R., LECANU, D. & LE HENAFF, F., 1985. Dossier de télédétection: réponse spectrale des végétaux. Rennes, Université de Rennes, vol.2, 71p.
- BECHLER-CARMAUX, N., MIETTON, M. & LAMOTTE, M., 1999. Le risque de pénurie en eau potable dans la ville de Niamey (Niger). *Sécheresse*, 10 : 281-288.
- BEHNKE, R. & SCOONES, I., 1991. Rethinking range ecology: implications for rangeland management in Africa. Overview of paper presentations and discussions at the *Technical Meeting on savanna development and pasture production*, 19-21 November 1990, Woburn, UK. Overseas Development Institute and International Institute for Environment and Development (ODI), London, 38p.
- BERGER, A.R., 1996. Introduction to geoinicator checklist. *Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems*. Berger, A.R., and Iams, W.J. (Eds), Rotterdam: A.A. Balkema : 383-394.

- BERHAUT, J., 1967- Flore du Sénégal. 2<sup>e</sup> Edition, 485p.
- BERTRAND, R., 1998. Du Sahel à la forêt tropicale : Clés de lecture des sols dans les paysages ouest-africains. Editions CIRAD, Montpellier, 272p.
- BILLON, B., 1985. Le Niger à Niamey : Décrue et étiage 1985. *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie. Vol. XXI, (4): 3-22.
- BLASCO, F., 1990. Guidelines on use of LANDSAT and SPOT for Land use and forest change. Provisionnal version, Rome, FAO, 63p.
- BOKO, M., 1988. Climats et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de Doctorat d'Etat. CRC, URA 909 du CNRS, Univ. Bourgogne, Dijon, 2 volumes, 601p.
- BONGERS, F., POORTER, L. & HAWTHORNE, W.D., 2004. The forest of Upper Guinea: gradients in large species composition. In "*Biodiversity of West African Forests: An ecological atlas of woody plants species*", Poorter, L., Bongers, F., Kouamé F.N., & Hawthorne, W.D., (Eds), CABI Publishing, Oxon, UK & Cambridge, USA , Chapter 4: 41-52.
- BOUDET, G., 1972. Désertification de l'Afrique tropical sèche. *Adansonia Series*, 2, (12): 505-24.
- BOUDET, G., 1984. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. Série Manuels et précis d'élevage N°4, IEMVT, Ministère de la Coopération, Paris, 258p.
- BREMAN, H. & De WIT, C.T., 1983. Rangeland productivity and exploitation in the Sahel. *Science*, 221:1341-1347.
- BRISKE, D.D., FUHLENDORF, S.D. & SMEINS, F.E., 2003. Vegetation dynamics on rangelands: a critique of the current paradigms. *Journal of Applied Ecology*, 40: 601-614.
- BOYD, D., FOODY, G., CURRAN, P., LUCAS, R. & HONZAK, M., 1996. An assessment of radiance in Landsat TM middle and thermal infrared wavebands for the detection of tropical forest regeneration. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 249-261.
- CALOZ, R. & COLLET, C., 2001. Précis de Télédétection: Traitements Numériques d'images de télédétection. AUF, Presses de l'Université du Québec, vol.3, 386p.
- CAPO-CHICHI, J.G., 2000. La dégradation des terres et leur réhabilitation dans les zones arides du Bénin, In "*Actes du séminaire international sur : Les ressources en eau douce et réhabilitation des terres dégradées dans les zones arides*", N'djaména, Tchad, Octobre 2000, 65-70.
- CAPOT-REY, R., 1953. L'Afrique blanche française. Le Sahara français, Paris, PUF. Coll. Pays d'Outre-mer, Colonies, Empires, Vol.II, 564p.
- CECCATO, P., FLASSE, S., TARANDOLA, S., JAQUEMOUD, S. & GREGOIRE, J-M., 2001, Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77: 22-33.
- CENATEL, 2002. Base de données géoréférencées sur l'utilisation agricole des terres au Bénin. Rapport final, 20p.
- CHAMARD, P.C. & COUREL, M.F., 1999. La forêt sahélienne menacée. *Sécheresse*, 10: 11-18.
- CHAMARD, P.C. & COUREL, M.F., 1979. Contribution à l'étude du Sahel voltaïque. Causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal des dunes, Secteur de Menegou-Bidi (Département du Sahel – sous-préfecture de l'Oudalan), Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, 75-90.
- CHAPPELL, A., SEQUIST, J.W. & EKLUNDH, L., 2001. Improving the estimation of noise from NOAA AVHRR NDVI for Africa using geostatistics. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 1067-1080.

- CHARNEY, J., QUIRK, W.J., CHOW, S.H. & KORNFELD, J., 1977. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34: 1366-1386.
- CHARNEY, J., STONE, P.H. & QUIRK, W.J. 1975. Drought in the Sahara: a biogeophysical feedback mechanism. *Science*, 187: 434-435.
- CHAVEZ, P.S. & MACKINNON, D.J., 1994. Automatic detection of vegetation changes in the Southwestern United States using remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, (5): 571-583.
- CHIPPAUX, J.P., HOUSSIER, S., GROSS, P., BOUVIER, C. & BRISSAUD, F., 2002. Etude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 95 : 119-123.
- CHRISTENSEN, J.H., B. HEWITSON, A., BUSUIOC, A., CHEN, X., GAO, I., HELD, R., JONES, R.K., KOLLI, W.-T., KWON, R., LAPRISE, V., MAGAÑA RUEDA, L., MEARN, C.G., MENÉNDEZ, J., RÄISÄNEN, A., RINKE, A., SARR, A. & WHETTON, P., 2007. Regional Climate Projections. In "Climate Change 2007: The Physical Science Basis". Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- CLUB DU SAHEL/OCDE, 1998. Pour préparer l'avenir de l'Afrique de l'Ouest : Une vision à l'horizon 2020. West Africa Long-Term Perspective Study (WALTPS). Club du Sahel, OCDE, Paris (France), 157p.
- CORNET, A., 2002. La désertification à la croisée de l'environnement et du développement : un problème qui nous concerne. pp. 91-130, In R. Barbault, Cornet A., Jouzel J., Megie G., Sachs I., & J. Weber Edit. Johannesburg Sommet Mondial du Développement Durable 2002, *Quels enjeux ? La contribution des scientifiques au Débat*. ADPF, Paris, 201p.
- CUNY, P., & SORG, J.P., 2003. Forêt et coton au sud du Mali : cas de la commune rurale de Sorobasso. *Bois et Forêts des Tropiques*, 276: 17-31.
- DAI, A., LAMB, P.J., TRENBERTH, K.E., HULME, M., JONES, P.D. & XIE, P., 2004. The Recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, 24: 1323-1331.
- DAI, A., TRENBERTH, K.E. & KARL, T.R., 1998. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophysical Research Letters*, 25: 3367-3370.
- DAVENPORT, M.L. & NICHOLSON, S.E., 1989. On the relation between rainfall and Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 2369-2389.
- DEFOURNY, P., 1989. Etude de la dynamique de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir des données Landsat MSS. *Photointerprétation*, n°89 (2), Fasc.4
- De LEEUW, P.N. & TOTHILL, J.C., 1990. The concept of rangeland carrying capacity in sub-saharan Africa ; myth or reality, ODJ Pastoral Network Paper 29b, London, 29p.
- De WISPELAERE, G. & GODARD, V., 1987. Projet de suivi par télédétection des ressources naturelles renouvelables dans la région de Kaédi - Sélibabi - Kankossa (Mauritanie) : Étude thématique (2e partie), Maisons-Alfort, IEMVT, 22p.
- DIALLO, O., DIOUF, A., HANA, N.P., NDIAY, A. & PREVOST, Y., 1991, AVHRR monitoring of primary production in Senegal, West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1259-1279.
- DIOUF, A. & LAMBIN, E.F., 2001. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. *Journal of Arid Environments*, 48: 129-148.



- DREGNE, H.E. & CHOU, N.T., 1992. Global Desertification: Dimensions and Costs. In *"Degradation and restoration of arid lands"*. Dregne H. E. (Ed.). Lubbock, États-Unis, Texas Tech. University, 249-281.
- DYSON, T., 1996. Population and food: global trends and future prospects. In *"Global Environmental Change Series"*, Routledge, London (United Kingdom), 231p.
- EASTERLING, W.E., 1997. Why regional studies are needed in the development of full-scale integrated assessment modelling of global change processes. *Global Environmental Change*, 7, (4): 3337-3356.
- EKLUNDH, L. & OLSSON, L., 2003. Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30, (8): 1430-1433.
- ELLIOTT, D.C., 1996. A conceptual framework for geoenvironmental indicators. In *"Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems"*, BERGER A.R. & IAMS W.J. (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, 337-349.
- ELLIS, J.E., & GALVIN, K., 1994. Climate patterns and landuse practices in the dry zones of Africa. *BioScience*, 44, (5): 340-349.
- ELLIS, J.E. & SWIFT, D., 1988. Stability of African pastoral ecosystems: Alternate paradigms and implications for development. *Journal of Range Management*, 41, (6): 450-459.
- EKLUNDH, L., & OLSSON, L., 2003. Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30, (8): 131-134.
- ESCADAFAL, R. & POUGET, M., 1986. Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). *ITC Journal*, N°1, 19-23.
- ESRI, 2004. ArcGis 9.2 software, Environmental Systems Resource Institute, Redlands, Calif., 2004.
- FAIRHEAD, J. & LEACH, M., 1996a. Misreading the African Landscape. Cambridge University Press, ISBN 0521564999, Cambridge, UK, 374p.
- FAIRHEAD, J. & LEACH, M., 1996b. Rethinking the forest-savanna mosaic: Colonial science and its relics in West Africa. In *"The Lie of the Land: Challenging Received Wisdom on the African Environment"*, M. Leach and R. Mearns (Eds.), International African Institute and James Curry Ltd, Heinemann, Portsmouth, New Hampshire, 105-121.
- FAO, 2006. FAOSTAT, FAO Statistical Databases. <http://faostat.fao.org/>, (last access 22/05/2007).
- FAO, 2005. Situation des forêts du monde 2005. ([www.fao.org/docrep/007/y5574f/y5574f00.htm](http://www.fao.org/docrep/007/y5574f/y5574f00.htm))
- FAO/IFAD/WFP, 2005. Meeting the Millennium Development Goals: Financing for Food Security, Agriculture and Rural Development. Contribution by FAO, IFAD and WFP. UN General Assembly 59th Session, New York, 27-28 June 2005, 4 p.
- FAO, 2004. *FAOSTATS – Statistics Database*. <http://apps.fao.org/>
- FAO, 2003. Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome (Italie), 54p.
- FAO, 2001. *Global Forest Resources assessment 2000*, FAO Forestry Paper 140, Rome.
- FAO, 2000a. On definitions of forest and forest change. Programme d'évaluation des ressources forestières, document de travail 33. [www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp](http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp)
- FAO, 2000b. Land resources potential and constraints at regional and country level. By Bot, A.J., Nachtergaele, F.O., Young, A., World Soil Resources Reports (FAO), No. 90, Rome (Italy), 114p.
- FAO, 1999. Soil fertility and African food security. By Kelly, V., World Soil Resources Report No. 85, Rome (Italy), 94p.
- FAO, 1997. Situation des forêts du monde. Food and Agriculture Organization, Rome, 200p.

- FENSHOLT, R., RASMUS, N., THOMAS, T., & STISEN, S., 2006. Evaluation of AVHRR PAL and GIMMS 10-day composite NDVI time series products using SPOT-4 vegetation data for the African continent. *International Journal of Remote Sensing*, 27, (13): 2719-2733
- FERNANDEZ-GIMENEZ, M.E. & ALLEN-DIAZ, B., 1999. Testing a nonequilibrium model of rangeland vegetation dynamics in Mongolia. *Journal of Applied Ecology*, 36: 871–885.
- FIDA, 2005. Réaliser les Objectifs du Millénaire pour le Développement : Investissement rural et politiques porteuses (Contribution au débat – Conseil des gouverneurs du FIDA, Vingt-huitième session, 16-17 février 2005). FIDA, Rome (Italie), 55p.
- FISHER, R.A., 1936. The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, 7: 179-188.
- FLORET, C. & POINTANIER, R., 1982. L'aridité en Tunisie présaharienne. Travaux et Documents N°160, ORTOM Paris, 544p.
- FOODY, G.M., 2003. Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: an example focused on the NDVI-rainfall relationship. *Remote Sensing of Environment*, 88: 283-293.
- FOODY, G.M., CAMPBELL, N.A., TRODD, N.M. & WOOD, T.F., 1992. Derivation and applications of probabilistic measures of class membership from the maximum-likelihood classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, (9): 1335-1341.
- FRIEDEL M.H., 1991. Range condition assessment and the concept of thresholds: a viewpoint. *Journal of Range Management*, 44: 422-427.
- FOURNIER, A., 2001. Végétation des jachères et succession post-culturale en Afrique tropicale. In «*La jachère en Afrique tropicale* », John Libbey Eurotext, Paris, 123-168.
- GANABA, S., OUADBA, J.M. & BOGNOUNOU, O., 2005. Exploitation traditionnelle des végétaux spontanés en région sahélienne du Burkina Faso. *Vertigo – La revue en sciences de l'environnement*, Vol6, N°2, 14p.
- GIANNINI, A., SARAVANAN, R. & CHANG, P., 2003. Oceanic forcing of Sahel Rainfall on interannual to interdecadal timescales, *Science*, 302: 1027-1030.
- GIEC/IPCC, 2007. Mitigation of Climate Change: 4th Assessment Report, Paris, Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/climate-changes-2007-ar4-fr.html>)
- GIRARD, M.C. & GIRARD, C.M., 1999. Traitement des données de télédétection. Dunod Ed. Paris, 529p.
- GLENN, E., STAFFORD-SMITH, M. & SQUIRES, V., 1998. On our failure to control desertification: implications for global change issues, and a research agenda for the future. *Environmental Science and Policy*, 1, 71-78.
- GOLLUSCIO, R.A., PEREZ, J.A., PARUELO, J.M. & GHERSA, C.M., 2005. Spatial heterogeneity at different grain sizes in grazed versus ungrazed sites of the Patagonian steppe. *Ecoscience*, 12: 103–109.
- GOND, V., BARTHOLOME, E., OUATARA, F., NOGUIERMA, A. & BADO, L., 2004. Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION, *International Journal of Remote Sensing*, 25: 987-1004.
- GONZALEZ, P., SY, H. & TUCKER C.J., 2004. Local knowledge and remote sensing of forest biodiversity and forest carbon across the Sahel. In “*The Sahel*“, Lykke A. M., Due M. K., Kristensen M., Nielsen I. (Eds.). Copenhagen, Danemark, Institute of Geography, Serein Occasional Paper n°17, 23-36.
- GONZALEZ, P., 2001. Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel, *Climate Research*, 17: 217-228.

- GORSE, J., 1985. La désertification dans les zones sahélienne et soudanienne en Afrique de l'Ouest, *Unasyhva*, 37, (150): 2-18.
- GOUNOT, M., 1969.- Méthodes d'étude quantitative de la végétation, Masson et Cie, Edit.Paris, 314p.
- GOUTORBE, J.P., LEBEL, T., DOLMAN, A.J., GASH, J.H.C., KABAT, P., KERR, Y., MONTEY, B., PRINCE, S.D., STRICKER, J.M.M., TINGA, A. & WALLACE, J.S., 1997. An overview of HAPEX-Sahel: a study in climate and desertification. *Journal of Hydrology*, (188-189): 4-17.
- GOWARD, S.N., & DYE, D.G., 1987. Evaluating North American net primary productivity with satellite observations. *Advanced Space Research*, 7: 165-174.
- GRAY, L.C. & MORANT, P., 2003. Reconciling indigenous knowledge with scientific assessment of soil fertility changes in southwestern Burkina Faso. *Geoderma*, 111: 425-437.
- GREENLAND, D.J., 1995. Land use and soil carbon in different agroecological zones. In "Soils and global Change", Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (Eds), CRC & Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1-24.
- GUEYE, M. & OZER, A., 2000. Apport de la télédétection à l'étude de la transformation de l'agriculture et de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional). In « La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives », Dubois, J.M.M., Caloz, R. et Gagnon, P. (Eds.), AUPELF-UREF, 141-151.
- HALL, J.B. & SWAINE, M.D., 1976. Classification and Ecology of closed canopy forest in Ghana. *Journal of Ecology*, 64: 913-951.
- HALL, J.B. & SWAINE, M.D., 1981. Distribution and ecology of vascular plants in a tropical rain forest. Forest vegetation in Ghana. (Reviewed works), *Bulletin du Jardin botanique national de Belgique*, Vol. 51, N°3-4: 468-468.
- HEIN, L. & De RIDDER, N., 2006. Desertification in the Sahel: a reinterpretation. *Global Change Biology*, 12: 1-8.
- HELD, I.M., DELWORTH, T.L., LU J., FINDELL, K. L. & KNUTSON, T. R., 2005. Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. Proceedings of the *National Academy of Sciences*, 102: 17891-17896.
- HELLDEN, U., 1991. Desertification – Time for an assessment? *Ambio*, 20: 372-383.
- HENRY, S., BOYLE, P. & LAMBIN, E., 2003. Modelling inter-provincial migration in Burkina Faso, West Africa: the role of socio-demographic and environment factors. *Applied Geography*, 23: 115-136.
- HÉRAULT, B. & HIERNAUX, P., 2004. Soil seed bank and vegetation dynamics in Sahelian fallows; the impact of past cropping and current grazing treatments. *Journal of Tropical Ecology*, 20: 683-691.
- HESS, T., STEPHENS, W. & GRAHAM, 1996. Modelling NDVI from decadal rainfall data in the North-East Arid Zone of Nigeria. *Journal of Environmental Management*, 48: 249-261.
- HICKLER, T., EKLUNDH, L., SEAQUIST, J.W., SMITH, B., ARDÖ, J., OLSSON, L., SYKES, M.T. & SJÖSTRÖM, M., 2005. Precipitation controls Sahel greening trend. *Geophysical Research Letters*, 32, (21): L21415.
- HIERNAUX, P., 2004. Equilibrium and non-equilibrium behaviours of range vegetation dynamics in the Sahel, in Rangelands at equilibrium and non-equilibrium: Recent developments in the debate around rangeland ecology and management, edited by Susanne Vetter. Cape Town: Programme for Land and Agrarian Studies, University of the Western Cape, 30-36.
- HIERNAUX, P., & TURNER, M.D., 2002. The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel. In "Global desertification: Do humans

- cause deserts?*”, J.F. Reynolds and D.M. Stafford Smith (Eds), Dalhem University Press, 135-148
- HIERNAUX, P. & Le HOUEROU, H.N., 2006. Les parcours du Sahel, *Sécheresse*, 17, (1-2) : 51-71.
- HOUGHTON, J.T., DING, Y., GRIGGS, D.J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.J., DAI, X., MASKELL, K., & JOHNSON, C.A., 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, New York, Cambridge University Press.
- HOUNDENOU, C., 1999. Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de géographie. UMR 5080, CNRS, Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie, 341p.
- HOUNTONDJI, Y.C., SOKPON, N., NICOLAS, J. & OZER, P., 2008. Ongoing desertification processes in the sahelian belt of West Africa: an evidence from the rain-use efficiencies, *In "Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation and Assessment"*, Roeder, A. & Hill, J. (eds.), Taylor & Francis group (*in press*).
- HOUNTONDJI, Y.C., & OZER, P., 2007. Trends in extreme rainfall events in Benin (west africa) 1960-2000. Communication orale, *Conférence régionale sur les changements climatiques et les phénomènes extrêmes en Afrique sub-saharienne*, Cotonou / Bénin du 06 au 09 juin 2007.
- HOUNTONDJI, Y.C., SOKPON, N. & OZER, P., 2006. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the monitoring of desertification. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (5): 871-884.
- HOUNTONDJI, Y.C., OZER, P., & TYCHON, B., 2003. Etude des modifications environnementales à partir des données pluviométriques et NDVI de NOAA-AVHRR en Afrique de l'Ouest, *In «Les Journées des Géographes Belges », Tome 1: Evaluer la capacité du milieu*, SCHMITZ S. & MEERT H. (eds.), Editions BEVAS/SOBEG, 19-24.
- HUETE, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- HUITCHINSON, J. & DALZIEL, J. M., 1954. *Flora of West tropical Africa, Vol 1. Part 1.*, Second Edition by KEAY, R.W. J. & HEPPEL, F.R., Crown Agents for Overseas Governments and Administration, London, 827p.
- HULME, M., 2001. Climatic perspectives on Sahelian dessication: 1973-1998. *Global Environmental Change*, 11: 19-29.
- HULME, M., 1996. Recent Climatic Change in the World's Drylands, *Geophysical Research Letters*, 23, (1): 61-64.
- ILLIUS, A.W. & O'CONNOR, T.G., 1999. When is grazing a major determinant of rangeland condition and productivity? *Proceedings of the VI International Rangelands Congress*, (1): 419-423.
- INGLADA, J., 2001. État de l'art en détection de changements sur les images de télédétection. Toulouse, CNES, 20p.
- INRAB, 1995. *Fiches techniques Sols et Forêts: Les sols et leurs potentialités agricoles, les essences forestières*. Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, 68p.
- INSAE, 2003. Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH-3) : Synthèse des analyses. Direction des Etudes Démographiques, Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, Cotonou, Bénin, 348p.
- JACOBBERGER-JELLISON, P.A., 1994. Detection of post-drought environmental conditions in the Tombouctou region. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 3183-3197.
- JAMES, M.E. & KALLURI, S.N., 1994. The Pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 3347-3364.

- JANICOT, S., 1996. Le point sur la désertification et les changements climatiques. *Connaissance de la Météorologie*, N°4, Météo-France, 15p.
- JENSEN, J.R., 2000. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 544p.
- JENSEN, J.R., 1983. Urban / suburban land use analysis. In “*Manual of Remote Sensing*” 2ed., Colwell, R.N. (ed.), Chapter 30, *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Falls Church, Virginia, vol. 2: 1571-1666.
- JUSTICE, C.O., DIGDALE, G., TOWNSHEND, J.R., NARRACOTT, A.S. & KUMAR M., 1991. Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semiarid West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1349-1368.
- JUSTICE, C.O., 1986. Monitoring the grasslands of semi-arid Africa using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1383-1622.
- KARIMOUNE, S., 1994. Contribution à l'étude géomorphologique de la région de Zinder (Niger) et analyse par télédétection de l'évolution de la désertification. Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Faculté des Sciences, Université de Liège. 350p.
- KATYAL, Ph. & VLEK, P.L.G., 2000. Désertification: concept, causes and amelioration. ZEF – Discussion paper on development policy, N°33, Bonn, 65p.
- KERR R.A., 1998. The Sahara is not marching southward. *Science*, 281: 633–634.
- KNIPLING, E.B., 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1:155-159.
- KUBEROW, H., 1994. Quantitative und qualitative erfassung von vegetationsänderungen – Ein beispiel aus dem Südsahel Malis, *Die Erde*, 125: 35-56.
- KUBEROW, H., 1990. Anwendung von LANDSAT-daten zur erfassung der vegetations dynamik in desertifikationsgefährdeten gebieten Malis, *Die Erde*, 121: 39-53.
- KUNKEL, K., 2003. North American trends in extreme precipitation. *Natural Hazards*, 29 : 291-305.
- LACAZE, B., AÏT-BACHIR, S. & SOMMER, S., 2003. Analyse diachronique de l'efficacité des pluies pour la production végétale dans le bassin méditerranéen de 1982 à 1996, *Télédétection*, Vol. 3, (2-3-4) : 165–174.
- LACAZE, B., & JOFFRE, R., 1987. Caractérisation des formations végétales méditerranéennes à partir de données Thematic Mapper : une étude de cas en Andalousie (Espagne). *International Journal of Remote Sensing*, 8: 1319-1333.
- LAMBIN, E.F. & EHRLICH, D., 1997. The identification of tropical deforestation fronts at broad spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 18, (17): 3551-3568.
- LAMBIN, E.F., TURNER, B.L. II, GEIST, H.J., AGBOLA, S.B., ANGELSEN, A., BRUCE, J.W., COOMES, O., 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., SKÅNES, H., STEFFEN, W., STONE, G., SVEDIN, U., VELDKAMP, T.A., VOGEL, C. & XU, J., 2001. The Causes of land-use and cover change: moving beyond the myths. *Global Environ. Change*, 11: 261–269.
- LAMBIN E.F., 1994. Modelling deforestation processes: A review. Research report n°1, *TREES* Series, 113p.
- LAMPREY, H., 1975. Report on the desert encroachment reconnaissance in northern Sudan (Khartoum), National Council for Research, Ministry of Agriculture of Sudan.
- LAPORTE, N., JUSTICE, C., & KENDALL, J., 1995. Mapping the dense humid forest of Cameroon and Zaire using AVHRR satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 16, (6): 1127-1145.

- LAPORTE, N., GOETZ, S., JUSTICE, C. & HEINICKE, M., 1998. A new land cover map of central Africa derived from multi-resolution, multi-temporal AVHRR data. *International Journal of Remote sensing*, 19, (18): 3537-3550.
- LEBART, L., MORINEAU, A. & PIRON, M., 1997. Statistique exploratoire multi-dimensionnelle. DUNOD, Paris, 440p.
- Le FLOC'H, E., 1996. Desertification in the Near East Region, Perspectives, Strategies and Plan of Action. Inter-Agency Task Force Ad-hoc Meeting, Cairo (Egypt), 23-25 Sep 1996, 22p.
- Le HOUÉROU, H.N., 1995. Climate change drought and desertification. Intergovernmental Panel on climate change (IPCC), Working group II, Adaptation & mitigation. 53p.
- Le HOUÉROU, H.N., POPOV, G.F. & SEE, L., 1993. Agro-Bioclimatic Classification of Africa. Agrometeorology working paper n° 6, Remote Sensing Centre, FAO, Rome (Italy), 230p.
- Le HOUÉROU, H.N., 1992. Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. In E. Le Floc'h, M. Grouzis, A. Cornet et J.C. Bille (éd.) L'aridité : une contrainte au développement. ORSTOM Éditions, Paris, série Didactiques, p. 197-220.
- Le HOUÉROU, H.N., 1990. Définition et limites bioclimatiques du Sahara. *Sécheresse*, 1: 246-259.
- Le HOUÉROU, H.N., 1989. The grazing Land Ecosystems of the African Sahel. *Ecological Studies* n° 75, Heidelberg, Springer-Verlag, Berlin.
- Le HOUÉROU, H.N., BINGHAM, R. E. & SKERBEK W., 1988. Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitations in world arid lands. *Journal of Arid Environments*, 15: 1-18.
- Le HOUÉROU, H.N., 1987. Aspects météorologiques de la croissance et du développement végétal dans les déserts et les zones menacées de désertification. Rapport WMO/TD-N°194. Organisation Météorologique Mondiale, Genève, 59p.
- Le HOUÉROU, H.N., 1984. Rain-Use efficiency : a unifying concept in arid land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7: 1-35.
- Le HOUÉROU, H.N. & POPOV, G.F., 1981. An eco-climatic classification of intertropical Africa. Plant Production and Protection Paper n° 31. FAO, Rome.
- Le HOUÉROU, H.N., 1980. The Rangelands of the Sahel, *Journal of Range Management*, 33: 41-6.
- Le HOUÉROU, H.N. & HOSTE, C.H., 1977. Rangeland production and annual rainfall relations in the Mediterranean basin and the African Sahelian and Sudanian zones. *Journal of Range Management*, 30: 181-9.
- Le HOUÉROU, H.N., 1968. La désertification du Sahara septentrional et des steppes limitrophes. *Annales algériennes de géographie*, 6: 2-27.
- LEPERS, E., LAMBIN, E.F., JANETOS, A.C., DEFRIES, R., ACHARD, F., RAMANKUTTY, N., & SCHOLE, R.J., 2005. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981-2000. *BioScience*, 55: 115-124.
- L'HOTE, T., MAHE, G., SOME, B., H.N. & TRIBOULET, J.P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47: 563-572.
- LINDQVIST, S., & TENGBERG, A., 1994. New evidence of desertification from case studies in Northern Burkina Faso. *Desertification Control Bulletin*, 25: 54-60.
- LOEHLE, G., 1989. Catastrophe theory in ecology: a critical review and an example of the butterfly catastrophe. *Ecological Modelling*, 49: 125-52
- MABBUTT, J.A., 1986. Desertification indicators, *Climatic Change*, 9: 113- 122.

- MACE, G.M., 1995. Classification of threatened species and its role in conservation planning. In "Extinction Rates", Lawton, J.H. & May, R.M. Eds., Oxford University Press, Oxford UK, 197-213.
- MAHALANOBIS, P.C., 1936. On the generalized distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Science of India*, 12: 49-55.
- MAINGUET, M., 1991. Desertification : Natural background and human mismanagement. Springer-Verlag, Berlin, 306p.
- MAINGUET, M., DUMAY, F., OULD EL HACEN, M.L. & MAEFOUDH, A., 2001. «Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne: période d'amorce de la desertification en Mauritanie saharo-sahélienne », *Télédétection*, 2: 129-136.
- MALINGREAU, J.P., TUCKER, C.J. & LAPORTE, N., 1989. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *International Journal of Remote Sensing*, vol.10, (4-5): 855-867.
- MALO, A.R. & NICHOLSON, S.E., 1990. A study of the rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using the Normalized Difference Vegetation Index. *Journal of Arid Environments*, 19: 1-24.
- MAMA, T., DIA, B.K., OUÉDRAOGO, J. & ZEUFACK, A., 2002. Ajustement structurel et investissement privé en Afrique : Cas du Burkina Faso, du Cameroun et de la Côte d'Ivoire. Projet AUPELF – UREF/SISERA, 82p.
- MANIÈRE, R., BASSISTY, E., CELLES, J.C., and MELZI, S., 1993. Utilisation de la télédétection spatiale (données XS de Spot) pour la cartographie de l'occupation du sol en zones arides méditerranéennes : Exemple d'Ain Oussera (Algérie), *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, (1): 67-80.
- MAXWELL, E., 1983. Remote monitoring of rangeland production, *Agricultural Water Management*, 7: 323-340.
- MAZZUCATO, V., & NIEMEIJER, D., 2000. The cultural economy of soil and water conservation: market principles and social networks in Eastern Burkina Faso. *Development and Change*, 31: 831-855.
- MEHU, 2002. Stratégie Nationale et Plan d'Action pour la Conservation de la Diversité Biologique au Bénin, 144p.
- MEYGRET, A., 2004. Spot absolute calibration : synthesis. CNES documentation – S5-NT-0-2880-CN, 29p.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005. Ecosystems and human well-being: Desertification Synthesis. Washington, DC, États-Unis, World Resources Institute.
- MILLEVILLE, P. & SERPANTIE, G., 1994. Intensification et durabilité des systèmes agricoles en Afrique soudanosahélienne. In «Actes du séminaire sur la promotion de systèmes agricoles durables dans les pays de l'Afrique soudano-sahélienne », FAO/CIRAD, 10-14 janvier 1994, Dakar, Sénégal, 33-45.
- MILLY, P.C.D., DUNNE, K.A., & VECCHIA, A.V., 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438: 347-350.
- MILICH, L., & WEISS, E., 2000a. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 235-260.
- MILICH, L., & WEISS, E., 2000b. GAC NDVI images: relationship to rainfall and potential evaporation in the grazing lands of the Gourma (northern Sahel) and in the croplands of the Niger-Nigeria border (southern Sahel). *International Journal of Remote Sensing*, 21: 261-280.

- MOREL, R., 1992. Atlas agroclimatique des pays de la zone du CILSS. Niamey : Centre Agro-hydro météorologique AGRHYMET du Comité Inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS), 11 volumes.
- MORTIMORE, M. & TURNER, B., 2005. Does the Sahelian smallholder's management of woodland, farm trees, rangeland support the hypothesis of human-induced desertification? *Journal of Arid Environments*, 63: 567–595.
- MORTIMORE, M., TIFFEN, M., BOUBACAR, Y., & NELSON, J., 2001. Synthesis of long-term change in Maradi Department, Niger, 1960-2000. Somerset, Royaume-Uni, *Drylands Research*, Working Paper 39, 52p.
- MOUAT, D., LANCASTER, J., WADE, T., WICKHAM, J., FOX, C., KEPNER, W. & BALL, T., 1997. Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model. *Environment Monitoring and Assessment*, 48: 139-156.
- MOUGENOT, B., BÉGUÉ, A., CHEHBOUNI, G., ESCADAFAL, R., HEILMAN, P., QI, J., ROYER, A. & WATTS, C., 2000. Applications of VEGETATION data to resource management in arid and semi-arid rangelands. In *Proceedings of the workshop "VEGETATION-2000", Two Years of operation to prepare the future*, ISPRA Vegetation Programme-IUC, Belgirate, Italy, Ed. by Gilbert Saint, Vegetation Programme-IUC, 389-395.
- MUCHONEY, D.M. & HAACK, B.N., 1994. Change detection for monitoring forest defoliation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, (10): 1243-1251.
- N'DJAJA-OUAGA, H. & COUREL, M.F., 2000. Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitale pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux: cas de la sous-préfecture de Mandéla dans le département de Hadjer Lamis au Tchad. In «*La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives*», Dubois, J.M.M., Caloz, R. et Gagnon, P. (eds.), AUPELF-UREF, 177-185.
- NEIMANIS, V. & KERR, A., 1996. Developing national environmental indicators. In *"Geoindicators: Assessing rapid environmental change in earth systems"*, Berger, A.R. & Iams, W.J. (eds.), Balkema, Rotterdam, 369-376.
- NIANG, A.J., OZER, A. & OZER, P., 2008. Fifty years of landscape evolution in Southwestern Mauritania by means of aerial photos. *Journal of Arid Environments*, 72: 97–107.
- NICHOLSON, S.E., 1998. Interannual and interdecadal variability of rainfall over the African continent during the last two centuries. *IAHS Publication*, 252: 107-116.
- NICHOLSON, S.E., TUCKER, C.J. & BA, M.B., 1998. Desertification, drought, and surface vegetation: an exemple from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 815-829.
- NICHOLSON, S.E., DAVENPORT, M.L. & MALO, A.R., 1990. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, 17: 209-241.
- NICHOLSON, S.E., 1985, Sub-Saharan rainfall 1981-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24: 1388-1391.
- NIEMEIJER, D., & MAZZUCATO, V., 2002, Soil degradation in the West African Sahel. How serious is it? *Environment*, 44: 20-31.
- O'CONNOR, T.G., HAINES, L.M. & SNYMAN, H.A., 2001. Influence of precipitation and species composition on phytomass of a semi-arid African grassland. *Journal of Ecology*, 89: 850–860.
- OGOUEDJJI G., MAMA V., GLELE R., HOUNTONDI F., ARIORI S., & KPENAVOUN S., 2007. Etude sur les besoins en bois-énergie des grands centres de consommation au profit du Projet de Gestion des Forêts et Terroirs Riverains (PGFTR). Rapport d'étude, 194p.



- OLDEMAN, L.R., HAKKELING, R.T.A. & SOMBROEK, W.G., 1991. World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation: An Explanatory Note. Second revised edition. ISRIC, Wageningen and UNEP, Nairobi, 27p.
- OLSSON, L., EKLUNDH, L. & ARDO J., 2005. A recent greening of the Sahel – trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63: 556–566.
- ONIBON, P., 1999. Définition d'une politique et d'un programme d'actions pour la gestion de la transhumance « durable », dans le cadre de la lutte contre la désertification au Bénin. Mission, MEHU, Cotonou, Bénin, 65p
- ORTHMANN, B. 2005. Vegetation ecology of woodland-savanna mosaic in central Benin (West Africa): Ecosystem analysis with a focus on impact of selective logging. Thesis, University of Rostock, 139p.
- OZER, A. & OZER, P., 2008. Désertification au Sahel : Crise climatique ou anthropique ? *Bulletin des Séances de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer. in press*
- OZER, P., GASSANI, J., HOUNTONDI, Y.C., NIANG, A.J. & AMBOUTA, K., 2007. La désertification est-elle en recul au Sahel? *Bois et Forêts des Tropiques*, N° 293 (3).
- OZER, A. & OZER, P., 2005. Désertification au Sahel: crise climatique ou anthropique? *Bulletin des Séances de l'Académie royale des sciences d'Outre-Mer*, 51: 395-423.
- OZER, P., 2004. Bois de feu et déboisement au Sahel: mise au point. *Sécheresse*, 15: 243-251.
- OZER, P., ERPICUM, M., DEMAREE, G. & VANDIEPENBEECK, M., 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48: 489-492.
- OZER, P., 2002. Les lithométéores au Niger: Mise au point. *Würzburger Geographische Arbeiten*, 97: 7-32.
- OZER, P., 2000. Les lithométéores en région sahélienne: un indicateur climatique de la désertification. *GEO-ECO-TROP*, N°24, 317 p.
- PAGNEY, P. 1994. Les climats de la terre. 2è édition mise à jour. Masson, Paris, 163 p.
- PALM, C.A., MYERS, R.J.K. & NANDWA, S.M., 1997. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In *“Replenishing Soil Fertility in Africa”*, Soil Science Society of America, R.J. Buresh, P.A. Sanchez, & F. Calhoun, (eds.), Special Publication No. 51, Madison, Wisconsin, USA.
- PAN/LCD, 2000: Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification. Ministère de l'Environnement de l'Habitat et de l'Urbanisme, Direction de l'Aménagement du Territoire, 91p.
- PARE, L. & TALLET, B., 1999. D'un espace ouvert à un espace saturé : Dynamique foncière et démographique dans le département de Kouka (Burkina Faso). *Espace, Populations, Sociétés*, 37: 83-92.
- PEARCE, F., 2002. Africans go back to the land as plants reclaim the desert. *New Scientist*, 175: 4-5.
- PENNING DE-VRIES, F.W.T. & DJITEYE, M.A., 1982. La productivité des pâturages sahéliens. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen (The Netherlands), 525p.
- PIERI, C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Coopération et du développement, CIRAD, Paris, 444p.
- PNUE / CCD, 1995. Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique, 71p.
- POMEL, S., POMEL-RIGAUD, F. & SCHULZ, E., 1994. Indicateurs anthropogènes de la végétation et des sols de quelques savanes de l'Afrique de l'Ouest. In : Pomel S., Salomon J.N.,

- Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale. Bordeaux, P.U.B., 173-200.
- PONTIUS, R.G., 2000. Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66, (8): 1011–1016.
- POUGET, M., MADEIRA, J., LE FLOCH, E., & KAMAL, S., 1991. Caractéristiques spectrales des surfaces sableuses de la région côtière nord-ouest de l'Égypte : applications aux données satellitaires Spot. In « *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales* », Journées de Télédétection, 12.10.1990, Bondy, France., ORSTOM, Paris (France), 27-39.
- PRETTY, J.N., 2000. Can sustainable agriculture feed Africa? *Environment Development and Sustainability*, 1: 253-274.
- PRINCE, S.D., 2002, Spatial and temporal scales for detection of desertification. In *Global desertification: Do humans cause deserts?*, J.F. Reynolds and D.M. Stafford Smith Eds, Dalhem University Press, 23-40.
- PRINCE, S.D., BROWN DE COLSTOUN, E., & KRAVITZ, L.L., 1998. Increased rain-use efficiencies indicate no extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 4: 359-374.
- PRINCE, S.D. & GOWARD, S.N., 1996. Evaluation of the NOAA/NASA Pathfinder AVHRR Land Data Set for global primary production modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 217–221.
- PRINCE, S.D. & GOWARD, S.N., 1995. Global primary production : a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22: 815-835.
- PRINCE, S.D., 1991. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1301-1311.
- PRINCE, S.D. & JUSTICE, C.O., 1991. Coarse resolution remote sensing in the Sahelian environment. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1133-1421.
- QUATTROCHI, D.A. & GOODCHILD, M.F., 1997. Scale in Remote Sensing and GIS. Lewis Publishers, 406p.
- QUEZEL, P., 1965. La végétation au Sahara. Du Tchad à la Mauritanie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 333p.
- RAPP, A., 1974. A review of desertization in Africa: Water, vegetation and man, Secretariat for International Ecology, Sweden (SIES), Report N°1, 77p.
- RASMUSSEN, K., FOG, B. & MADSEN, J.E., 2001. Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 11: 271-282.
- RASMUSSEN, M.S., 1998. Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information: Part I. Assessment of net primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 97-117.
- RICHARDSON, A.J. & EVERITT, J.H., 1992. Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity, *Geocarto International*, vol.1: 63-69.
- RIETKERK, M., KETNER, P., STROOSNIJDER, L., & PRINS, H.H.T., 1996. Sahelian rangeland development; a catastrophe? *Journal of Range Management*, 49: 512-9.
- ROHDE, R. & SULLIVAN, S., 2002. On non-equilibrium in arid and semiarid grazing systems. *Journal of Biogeography*, 29: 1595–1618.
- ROSEMA, A. & ROOZEKRANS, H., 1996. Practical approaches to desertification monitoring using meteorological satellite data. In J. Hill and D. Peter (eds) *The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin : state of the art and*

- future research. Environment and Climate Program, report EUR 16732. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 95-112.
- ROSSI, G., 1999. Forêts tropicales entre mythes et réalités. *Natures, Sciences, Sociétés*, vol. 7, (3): 22-37.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. & HARLAN, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md., 371p.
- ROUSSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *In ERTS symposium*, NASA, SP-351, Washington DC, vol. 1, 309-317.
- ROY, S.S. & BALLING, R.C., 2004. Trends in extreme daily precipitation indices in India. *International Journal of Climatology*, 24: 457-466.
- ROZANOV, B.G., 1982. Assessing, monitoring and combating desertification. *In Desertification and Soils Policy*, Transactions of the 12th Congress of Soil Science, Symposia paper III, New Delhi (India), 56-66.
- RYERSON, D.E., & PARMENTER, R.R., 2001. Vegetation change following removal of keystone herbivores from desert grasslands in New Mexico. *Journal of Vegetation Science*, 12: 167-180.
- SCHLESINGER, W.H., REYNOLDS, J.F., CUNNINGHAM, G.L., HUENNEKE, L.F., JARRELL, W.M., VIRGINIA, R.A. & WHITFORD, W.G., 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247:1043-1048.
- SCOONES, I., 1994. New Directions in Pastoral Development in Africa. *In Living with Uncertainty: New directions in pastoral development in Africa*. Intermediate Technology Publications, Ian Scoones (Ed.), London (UK), 1-36.
- SENE, S. & OZER, P., 2002. Evolution pluviométrique et relation inondations – événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42 : 27-33.
- SINGH, A. 1989. Review article: Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, (6): 989-1003.
- SIVAKUMAR, M., KONATE, M, & VIRMANI, S., 1984. Agroclimatology of West Africa : Mali. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Information Bulletin no. 9. Patancheru (India).
- SOKPON, N., BIAOU, S.H., OUINSAVI, C. & HUNYET, O., 2006. Bases techniques pour une gestion durables des forêts claires du Nord-Bénin : Rotation, diamètres minimal d'exploitabilité et régénération. *Bois et Forêts des tropiques*, N°287 (1).
- SOKPON, N., BIAOU, S. H. & OUINSAVI, C., 2004. Contribution à la création de base de données techniques sur l'aménagement participatif durable des forêts classées de Ouénou – Bénou (Bembèrèkè) et de Ouémé-Boukou (Savè) au Bénin : Inventaire floristique et forestier, Rapport final PGFTR, 91p.
- SONG, C., WOODCOCK, C.E., SETO, K.C., LENNEY, M.P. & MACOMBER, S.A., 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing and Environnement*, 75: 230-244.
- STEBBING, E.P., 1935. The encroaching Sahara : the threat of the West African Colonies. *The Geographical Journal*, 85: 506-524.
- STEVEN, M.D., MALTHUS, T.J., BARET, F., XU, H., & CHOPPING, M.J., 2003. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sensing of Environment*, 88: 412-422.
- SULTAN, B & JANICOT, S., 2000. Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophys Res Lett*, 2 : 3353-3356.

- SYMEONAKIS, E. & DRAKE, N., 2004. Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 573-592.
- TANAKA, S., SUGIMURA, T., HARADA, T. & TANAKA, M., 1994, 'Pinatubo volcanic dust diffusion into the stratosphere seen from space', *Advances in Space Research*, 14 (3): 245–254.
- TARHULE, A., 2005. Damaging rainfall and flooding: The other sahel hazards. *Climatic Change*, 72, (3): 355-377.
- TAUPIN, J.D., AMANI, A. & LEBEL, T., 1998. Variabilité spatiale des pluies au Sahel : une question d'échelles – 1. Approche expérimentale. In : *Water resources variability in Africa during the XXth century*, Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. & Hulme M. eds., IAHS Publication N° 252 : 143-151.
- TCHIWANOU, M., 2001: Etude Prospective du Secteur Forestier en Afrique (FOSA) - République Du Benin. FAO/EC Point Focal, 32p.
- TCHOUTO, M.P., 2004. Plant diversity in a Central African rain forest: Implications for biodiversity conservation in Cameroon. PhD thesis, Wageningen University, The Netherlands, 208p.
- TEILLET, P.M., STAENZ, K. & WILLIAMS, D.J., 1997. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. *Remote Sensing of Environment*, 61: 139–149.
- THOMAS, D.S., 1993. Sandstorm in a teacup? Understanding desertification. *The Geographical Journal*, 159: 318-331.
- THOMAS, D.S., & MIDDLETON, N.J., 1994. Desertification, exploding the myth, Wiley, Chichester (Eds.), 194p.
- TON, P. & WANKPO, E., 2004. La production du coton au Bénin : Résumé, Préparation de politique, commercialisation et agriculture, *AgriStudies* N° 12.4.04 2795, Ed. Agriterra , Amsterdam, Pays-Bas, 28p.
- TOTTRUP, C. & RASMUSSEN, M.S., 2004. Mapping long-term changes in savannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103 : 545-560.
- TOULMIN, C., 1993. Lutter contre la désertification: Réflexion préliminaire à une convention mondiale. Drylands Programme, *IIED*, dossier N°42, 52p.
- TREES, 1998. Vegetation map of South America at 1/5000000. *TREES publications*, Series D2, Luxembourg, European Commission.
- TREKPO, M.P., 1999- Contribution à l'étude des possibilités d'aménagement durable de la forêt classée de Ouénou-Bénou au nord-est du Bénin. Mémoire d'Ingénieur des Travaux, CPU/UAC, Bénin, 144p.
- TRICART, J., 1954. Influence des sols salés sur la déflation éolienne en basse Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 5: 124-132.
- TUCKER, C.J. & NICHOLSON, S.E., 1999. Variations in size of the Sahara Desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 28: 587-591.
- TUCKER, C.J., NEWCOMB, W.W. & DEGNE, H.C., 1994. AVHRR data sets for determination of the desert spatial extent. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 3547-3566.
- TUCKER, C., DEGNE, H. & NEWCOMB, W., 1991. Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. *Science*, 253: 299-301.
- TUCKER, C.J., VANPRAET, C.L., SHARMAN, M.J. & ITTERSTUM, G.V., 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, 17: 233-249.

- TUCKER, C.J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
- ULBRICHT, K.A. & HECKENFORD, W.D., 1998. Satellite images for recognition of landscape and landuse changes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53: 235-243.
- UNITED NATIONS (UN), 1997. World Population Prospects 1950-2050 (The 1996 Revision). United Nations, New York, United States.
- UNITED NATIONS (UN), 1994, United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. Available online at: <http://www.unccd.int/convention/text/pdf/conv-eng.pdf> (last accessed 02/02/2005)
- UNITED NATIONS (UN), 1978. Desertification: Its causes and consequences. Pergamon Press, 448p.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP), 2004, *Human development report 2004*, UNDP, New York.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP), 2003. *Human development report 2003. Millenium development goals: a compact among nations to end human poverty*. Oxford University Press, United Nations Development Programme.
- UNPP, 2006. World Population Prospects : The 2004 Revision and World Urbanization Prospects : The 2003 Revision, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, <http://esa.un.org/unpp>.
- VALENTIN, C., & D'HERBES, J.M., 1999. Niger tiger bush as a natural harvesting system. *Catena*, 37: 231-256.
- VANDEN BERGHEN, C., 1999. *Gomphrena celosioides (Amaranthaceae)* au Senegal. *Systematics and Geography of Plants*, 69, (1): 136-137.
- VAN LEEUWEN, W.J.D., HUETE, A.R. & LAING, T.W., 1999. MODIS vegetation index compositing approach: a prototype with AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 69: 264-280.
- VAN ROMPAEY, R.S., 1993. Forest gradients in West Africa: a spatial gradient analysis. Thesis, Wageningen Agricultural University, the Netherlands, 142p.
- VAN ROMPAEY, R.S. & OLDEMAN, R.A., 1997. Analyse spatiale du gradient floristique arborescent dans les forêts de plaine du SE Liberia and SW Côte d'Ivoire. In: *Phytogéographie tropicale. Réalités et perspectives*, Guillaumet J.L., Belin M. & Puig H. (eds), ORSTOM, Paris, 353-364.
- VELDKAMP, A. & FRESCO, L., 1996. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modelling*, 91: 231-248.
- VERBURG, P.H., De KONING, G.H., KOK, K., VELDKAMP, A. & BOUMA, J., 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of landuse change based upon actual landuse, *Ecological modelling*, 116: 45-61.
- VERSTRAETE, M.M., 1986. Defining desertification: A review. *Climatic Change*, 9: 5-18.
- VETAAS, O., 1993. Spatial and temporal vegetation changes along moisture gradient in northeastern Sudan. *Biotropica*, 25: 164-75.
- VETTER, S., 2005. Rangelands at equilibrium and non-equilibrium: recent developments in the debate. *Journal of Arid Environments*, 62: 321-341.
- VIOLLIER, M., BELSHER, T. & LOUBERSAC, L., 1985. Signatures spectrales des objets du littoral. Proceedings IIIème Colloque Signatures Spectrales d'objets en Télédétection, Les Arcs, France, 16-20 décembre 1985. ESA SP 247 (Noordwijk: ESA, ESTEC): 253-256.
- WALKER, S. & WILSON, J.B., 2002. Tests for nonequilibrium, instability, and stabilizing processes in semiarid plant communities. *Ecology*, 83: 809-822.

- WANG, G., ELTAHIR, E. & FOLEY, J., 2004. Decadal variability of rainfall in the Sahel: results from the coupled GENESISIBIS atmosphere-biosphere model. *Climate Dynamics*, 22 : 625–637.
- WARREN, A. & KHOGALI, M., 1992. Evaluation de la désertification et de la sécheresse dans la région soudano-sahélienne (1985-1991), BNUS / PNUD, New York, 102p.
- WARREN, A. & AGNEW, C., 1988. Une analyse de la désertification et dégradation des terres en zones arides et semi-arides, Drylands Programme, IIED, Document N°2, 28p.
- WEISMILLER, R.A., KRISTOF, S.J., SCHOLZ, D.K., ANUTA, P.E. & MOMIN, S.A., 1977. Change detection in coastal technique zone environments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 43, (12): 1533-1539.
- WESTOBY, M., WALKER, B. & NOY-MEIR, I., 1989. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium, *Journal of Range Management*, 42: 266-274.
- WEZEL, A., 2004. Local knowledge of vegetation changes in Sahelian Africa – implications for local resource management. In “The Sahel”, Lykke A. M., Due M. K., Kristensen M., Nielsen I. (Eds.), Institute of Geography, Serein, Copenhagen, Denmark, Occasional Paper 17, 37-52.
- WICKENS, G.E., 1997. Has the Sahel a future? *Journal of Arid Environments*, 37: 649-663.
- WICKENS, GE., 1976. The flora of Jebel Marra (Sudan Republic) and its geographical affinities. Kew Bulletin Additional Series V, London, 368p.
- WIENS, J.A., 1984. On understanding a nonequilibrium world: myth and reality in community patterns and processes. In: Strong, D.R., Simberloff, D., Abele, L., Thistle, A.B. (Eds.), *Ecological Communities: Conceptual Issues and the Evidence*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 439–458.
- WHITE, F., 1983. The vegetation map of Africa: a descriptive memoir to accompany the UNESCO/AETFAT/UNSO vegetation map of Africa, UNESCO-ORSTOM Eds., Paris, 356p.
- WORLD BANK, 2003. World development report 2003: Sustainable development in a dynamic world: transforming institutions, growth, and quality of life, Oxford University Press, New Delhi.
- WORLD BANK, 2002. World development report 2003: Sustainable development in a dynamic world: transforming institutions, growth, and quality of life, Oxford University Press, World Bank. 272p.
- WYLIE, B.K., HARRINGTON, J.A., PRINCE, S.D. & DENDA, I., 1991. Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger: 1986-1988, *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1281-1300.
- XUE, Y. & SHUKLA, J., 1993. The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: desertification. *Journal of Climate*, 6 : 2232–2244.
- ZOUNDI, S.J., 2006. Pourquoi les crises alimentaires persistent-elles dans le Sahel ? Une analyse de la situation actuelle, du rôle des politiques et Recommandations pour le changement. Action Aid International, Accra, Ghana, 52p.

## **LISTE DES PUBLICATIONS RELATIVES A LA THESE**

### REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

1. **HOUNTONDI, Y.C.** & OZER, P., 2008. Trends in extreme rainfall events in West Africa: a case study in Benin (1960-2000). *Hydrological Sciences Journal*, (Submitted).
2. OZER, P., GASSANI, J., **HOUNTONDI, Y.C.**, NIANG, A.J., & AMBOUTA, K., 2007. La désertification est-elle en recul au Sahel? *Bois Et Forêts Des Tropiques*, N° 293 (3).
3. **HOUNTONDI, Y.C.**, SOKPON, N., & OZER, P., 2006. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982–1999) for the monitoring of desertification, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, 5: 871–884.
4. **HOUNTONDI, Y.C.**, NICOLAS, J., SOKPON, N., & OZER, P., 2005 : Mise en évidence de la résilience de la végétation sahélienne par télédétection basse résolution au Niger à la suite d'épisodes de sécheresse. *Belgeo. Revue Belge De Géographie* N° 4, 499-516.
5. **HOUNTONDI, Y.C.**, OZER, P., & NICOLAS J., 2004. Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Revue Européenne de Géographie, Cybergeog*, N° 291, 18p.

### PARTIE DE LIVRES

6. **HOUNTONDI Y.C.**, SOKPON, N., NICOLAS, J., & OZER P., 2008. Ongoing desertification processes in the sahelian belt of West Africa: an evidence from the rain-use efficiencies, “*Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation and Assessment*”, **Taylor & Francis Group** (in press).
7. **HOUNTONDI Y.C.**, OZER, P., & TYCHON, B., 2003. « Etude des modifications environnementales à partir des données pluviométriques et NDVI de NOAA-AVHRR en Afrique de l'Ouest ». In « *Les Journées des Géographes Belges* », Tome 1: *Evaluer la capacité du milieu*, SCHMITZ S. & MEERT H. (eds.), Editions BEVAS/SOBEG: 19-24. ISBN: 2-9519693-0-9.

### PROCEEDINGS

8. **HOUNTONDI Y.C.**, SOKPON, N., & OZER, P., 2006. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in the Sahel (1982-1999) for the monitoring of desertification. in: *Proceedings of the 1st International Conference on Remote Sensing and Geoinformation Processing in the Assessment and Monitoring of Land Degradation and Desertification*. **RODER A. & HILL J. (eds.)**, Remote Sensing Department, University of Trier, Germany, 167-174.

## **CURRICULUM VITAE**



Yvon-Carmen H. HOUNTONDJI est né le 11 août 1973 à Cotonou (République du Bénin). Il a suivi ses études primaires et secondaires respectivement à Cotonou puis à Abomey-Calavi où il obtint en 1994 un Baccalauréat en Sciences (Biologie et Sciences Physiques). La même année, il réussissait au concours national d'entrée au Collège Polytechnique Universitaire de l'Université Nationale du Bénin, où il a suivi sa formation d'Ingénieur des Travaux d'Aménagement et Protection de l'Environnement (1994-1998). En Décembre 1998, il fut engagé en tant qu'assistant de recherche à l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), où il exerça durant trois années les fonctions de Chef des travaux du Programme de Restauration des Parcs à karité (1998-2001). Il bénéficia ensuite d'une bourse belge de la Coopération Universitaire au Développement (CUD) ce qui lui permis de réaliser un Diplôme d'Etudes Spécialisées en Gestion des Risques Naturels (2001-2002), cours international organisé par l'Université de Liège, la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux et la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (actuel Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège). En 2003, il a été lauréat du Programme Actions-Nord de la CUD (Belgique), ce qui lui a valu une bourse d'excellence pour entreprendre à l'Université de Liège, une thèse de Doctorat en Sciences. Son parcours professionnel à l'INRAB, lui a permis d'accumuler de nombreuses expériences dans les travaux de recherche en station et en milieu réel. Il a également développé des aptitudes personnelles en consultance et expertise privée dans l'évaluation de projets de développement à caractère environnemental au Bénin. Depuis 2005, Mr Y.C. HOUNTONDJI assure les fonctions de Chercheur à la Faculté d'Agronomie de l'Université de Parakou au Bénin.

### **Contact:**

E-mail: [yvon.hountondji@gmail.com](mailto:yvon.hountondji@gmail.com)



