

Table des matières

Introduction	5
I. Contexte et justification du projet	5
II. Objectifs du projet	6
III. Intérêt du projet et contraintes de réalisation	6
Partie1 : Etat des connaissances sur l'évaluation du couvert végétal	9
Partie2 : Données et Méthodes	12
I. Gestion de projet	12
II. Données	12
2.1. Zone d'étude et choix des sites	12
2.2. Données climatologiques	13
2.3. Données de Terrain	13
2.4. Données de télédétection	14
2.4.1. Images satellites disponibles.....	14
2.4.2. Données cartographiques :	14
2.4.3. Images Google Earth©	15
III. Méthodes	15
3.1. Traitements d'images	15
3.2. Interpretation des images	15
3.3. Création des cartes par la classification supervisée	16
3.4. Calcul des indices de végétation	17
3.5. Classification par seuillage des indices	18
3.6. Evaluation du taux de couvert forestier par la méthode basée sur la grille des points	19
3.7. Caractérisation de la structure spatiale des différentes zones	20
Partie 3 : Résultats	21
I. Analyse de la pertinence des indices de végétation	21
1.1 Evolution des superficies d'états de surface des sites entre 1992 et 2014	22
1.1.1 Site de Bitinkodji	22
1.1.2 Site de Tientiergou	24
1.1.3 Site de Banizoumbou	26
1.2 Analyse des résultats de la méthode de grille de points	29
1.2.1 Evolution du taux de couverture végétale du site de Bitinkodji de 2001 à 2014	29
1.2.2 Evolution du taux de couverture végétale du site de Tientiergou de 2001 à 2014	30
1.2.3 Evolution du taux de couverture végétale du site de Banizoumbou de 2001 à 2014	31
1.3 Analyse comparative des taux de couverture végétale.....	32
Partie4: Discussion	34
Conclusion et Perspectives	36
Références	37
ANNEXES	42

TABLE DES ILLUSTRATIONS

- **Table des tableaux**

Tableau 1 : Planning du projet.....12
Tableau 2 : Evolution brute du nombre de pixels par classe d'occupation des sols de 1992 à 2014.....22
Tableau 3 : Evolution d'états de surface du site de Bitinkodji de 1992 à 2001.....23
Tableau 4 : Evolution des Unités d'occupation du sol du site de Bitinkodji 2001 à 2014..... 23
Tableau 5 : Evolution brute du nombre de pixels par classe d'occupation des sols de 1992 à 2014.....24
Tableau 6 : Évolution d'états de surface du site de Tientiergou de 1992 à 2001.....25
Tableau 7 : Evolution d'états de surface du site de Tientiergou de 2001 à 2014.....25
Tableau 8 : Evolution brut du nombre de pixels par classe d'occupation des sols de 1992 à 2014.....27
Tableau 9 : Evolution d'états de surface du site de Banizoumbou de 1992 à 2001..... 27
Tableau 10 : Evolution d'états de surface du site de Banizoumbou de 2001 à 2014.....28
Tableau 11 : Evolution du taux de couverture végétale de Bitinkodji de 2001 à 2014..... 29
Tableau 12 : Evolution du taux de couverture végétale de Tientiergou de 2001 à 201430
Tableau 13 : Evolution du taux de couverture végétale de Banizoumbou de 2001 à 2014.....31

- **Table des figures**

Figure 1 : Localisation du Projet FONABES.....5
Figure 2 : Localisation du bassin d'approvisionnement du bois de Niamey..... 6
Figure 3 : Influence de la taille du pixel sur la perception aérienne d'une bande isolée7
Figure 4 : Influence de la taille de pixel sur la perception aérienne d'une structure de brousse tigrée8
Figure 5 : Localisation du bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Niamey et points vérité terrain inventaire (FONABES, 2015)13
Figure 6 : Chaîne de traitement des images.....15
Figure 7 : La brousse tigrée (extrait image Landsat, 18setembre1992).....16
Figure 8 : Représentation des différentes étapes de la classification SVM.....17
Figure 9 : Droite des sols en zone de brousse.....18
Figure 10 : Droite des sols en zone agricole.....18
Figure 11 : Processus de détermination du taux de couverture végétal.....19
Figure 12 : Etapes de création de cartes de changements.....20
Figure 13 : Profils statistiques des indices de végétation (NDVI, PVI et TSAVI).....21
Figure 14 : Changements d'états de surface du site de Bitinkodji entre 1992 et 2014.....22
Figure 15 : Cartes montrant l'évolution de l'occupation du site de Bitinkodji.....24
Figure 16 : Changements d'états de surface du site de Tientiergou entre 1992 et 2014.....25
Figure 17 : Cartes montrant l'évolution d'états de surface du site de Tientiergou de 1992 à 2014.....26
Figure 18 : Changements d'états de surface du site de Banizoumbou entre 1992 et 2014.....27
Figure 19 : Cartes montrant l'évolution d'états de surface du site de Tientiergou de 1992 à 2014.....28
Figure 20 : Evolution du couvert végétal au niveau de Bitinkodji de 2001 à 2014.....29
Figure 21 : Evolution du couvert végétal au niveau de Tientiergou de 2001 à 2014.....30
Figure 22 : Evolution du couvert végétal au niveau de Tientiergou de 2001 à 2014.....31
Figure 23 : Tendence de la production de biomasse de 2000 à 2010 (Leroux et al. 2015, in prep.....32

LETTRE DE MISSION

Commanditaires : Régis PELTIER Laurent GAZULL	Directeur du projet : Pierre MONTAGNE	Tuteur SILAT : Jean Pierre CHERY	Rapporteurs : Pierre BAZILE Eric BARBE
--	---	--	---

Contexte du projet

Depuis 1990, le CIRAD travaille en collaboration avec le Ministère nigérien en charge de l'environnement sur l'élaboration des Schémas Directeurs d'Approvisionnement (SDA) en bois – énergie des grands centres urbains notamment la ville de Niamey. Dans cette perspective, les changements dans l'environnement biophysique des différents bassins d'approvisionnement ont été peu étudiés. Il est impérieux de pouvoir évaluer leur ampleur en vue d'y apporter des réponses appropriées. La télédétection et les systèmes d'information géographiques (SIG) sont des outils adéquats pour appréhender ces différents changements, en particulier l'évolution de la couverture végétale.

Intitulé du projet

Titre : Evolution comparée du couvert végétal en zone de brousse et en zone agricole de 1992 à 2014 dans le bassin d'approvisionnement en bois - énergie de Niamey

Sous-titre : Apport de la télédétection

Travail demandé:

1. Cartographies des zone de brousse et des zones agricoles par photo-interprétation et par traitement d'images satellites sur 3 dates (1992, 2001, 2014).
2. Détection des changements :
 - caractérisation de l'évolution du taux de couverture végétale par l'analyse croisée NDVI-occupation des sols ;
 - analyse et compréhension des tendances observées.
3. Renseignement de bases de données et d'un Système d'Information du SDA.

Livrables :

- Rapport sur la caractérisation des images satellitaires mobilisées ;
- Notice de cadre théorique et méthodologique détaillée sur la cartographie du taux de couverture végétale :
 - Démarche d'extraction d'information (classification)
 - Conduite de la mission vérité terrain
- Rapport de mission vérité terrain
- Mise au point des cartes de taux de couverture végétale
- Rapport final de l'étude.

Clause de confidentialité : Aucune clause restrictive

Signature auditeur

Signature Commanditaire

Introduction

I. Contexte et justification du projet

Dans toute la zone sahélienne, l'augmentation rapide de la population et l'urbanisation galopante, ont fait augmenter de manière exponentielle les besoins en énergie domestique. Or celle-ci est restée majoritairement constituée de bois-énergie (bois ou charbon de bois). Dès les années 1990, les projets de Stratégie Energie-Domestique (SED) et les Schémas Directeurs d'Approvisionnement en bois-énergie (SDA) des grandes villes sahéliennes ont été financés, en particulier par la Banque Mondiale (BM). Ils ont débouché sur des politiques d'économie de bois et de substitution d'énergie ainsi que sur le développement de la gestion communautaire durable des formations forestières (SDA Maradi et Zinder, 2014).

Parallèlement, des politiques de régénération des parcs agroforestiers traditionnels (Faidherbia, etc.) ont été mises en place avec succès au Niger. En 2013, un projet financé par la Banque Mondiale a également fait des études SDA et SED pour les villes de Zinder et de Maradi, au Niger. Celles-ci montrent, entre autre, que seules les forêts aménagées ont gardé une surface, une biomasse et une productivité acceptable, les autres s'étant fortement dégradées ou ayant été défrichées (SDA Maradi et Zinder, 2014).

Ainsi, une part importante des prélèvements du bois-énergie s'est de plus en plus déplacée des zones forestières vers les zones agro-forestières (SDA Maradi et Zinder, 2014).

En effet, ces dernières se sont enrichies et étendues, mais des chiffres précis ne sont pas disponibles, en raison de la difficulté d'étudier une information diffuse par télédétection.

En 2014, le CIRAD et ses partenaires CIFOR et ONFI ont obtenu du Fonds Français pour l'Environnement Mondial mandat pour la mise en œuvre du Projet intitulé « Gestion des Forêts Naturelles et Approvisionnement Durable en Bois-Energie des villes du Sahel (FONABES) ».

La finalité de ce projet est d'harmoniser les politiques forestières en vigueur au Mali, Burkina Faso et Niger (figure 1) par des transferts d'expériences réussies. Il vise à améliorer les conditions de vie des populations grâce à un approvisionnement durable et à des prix compétitifs en bois-énergie qui soit créateur de revenus en milieu rural.

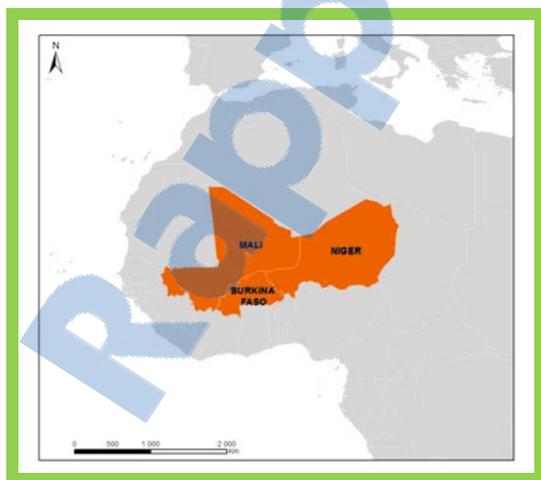


Figure 1 : Localisation du Projet FONABES

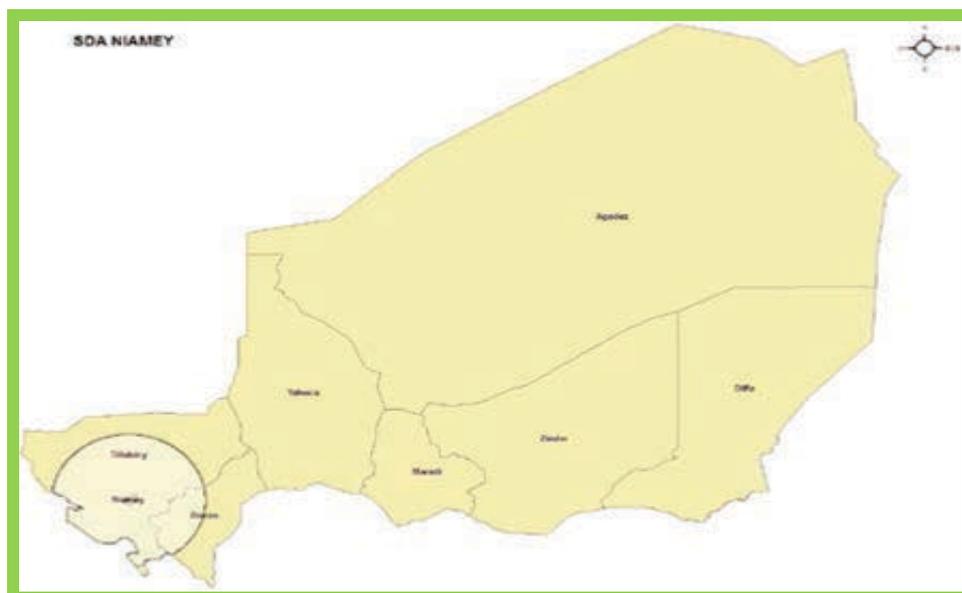
Introduction

Enfin, le projet doit garantir le maintien ou l'accroissement du carbone forestier, associé à la conservation des écosystèmes forestiers sahéliens.

Pour cela, il est indispensable de mieux connaître la dynamique de la végétation arborée, à la fois dans les espaces sylvopastoraux (brousses) mais également dans les espaces agroforestiers (parcs).

C'est dans cette optique que s'inscrit notre projet professionnel intitulé: Evolution comparée du couvert végétal en zone de brousse et en zone agricole de 1992 à 2014 dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Niamey. C'est un lieu ou zone de production de bois destinée à ravitailler la ville de Niamey et qui s'étend sur un rayon de 150km (figure 2).

Figure 2 : Localisation du bassin d'approvisionnement du bois de Niamey



Source : (FONABES, 2014)

II. Objectifs du projet

Le commanditaire désire connaître la dynamique de la végétation arborée à la fois dans les zones de brousse et les zones agricoles par télédétection de 1992 à 2014.

Ainsi, les principaux objectifs de ce travail destiné en priorité aux décideurs et gestionnaires du bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Niamey sont :

- Connaître les évolutions passées du couvert végétal en zone de brousse et en zone agricole en vue de comprendre la dynamique de son évolution au regard des enjeux environnementaux, écologiques, économiques et sociaux que présente le bassin d'approvisionnement en bois énergie de Niamey ;
- Caractériser et quantifier, à partir de données des images satellitaires multi-dates, la dynamique spatio-temporelle du couvert végétal.

III. Intérêt du projet et contraintes de réalisation

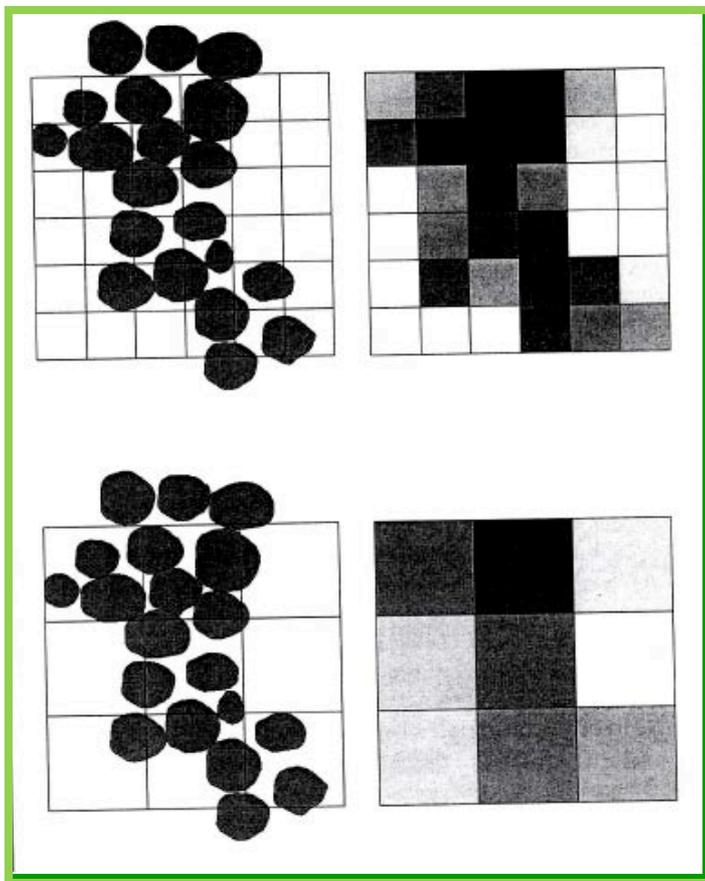
A ce jour, deux techniques de télédétection sont plus particulièrement employées pour caractériser la dynamique de la végétation.

Introduction

Le Lidar (Light détection and ranging) est une technologie récente particulièrement intéressante, car elle permet d'accéder directement à des mesures en 3D sur la végétation. Cependant le coût d'acquisition des données reste élevé et il n'existe pas d'archives de données anciennes ni de couverture exhaustive du territoire national. La seconde technique est la photogrammétrie numérique basée sur l'analyse de photographies aériennes. Moins coûteuse, elle permet aussi, avec les banques de données photographiques, d'avoir des données qui remontent à plusieurs dizaines d'années. Cependant, le manque de disponibilité des photos aériennes qui couvrent notre zone d'étude est une contrainte majeure.

Toutefois, dans le cadre de la présente étude, les données satellites à utiliser doivent être au moins de haute résolution spatiale (résolution décamétrique de type Landsat) pour bien identifier les différentes composantes du paysage. Or, un des pré requis en analyse d'images est d'adapter la résolution de ces images à la problématique en question. La résolution spatiale représente la taille du pixel élémentaire au sol perçu à la verticale du satellite. Comme l'emprise spatiale des éléments qui constituent la surface du sol est généralement plus fine que celle du pixel des satellites actuels couramment utilisés pour le suivi des couverts végétaux (résolution décamétrique), c'est la combinaison des différents éléments présents à la surface qui influencera la réflectance. On parle alors de pixel « mixte » par opposition à des pixels purs c'est-à-dire des pixels pour lesquels la réflectance est celle d'un seul élément homogène. Sur la figure 3, il est mis en évidence que selon la résolution, l'image obtenue est différente. C'est ainsi qu'avec une résolution plus fine, la forêt est encore bien restituée en recouvrement et forme.

Figure 3 : Influence de la taille du pixel sur la perception aérienne d'une bande isolée



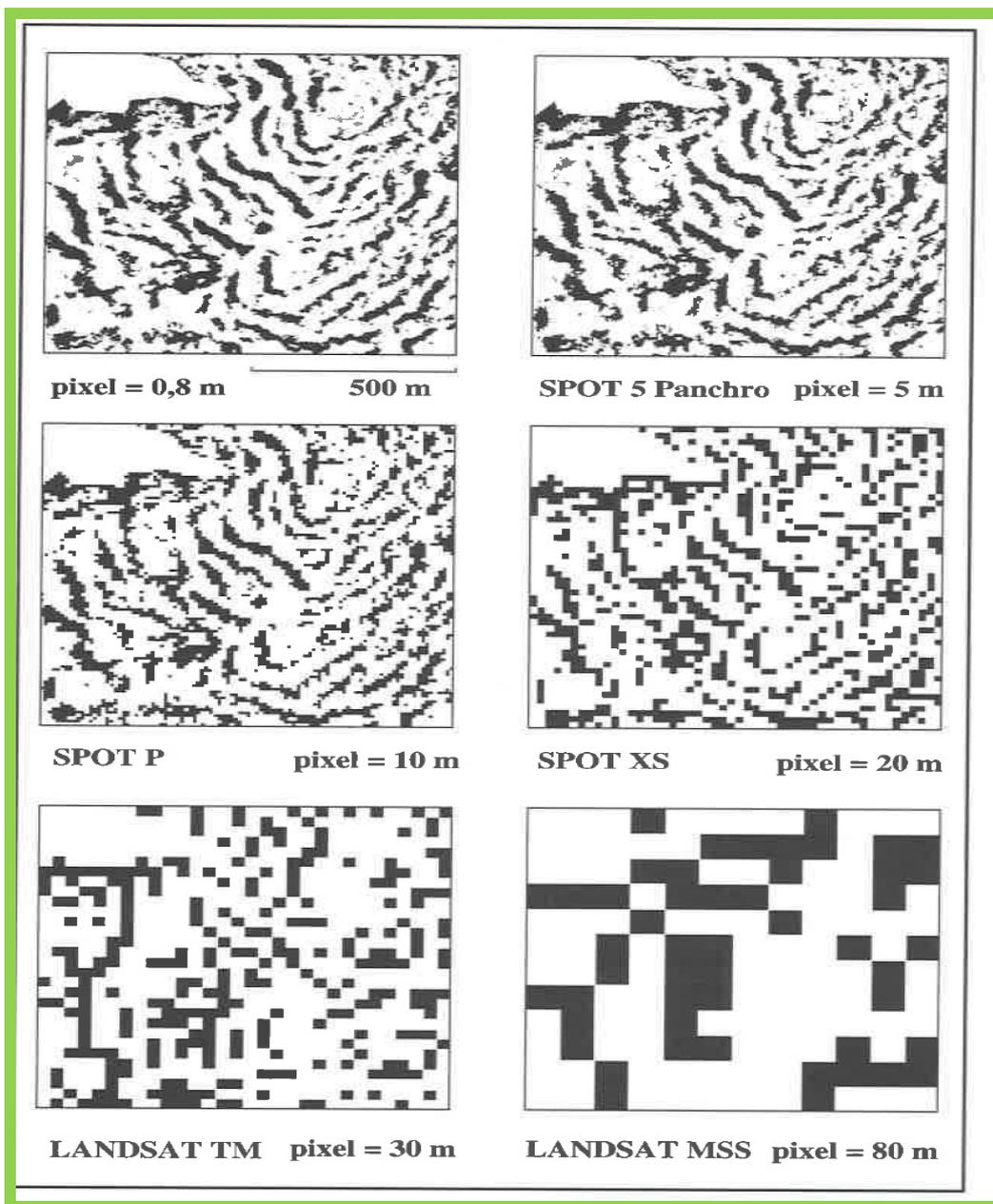
Source : Mougnot et Hamani, 1997

Introduction

Sur un autre plan, la dégradation de la résolution spatiale entraîne une perte d'information (figure 4). Cependant, la résolution à 30 m permet encore de bien appréhender la brousse tigrée. La savane arbustive étant du même type que la brousse tigrée, une résolution de 30 m suffit à caractériser l'essentiel de ses caractéristiques (Mougenot et Hamani, 1997). Les images à 30 m de résolution sont donc adaptées à notre étude car elles permettent de caractériser la ressource ligneuse dans les différentes composantes du paysage de la zone d'étude.

Ainsi donc, ce travail focalisé sur l'évaluation de la dynamique du couvert végétal à partir des images Landsat contribue utilement au projet FONABES en s'inscrivant plus particulièrement dans l'amélioration des connaissances sur la dynamique des ressources ligneuses du bassin. Les résultats de l'étude serviront à améliorer les approches d'inventaire forestier dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Niamey.

Figure 4: Influence de la taille de pixel sur la perception aérienne d'une structure de brousse tigrée



Source : Mougenot et Hamani, 1997

Partie1 : Etat des connaissances sur l'évaluation du couvert végétal

Au regard de l'objectif principal de notre projet, les références bibliographiques à mobiliser relèvent des domaines de l'écologie, de la foresterie et de la télédétection. Par rapport aux différences méthodes d'évaluation du couvert végétal, nous avons évoqué deux grandes catégories de méthodes : une méthode de terrain (inventaire forestier) qui est la plus connue et des méthodes basées sur l'analyse des images (méthodes basées sur la télédétection et méthodes utilisant les indices de végétation). Pour conduire notre projet, nous avons utilisé la deuxième catégorie de méthodes.

1.1 Méthode d'inventaires

Il existe de nombreuses techniques pour suivre l'évolution du couvert forestier. La méthode d'inventaire forestier reste la plus connue et la plus ancienne.

C'est une technique fiable et robuste mais très fastidieuse. En effet, elle demande beaucoup de temps, ce qui la rend très onéreuse lorsqu'il s'agit d'assurer le suivi de la ressource ligneuse sur une vaste zone.

1.2 Méthodes basées sur la télédétection

La télédétection se révèle être un outil tout à fait approprié pour étudier le fonctionnement et suivre l'évolution de la végétation. Grâce aux satellites il est possible en effet de cartographier les couverts végétaux à des échelles de temps et d'espace très variés. Ils permettent en outre d'estimer le rayonnement solaire global, ainsi que certains paramètres caractéristiques des couverts végétaux, comme la quantité de biomasse, ou la fraction du rayonnement photosynthétique actif. Outils d'une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques qui gouvernent la dynamique des écosystèmes végétaux, les données de télédétection peuvent aussi être utilisées pour informer les politiques sur les conséquences d'éventuels changements de la répartition mondiale des couverts végétaux, de façon à mettre en place des solutions de gestion plus durables.

Ainsi, à partir du lancement des premiers satellites d'observation de la terre en 1972, les forestiers furent très intéressés par les données de télédétection spatiale (Landy, 1973). Cependant après l'euphorie des premières études, des limitations importantes de ce nouvel outil sont rapidement apparues dans le cadre d'une mise en œuvre opérationnelle (Defourny, 1994).

Après un désenchantement lié à une image très rependue d'une technologie « miracle » la plupart des forestiers ont fait leur choix sur la méthode visuelle d'interprétation des données en terme quantitatif, voire simplement relatif (Defourny, 1994).

Par le passé, la plupart des inventaires forestiers utilisent de façon tout à fait systématique et routinière l'interprétation visuelle des images satellites essentiellement dans les étapes de la stratification et de la définition de plan de sondage. Cette interprétation visuelle est le plus souvent pratiquée à partir de tirage papier d'un seul canal ou de composition colorée des données spectrales (Pain, 1982 ; FAO-UNEP, 1980).

L'évolution de l'informatique a permis d'envisager une interprétation numérique des données toujours en terme quantitatif. De nombreuses études ont testé les différentes méthodes de classification des données pour identifier un maximum de formations végétales différentes (Pain, 1982 ; Defourny, 1988 ; Lavenu et al, 1987).

A l'échelle local, les techniques de classification plus ou moins supervisées se révèlent particulièrement efficaces, mais le traitement des grandes zones met en évidence des sérieuses limitations concernant les possibilités d'extrapoler, en particulier quand les formations ne sont pas nettement différenciées. Cependant depuis quelques années, plusieurs approches quantitatives ont été développées pour extraire l'information forestière de télédétection. De façon générale, elles tentent de corréliser des variables forestières au signal de télédétection plus ou moins transformé, les uns (Olsson, 1985 ; Helden, 1987 ; Defourny, 1989) cherchent des relations empiriques entre le signal enregistré et les paramètres densimétriques. D'autres (Franklin et Strahler, Franklin et Hiernaux, (1991); Woodcock, (1988); Jupp et al., (1988) rapportés par (Defourny, 1994) font appel à un modèle théorique de représentation de la végétation pour déduire du signal détecté, la densité du peuplement et la taille moyenne des arbres.

Les autres méthodes sont toutes des méthodes basées sur l'utilisation d'images satellites ou aériennes.

A partir des images satellites, il existe plusieurs méthodes pour évaluer le couvert forestier.

La première, est la réalisation d'une interprétation manuelle d'image aérienne ou d'image satellite à très haute résolution (IKONOS par exemple). Il suffit de comparer visuellement l'image à des grilles donnant une idée de la densité du couvert forestier Cette solution n'est pas applicable dans le cadre de nos travaux car les images à très hautes résolutions sont encore trop onéreuses pour être utilisées dans le suivi des ressources forestières notamment en Afrique. De plus, ces méthodes dites manuelles sont très subjectives puisque dépendantes du jugement d'un opérateur et elles sont extrêmement coûteuses en temps de travail.

La méthode des grilles de points est facile, rapide et précise. L'observateur superpose une grille de points à l'image et compte le nombre de points qui tombent sur un arbre. Le rapport du nombre de points « arbre » sur le nombre de points total donne le pourcentage de couvert forestier. La grille de points peut être régulière ou aléatoire.

Il est possible de faire le même genre de travail avec un transect au lieu d'une grille de points. L'insuffisance de cette méthode est qu'elle est complètement manuelle et donc longue à mettre en place. Comme la technique précédente, elle est aussi subjective.

1.3 Méthodes utilisant les indices de végétation

L'indice de végétation est une mesure quantitative indiquant la dynamique de la végétation (Campbell, 1987). Il montre une meilleure sensibilité les bandes spectrales individuelles pour la détection de la biomasse (Asrar *et al.*, 1984). Son intérêt réside, entre autres, dans l'évaluation de la densité du couvert végétal, la détection des changements dans l'utilisation du sol survenus dans le temps et dans l'espace, l'interprétation des images de télédétection, l'indication des caractéristiques des couverts végétaux et l'amélioration de l'exactitude de la classification pour une cartographie thématique (Asrar *et al.*, 1984; Bariou *et al.*, 1985a et 1985b; Qi *et al.*, 1991; McNaim et Protz, 1993). Ils donnent une évaluation approximative du taux de recouvrement du sol par la végétation verte avec cependant deux nuances :

- Ils surestiment le taux de recouvrement durant la phase de croissance à cause de la forte activité chlorophyllienne pendant cette période du cycle végétatif ;
- ils confondent la végétation sénescence avec le sol nu (Cyr L., Bonn F., Pesant A., 1995).

Malgré l'existence de plusieurs indices de végétation dans la littérature (Bannari et al. 1995),

Trois indices seulement ont été retenus pour conduire notre étude.

Le premier est le NDVI proposé par (Rouse et al. (1974); c'est l'indice classique le plus populaire et le plus utilisé.

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

Sa formule est la suivante :

Le second est le PVI (Pemendicular Vegetation Index, Jackson *et al.*, 1980): celui-ci prend en considération les effets du sol nu en se basant sur la droite des sols (Baret *et al.*, 1993). Il est donné par :

$$PVI = \frac{(PIR - aR - b)}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

Où : R = canal rouge.

PIR = canal proche infrarouge.

Le troisième est le TSARVI, un nouvel indice qui caractérise convenablement la végétation éparse et moyennement dense dans les milieux hétérogènes indépendamment des effets des sols nus, des variations spatio-temporelles de l'atmosphère et des caractéristiques du capteur (Bannari et al., 1997).

$$TSARVI = \frac{[a(PIR - aR - b)]}{[R + aPIR - ab + X(1 + a^2)]}$$

Où : R = canai rouge.

PIR = canal proche infrarouge.

a = pente de la droite des sols.

b = ordonnée à l'origine de la droite des sols.

X = facteur atténuant la luminosité des sols.

Le choix des bandes à utiliser pour les indices a fait le sujet de plusieurs études. Les canaux rouge et proche infrarouge sont considérés en général comme les mieux adaptés pour l'étude des couverts parce qu'ils contiennent à eux seuls 90% de l'information spectrale relative à la végétation vivante (Baret et al., 1988). Ceci vient du fait que le rouge est absorbé par la chlorophylle alors que la radiation dans le proche infrarouge est fortement réfléchié par la structure cellulaire des feuilles (Guyot, 1995). Le rapport entre ces bandes rehausse le signal associé à la couverture végétale tout en amoindrissant l'apport spectral relatif des autres éléments de la scène. La plupart des méthodes d'indices utilisent donc les bandes rouges et proche infrarouge dans leur algorithme.

Partie2 : Données et Méthodes

I. Gestion de projet

La synthèse bibliographique réalisée pendant le mois de mai nous a permis de définir l'itinéraire technique pour atteindre les objectifs assignés au projet (tableau1)

Tableau 2 : Planning du projet

Phase	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Phase1-Analyse des besoins, Compréhension des objectifs						
Phase2- Bibliographie, Conception						
Phase3- Acquisition des images						
Phase4- Etude détaillée, traitements des images						
Phase5-Mission terrain acquisition des données source nigérienne et bibliographie						
Phase6- interprétation des résultats						
Phase7-rédaction des rapports						
Prévu						
Prolongation						

Dans le cadre de ce travail, les logiciels Erdas Imagine 2013©, Envi5.1©, Argis 10.2© et Qgis2.8, Monteverdi, R Studio et MS Excel © ont servi respectivement au traitement des images satellitaires, à la classification des images, et à l'analyse statistique des données.

Durant la mission de terrain, nous avons utilisé du matériel mis à notre disposition par le Ministère de l'Environnement: GPS et matériel logistique de terrain (garde rapprochée, campement, communication et véhicule tout terrain).

II. Données

2.1.1. Zone d'étude et choix des sites

Le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Niamey est situé dans un contexte climatique sahélo-soudanien. Il est caractérisé par une pluviométrie moyenne passant d'environ 350 mm au voisinage du 15^{ème} parallèle à 800 dans l'extrême sud de la zone. La carte des zones climatiques du Niger est présentée en annexe1.

Le bilan très déficitaire entre les quantités d'eau apportées par les pluies et celles évaporées annuellement est aggravé par la concentration des précipitations sur 3 à 4 mois seulement de l'année et par la mauvaise répartition des pluies dans le temps et dans l'espace.

Dans le cadre de l'élaboration du Schéma Directeur d'Approvisionnement en bois énergie de Niamey (SDAN 1991), le Projet Energie II a estimé la superficie du bassin à 2 438 000 ha et le volume de bois sur pied à 5,22 stères/ha. Ce potentiel fournissait 130 000 tonnes de bois-énergie pour des besoins estimés à 150 000 tonnes dans la ville. Le gap pourrait être compensé à travers les prélèvements ligneux des champs et jachères (zones agricoles) dont la productivité est estimée à 4,5 stères/ha (Montagne et al, 2000).

-
- ✓ Compléter la bibliographie.
 - ✓ Conduire des enquêtes auprès des populations des sites d'étude pour recueillir leur témoignage sur la construction des différents parcs agroforestiers et l'intégration des pratiques de la Régénération Naturelle Assistée (RNA) dans leur système de production.
 - ✓ Réaliser des transects de végétation suivant les axes prédéfinis par l'équipe des inventaires forestiers qui traversent nos sites d'étude (figure1).

A l'issue de la mission, nous avons pu caractériser les zones de brousse en fonction de leur état d'organisation : organisation régulière ou dégradée. Par rapport aux zones agricoles, nous avons collecté des données descriptives sur les parcs agroforestiers, (composition et origine). Enfin des photos ont été prises au niveau de certains points particuliers pour illustration.

Un rapport de mission a été rédigé à fin de la mission.

2.4. Données de télédétection

2.4.1. Images satellites disponibles

L'étude vise à mettre en évidence les ressources ligneuses. Il s'agit donc de caractériser les arbres sans prendre en compte la végétation herbacée, « agricole » ou naturelle. Il nous faut donc choisir des dates d'acquisition des images pour lesquelles les cultures auront été récoltées et les herbacées ne seront pas trop présentes.

Il faut aussi choisir une date pour laquelle les arbres seront encore le plus vert possible pour qu'ils soient plus facilement visibles dans les images.

Au Niger, le cycle des herbacées est calé sur la saison des pluies sauf au bord des cours d'eau. Les herbacées repoussent au début de la saison des pluies et disparaissent à la fin de celle-ci. Il faut donc choisir une image acquise en fin de saison des pluies plus précisément entre le mois de septembre et d'octobre.

Ainsi, nous avons choisi nos images en fonction des conditions décrites plus haut et d'autres critères notamment :

- Le coût d'acquisition qui conditionne la mise en œuvre de la méthode sur de grandes zones et sa reproductibilité dans le temps.
- La résolution spatiale qui détermine la taille du plus petit élément détecté par le capteur.
- La date de prise de vue qui détermine l'état de la végétation et sa réponse radiométrique.

Nous avons donc considéré que les images à très haute résolution spatiale encore très coûteuses (taille du pixel inférieur au mètre) ne représentaient pas une avancée significative pour nos travaux par rapport aux images disponibles à haute résolution spatiale (Landsat 30m).

Au final, nous avons donc opté pour des images haute résolution prises au début de la saison sèche de manière à ce que les arbres soient encore feuillus mais que les herbacées n'aient plus d'activité chlorophyllienne dans les zones de sol nu.

Compte tenu de ces critères, nous avons retenu en fonction de leur disponibilité, les images issues de 3 capteurs de la série Landsat TM pour les années 1992, ETM+ pour les années 2001 et OLI pour les années 2014 dont les caractéristiques sont résumées dans un tableau déplacé à l'annexe4.

2.4.2. Données cartographiques :

Notre échelle d'analyse étant les communes, trois couches vectorielles des limites administratives de trois communes abritant nos sites ont été utilisées pour le découpage des images Landsat.

2.4.3. Images Google Earth©

Les images satellites de Google Earth© nous ont permis de bien identifier les différentes classes d'occupation des sols. Ces images ont été aussi utilisées pour l'estimation des taux de couverture végétale en zones de brousse et en zones agricoles par la méthode de grille de points.

III. Méthodes

Dans le cadre de la présente étude, ce qui intéresse le CIRAD est de savoir comment le taux de couverture de végétation ligneuse a évolué en zones de brousse et en zones agricoles sur une échelle de temps donnée sans faire la distinction entre les différentes formes de ressources ligneuses.

Il n'est donc pas pertinent de décomposer la ressource ligneuse en plusieurs catégories.

Nous considérons donc que l'occupation du sol sur nos sites d'étude se décompose en trois classes (zone de brousse; zones agricoles et sol nu).

3.1. Traitements d'images

Certains traitements préliminaires ont dû être effectués sur les images brutes. Il s'agit des corrections géométriques et radiométriques.

Les corrections radiométriques ont été faites différemment. Pour les images des capteurs TM et ETM+, les corrections ont été effectuées sur ENVI tandis les images Landsat OLI ont été corrigées sur ERDAS. Par rapport à la correction radiométrique c'est la réflectance qui a été calculée.

Les valeurs obtenues ont été utilisées pour le mosaiquage et le calcul de nos différents indices de végétation (bande4 : proche infrarouge et bande3 : rouge).

Nous avons reprojété ensuite les images dans le référentiel Universel Transverse Mercator (UTM-31 WGS-84 Nord), déjà appliqué aux documents cartographiques du Niger, pour la région de Niamey.

Après l'amélioration radiométrique, le géoréférencement, nous avons créé des compositions colorées en associant les canaux 4 pour l'infrarouge, 3 pour le rouge et 2 pour le vert dans l'ordre colorimétrique Rouge, Vert, Bleu. C'est sur ces compositions colorées que nous avons extrait nos sites d'étude (figure 6).

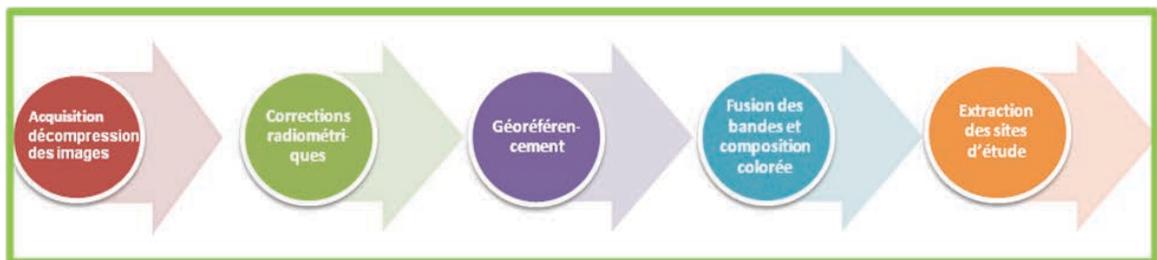


Figure 6:Chaîne de traitement des images.

3.2. Interpretation des images

Dans notre zone d'étude, la détection du couvert végétal souvent dispersé (zones agricoles) reste délicate sur l'image Landsat. Toutefois, la structure géomorphologique du paysage est facilement délimitable.

En fonction de la densité et de la structuration des bandes sur photographie aérienne, AMBOUTA (1997) distingue les types de brousse tigrée suivants : brousse tigrée typique, brousse tigrée persillée et brousse tigrée en tirets.

Mais, dans l'interprétation de nos images nous ne sommes pas appesantis sur cette discrimination typologique de la brousse tigrée mais plutôt sur l'état de son organisation : organisation régulière ou dégradée.

Cette organisation reflétant l'état de la brousse tigrée a été appréciée surtout par rapport à la bande boisée.

Ensuite, sur la base des sites d'entraînement dûment identifiés, nous avons déterminé nos trois (3) classes d'occupation des sols d'intérêt (sols nus, zones de brousse, zones agricoles). Celles-ci sont distribuées dans six (6) classes thématiques définies dans la nomenclature de l'occupation des sols (NOS, 2001) utilisée à la Division des Statistiques et de la Cartographie Forestière (DSCF) du Niger. Ces classes thématiques sont : Végétation, Zone de culture, Etablissements humains, Sols nus, Réseaux hydrographiques, Réseau routier. Une fois les différentes classes identifiées, nous avons procédé à leur caractérisation.

- **Classe zone de brousse**

Sur l'imagerie satellitale, la brousse tigrée est très bien identifiable. Elle est constituée d'une alternance de bandes multiformes, généralement allongées ou plissées, de couleur rougeâtre (végétation) et de la bande couleur grise/vert (sols nus) Figure7.

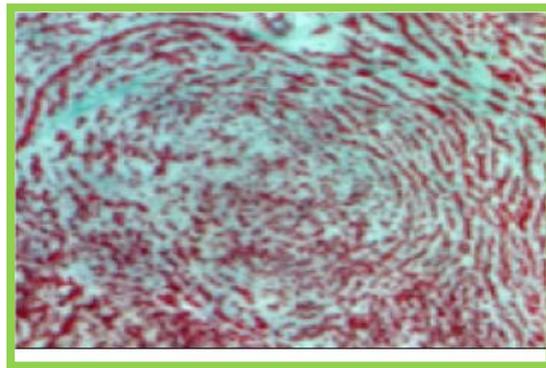


Figure 7 : La brousse tigrée (extrait image Landsat, 18septembre1992)

- **Classe zones agricoles :**

Elles sont identifiables sur l'image par leur couleur rouge tendance gris et suivant des formes géométriques quelconques.

- **Classe sols nus :**

De forme très variable (linéaire, sinusoïdale, en bloc ou quelconque) ils apparaissent généralement en vert foncé sur les plateaux ou juxtaposés aux escarpements ; une couleur blanchâtre généralement dégradée entre les talus et les bas-fonds.

3.3. Création des cartes par la classification supervisée

Pour créer les cartes des différents sites, nous nous sommes basé sur l'interprétation de nos images. A partir de ces images, nous avons en place un protocole de classification adapté à la zone d'étude.

La classification supervisée est plus appropriée dans ce cas que la classification non supervisée car je connais à priori le nombre de classes que je souhaite obtenir et leur position sur le terrain

via la vérité terrain. Nous souhaitons obtenir trois classes. Une classe zones de brousse, une classe zones agricoles et une classe sol nu qui regroupe le sol et tout ce qui n'est pas végétation ligneuse (eau, route, bâti.).

Nous avons utilisé les trois canaux spectraux (Canal 4 : proche infrarouge ; canal 3 : rouge et canal 2 : vert) regroupant les principales fonctions de la végétation en termes d'activité photosynthétique.

Au final, c'est la classification supervisée sur QGIS 2.8 et Monteverdi que nous avons retenue. L'approche de classification supervisée utilisée est la classification pixel par pixel SVM (Support Vector Machine). Cet algorithme permet la classification des pixels grâce à un séparateur caractérisé par une marge maximale. Cette marge correspond à la distance entre deux hyperplans séparant les deux classes, c'est-à-dire à une zone de sécurité entre ces deux classes (OpenCV & Cookbook, 2015).

Afin de vérifier l'exactitude de la classification, nous avons utilisé un second jeu de données, dit de vérification. Des indicateurs de performance de classification, le Kappa et la matrice de confusion, vérifient que l'ensemble des pixels de ce jeu de données a été correctement classé. La matrice est construite à partir du jeu de données de vérification, et permet d'analyser la qualité des classes (sensibilité) et d'identifier les classes problématiques (spécificité). Ces pourcentages sont calculés par le nombre de pixels bien classés par rapport au nombre total de pixels, plus ils sont proches de 100%, plus les pixels sont correctement classés.

Pour chacune des images Landsat, nous avons obtenu une classification satisfaisante dans la mesure où des ensembles spatiaux homogènes se distinguaient nettement et correspondaient à la typologie que nous avons établie.



Figure 8 : Représentation des différentes étapes de la classification SVM

3.4. Calcul des indices de végétation

Le NDVI reste l'indice le plus populaire des indices (P Defourny, 1992). En Afrique subsaharienne, il a été utilisé pour estimer la biomasse ligneuse, l'âge et la composition des peuplements, ainsi que la densité du couvert forestier à différentes échelles (A Anyamba et C J Tucker, 2005). Cependant, cet indice comme les autres, présente des défauts qui poussent à l'utiliser avec beaucoup de prudence.

En effet, le NDVI est sensible à la couleur du sol et de la litière. Dans le cas d'une végétation peu dense, le signal reçu par le satellite provient essentiellement du sol, paramètre qui fausse les données.

(Huete et al, 1985) et (Elvidge et Lyon, 1985) ont montré que les sols clairs produisent des indices de végétation plus faibles que les sols sombres. Il n'est pas alors pas conseillé d'utiliser le NDVI pour des taux de couvert inférieur à 30% ce qui est malheureusement le cas pour la majorité des formations végétales du bassin d'approvisionnement de la ville de Niamey notamment les zones agricoles.

Pour corriger les effets de sols, d'autres indices ont été proposés. Ils reposent tous sur le concept de droite des sols. Cette dernière correspond à la droite de régression entre la réflectance des

sols dans le proche infrarouge (RPIR) et celle dans le Rouge (RR). Ces indices mesurent la distance des pixels par rapport à la droite des sols : les pixels proches sont supposés être du sol nu et les plus éloignés de la végétation (figure 9 et 10).

Plusieurs auteurs ont montré que ces indices discriminaient mieux la végétation du sol nu que le NDVI notamment dans les zones arides.

Dans cette étude nous avons comparé les résultats de trois indices de végétation : le NDVI; le PVI (*Perpendicular Vegetation Index*) développé par (Perry et Lautenschlager, 1984) et le TSAVI (*Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index*) développé par (Baret et al, 1991) spécifiquement pour les zones semi-arides.

La droite de sol est donnée par :

$$PIR = aR + b$$

Où : PIR = Proche infrarouge

a = Pente de la droite

R = Rouge

b = Ordonnée à l'origine de la droite.

La droite des sols a été calculée à partir de 67 points appartenant à la classe des sols et sélectionnés sur les différentes zones.

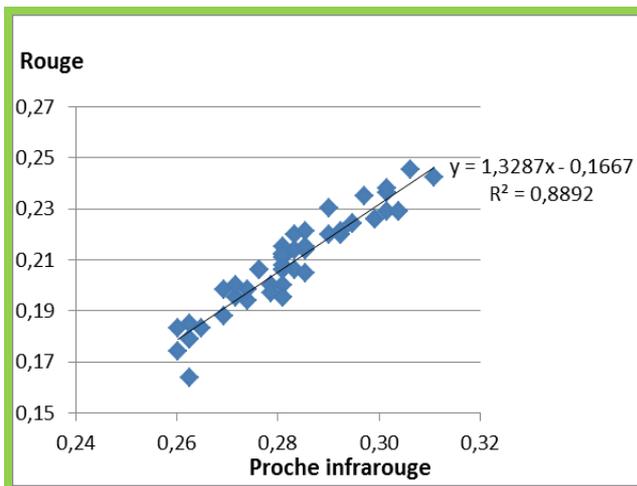


Figure 9 : Droite des sols en zone de brousse

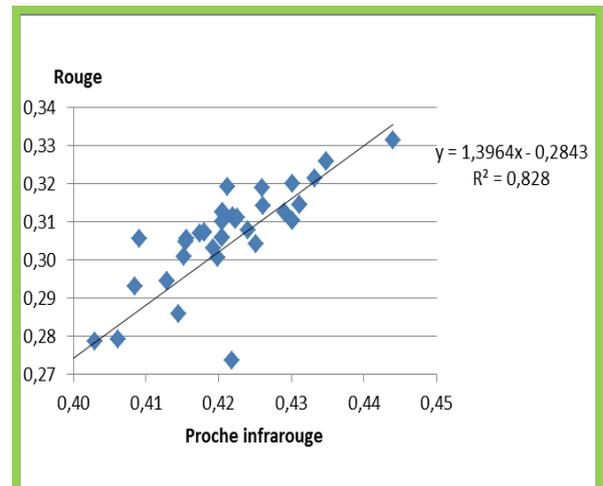


Figure 10 : Droite des sols en zone agricole

3.5. Classification par seuillage des indices

Les études réalisées au Niger, au Burkina Faso et au Mali sur la classification des formations contractées (brousse tigrée) (Mougenot et Hamani, 1997) et sur une méthode d'évaluation de la dynamique du couvert forestier au moyen d'images satellitaires (GAZULL, 2007) montrent que dans la brousse tigrée les bandes boisées et les zones bandes de sol nu peuvent être correctement détectées à l'œil nu à partir des images aériennes et satellitaires à haute résolution. Nous nous sommes inspiré de ces travaux pour faire notre classification.

Toutefois, nous avons été confronté à une difficulté, celle d'établir des règles identiques pour le seuillage quel que soit la date. En effet, les réponses radiométriques diffèrent d'une image à l'autre du fait des différences de capteur, d'atmosphère, d'ensoleillement, d'angle de visée, et bien sûr de phénologie. Malgré toutes les corrections radiométriques possibles la définition de

seuils en valeurs absolues est très délicate. Nous avons donc privilégié des règles de seuillage en valeurs relatives spécifiques à chaque zone.

La classification s'appuie ainsi sur la définition de végétation en zones de brousse, en zones agricoles et en zones de sol nu entre 1992, 2001 et 2014. Elle suit les trois étapes suivantes:

- Délimitation des zones invariantes facilement détectables à l'œil et servant de référence pour la définition de nos trois classes.

Ce travail a été effectué uniquement sur les images Landsat correspondant à nos trois dates (1992, 2001 et 2014) par manque de photographies aériennes.

- Analyse statistique des valeurs des indices de végétation pour chacune de ces zones.
- Reclassification des images et comparaisons diachroniques.

3.6. Evaluation du taux de couvert forestier par la méthode basée sur la grille des points

C'est la méthode des grilles de points qui a été utilisée car elle est facile, rapide et précise (Nowark D.J., Rowntree R.A and al (1996). Ainsi, une grille de points a été superposée sur les images satellites et nous avons compté ensuite le nombre de points qui tombent sur un arbre/ou bande végétalisée. Ensuite, nous avons fait le rapport du nombre de points « arbre/bande végétalisée » sur le nombre de points total pour obtenir le pourcentage de couvert forestier. Cette opération a été effectuée sur trois zones échantillons en zones de brousse et en zones agricoles. La grille de points a été placée de manière aléatoire, 60 points pour la zone de brousse et 50 pour la zone agricole au niveau de chaque échantillon. Rappelons que la méthodologie que nous devons proposer pour évaluer l'évolution du couvert dans le bassin d'approvisionnement de Niamey doit être simple et peu onéreuse. Il ne s'agit pas donc de positionner de manière précise les arbres, mais plutôt d'avoir une idée de la quantité de couvert forestier et de son évolution en zones de brousse et en zones agricoles.



Figure 11 : Processus de détermination du taux de couverture végétal

3.7 Caractérisation de la structure spatiale des différentes zones

Pour préciser l'analyse diachronique de l'évolution du couvert forestier, nous avons également suivi l'évolution de la structure spatiale de nos trois classes. Cette dernière est caractérisée par la distribution statistique du nombre brut de pixels. Pour ce faire, une carte de changement a été créée pour chaque site. Elle est issue de la somme des couches de 1992, 2001 et 2014 qui ont été multipliées respectivement par 100, 10 et 1 pour créer un seul fichier avec sa propre topologie. Chaque polygone créé a ses propres attributs et donc peut être caractérisé.

C'est l'organisation et l'exploitation des données matricielles qui ont permis de ressortir les changements survenus entre les trois (3) dates.



Figure 12 : Etapes de création de cartes de changements

Partie 3 : Résultats

Dans cette partie, nous présentons les différents résultats obtenus lors de l'étude.

I. Analyse de la pertinence des indices de végétation

Les indices de végétation, dans leur ensemble, donnent une bonne idée de la localisation des zones de végétation, malgré la présence des sites d'étude très morcelés et hétérogènes notamment la commune de Bitinkodji.

Le profil statistique des trois indices testés pour chacune des zones invariants est synthétisé dans la Figure 13.

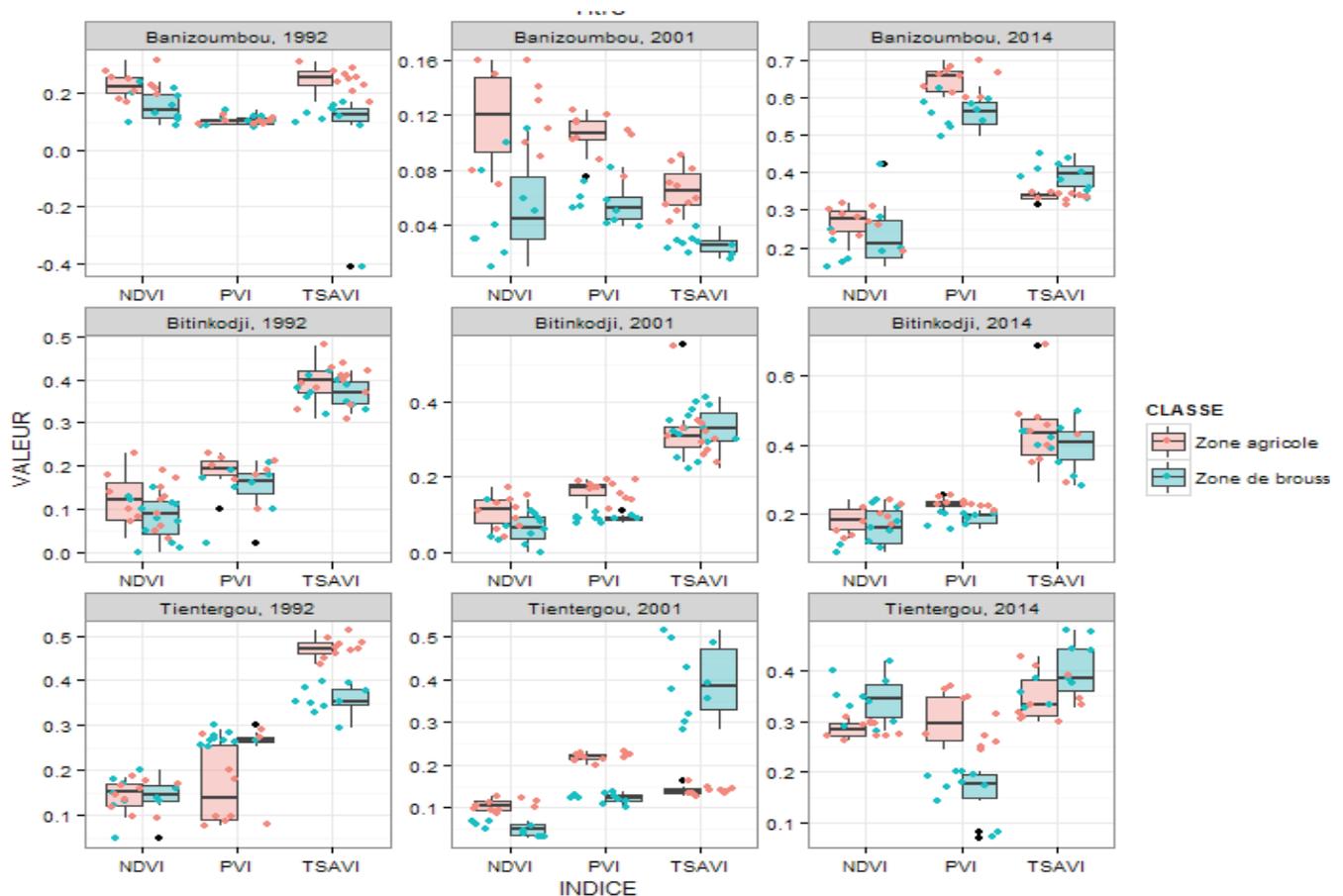


Figure 13 : Profils statistiques des indices de végétation (NDVI, PVI et TSAVI).

L'analyse exploratoire de la figure 13 met en évidence que les trois indices sont pertinents pour discriminer les deux classes (zone de brousse/zone agricole).

Tous les indices offrent une dispersion des valeurs selon les sites et les années sauf au niveau de Banizoumbou (PVI, 1992).

Par rapport au site de Banizoumbou, les plages de données 1992 du PVI et du NDVI pour les deux classes d'occupation des sols présentent des chevauchements qui rendent impossible la discrimination radiométrique de la classe de zone de brousse et de zone agricole. Par contre en 2001, tous les trois indices permettent de bien discriminer les deux classes.

Enfin, en 2014 c'est le PVI qui discrimine mieux les deux classes.

Pour le site de Bitinkodji, c'est le PVI qui permet de mieux discriminer les deux classes, nous retiendrons donc le PVI pour Bitinkodji et pour toutes les dates.

Au niveau de Tientergou, tous les trois indices discriminent parfaitement les deux classes selon les années. Entre le NDVI, le PVI et le TSAVI nous avons choisi de retenir le PVI car le PVI possède l'avantage d'être plus stable dans le temps et dans l'espace (cf. figure 13) ce qui facilite les comparaisons entre les sites et à différentes dates.

1.1 Evolution des superficies d'états de surface des sites entre 1992 et 2014

Pour suivre l'évolution des superficies d'états de surface des différents sites, des tableaux sont générés à partir de la table attributaire des couches des trois images. Nous avons calculé ainsi des superficies et le pourcentage des états de surface des classes sol nu, zone de brousse et zone agricole. Nous avons ensuite reproduit un diagramme et des cartes pour chaque année pour mieux voir la tendance que ces unités d'occupation du sol donnent de 1992 à 2014.

1.1.1 Site de Bitinkodji

L'application sensu stricto des seuils déterminés par l'analyse statistique aboutit aux résultats synthétisés dans le Tableau 2.

Le Tableau 2 représente l'évolution brute de la classification entre les trois dates 1992, 2001 et 2014, tandis que les Tableaux 3 et 4 représentent l'évolution relative du nombre de pixels transformés d'une classe à l'autre entre 1992 et 2001 et entre 2001 et 2014.

Tableau 2 : Evolution brute du nombre de pixels par classe d'occupation des sols de 1992 à 2014

Classes (ha)	1992	2001	2014
Sol nu	16978 (27%)	18383 (30%)	9528 (16%)
Zone de brousse	10909 (18%)	27235 (44%)	32956 (53%)
Zone agricole	33800 (55%)	16068 (26%)	19202 (31%)
Total	61686 (100%)	61686 (100%)	61686 (100%)

A partir de ce tableau 2, la figure ci-après est reproduite pour une meilleure interprétation des différences des superficies des unités d'occupation des dites zones entre 1992 et 2014.

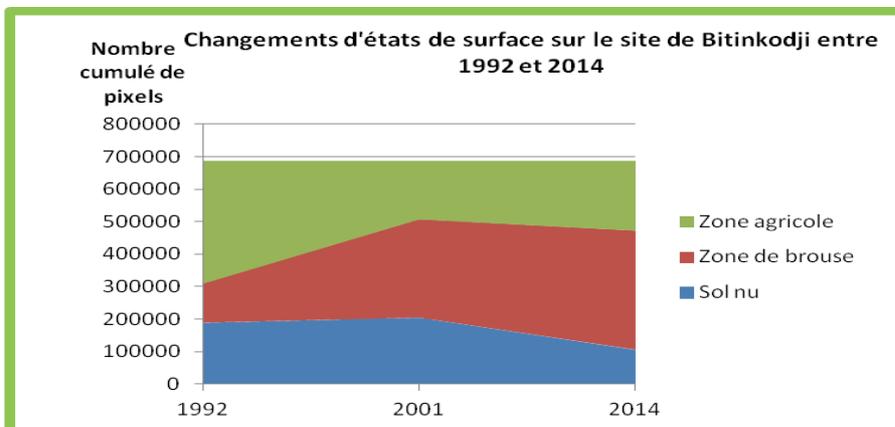


Figure 14 : Changements d'états de surface du site de Bitinkodji entre 1992 et 2014

Tableau 3 : Evolution d'états de surface du site de Bitinkodji de 1992 à 2001

Bitinkodji	Années		Nombre d'années	Dynamique
	Superficie (ha)			
Classes	1992	2001		
Sol nu	16978 (27%)	18383 (30%)	10	1405
Zone de brousse	10909 (18%)	27235 (44%)	10	16326
Zone agricole	33800 (55%)	16068 (26%)	10	-17732

En 1992 (tableau 2 et figure 14), le territoire communal est dominé par un paysage contrasté composé de grandes superficies de zones agricoles alternant avec de taches de sol nu (27%). Les zones de brousse représentaient 18% et les zones agricoles étaient majoritaires.

En 2001, on observe toujours un territoire contrasté avec une augmentation des superficies des classes de sols nus de 3% et de zones de brousse de 26%. Par contre les zones agricoles ont connu une réduction notable de (29%). Les zones de brousse étaient majoritaires.

De 1992 à 2001, on enregistre une augmentation des superficies de 3 % et 26% respectivement en sols nus et en zones de brousse, une diminution de superficie de 26% de zones agricoles.

En dix (10) ans, le terroir communal de Bitinkodji s'est un peu dégradé puisque la surface occupée par les sols nus a augmenté de 3%. Ce phénomène de dégradation forestière peut s'expliquer par l'étalement urbain de la ville Niamey.

Tableau 4 : Evolution des Unités d'occupation du sol du site de Bitinkodji 2001 à 2014

Bitinkodji	Années		Nombre d'années	Dynamique (ha)
	Superficie (ha)			
Classes	2001	2014		
Sol nu	18383 (30%)	9528 (16%)	15	-8855
Zones de brousse	27235 (44%)	32956 (53%)	15	5721
Zones agricoles	16068 (26%)	19202 (31%)	15	3134

En 2014, le territoire communal reste toujours contrasté avec une réduction sensible de sols nus (13%), une augmentation de zones de brousse (9%) et une augmentation de 5% de zones agricoles.

En quinze (15) ans, le territoire communal de Bitinkodji s'est modestement végétalisé puisque la surface occupée par les zones de sol nu est passée de 30% à 16% soit une diminution de 13%. De l'autre côté, on observe une légère augmentation des zones agricoles qui passent de 26% à 31%.

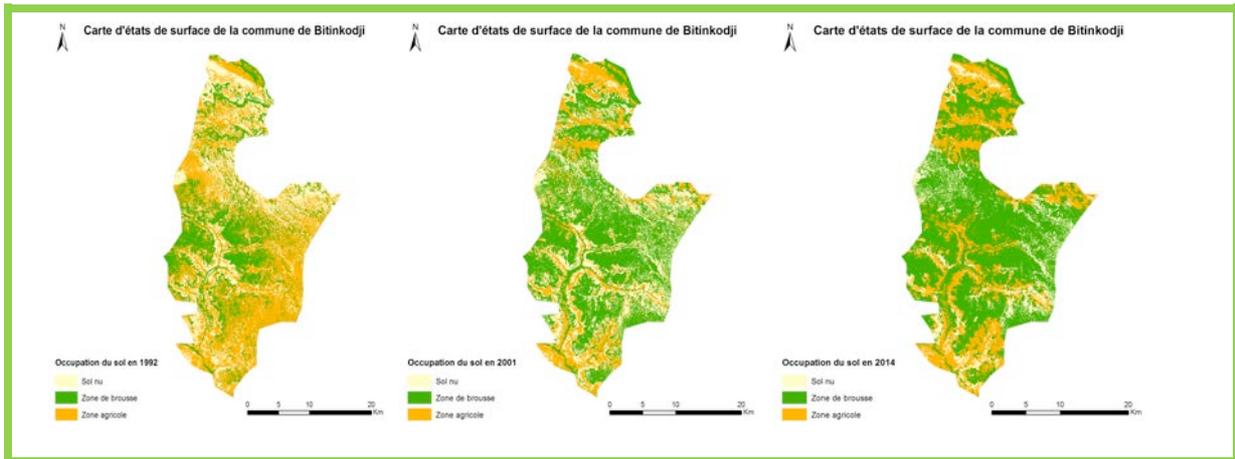


Figure 15 : Cartes montrant l'évolution de l'occupation du site de Bitinkodji

Sur la figure 15, la tendance entre 1992 et 2014 est visiblement à la progression de la zone de brousse. Cette progression se fait surtout dans la partie centrale de la commune et dans les bas-fonds. La transformation des sols nus en zones de brousse peut s'expliquer par les nombreuses politiques de reboisement menées par l'Etat et les projets. La régularité des pluies peut être aussi un élément explicatif. Nous remarquons toutefois que certaines parties des zones agricoles sont devenues des zones de brousse. Cette transformation des classes se voit surtout à l'est de la commune.

1.1.2 Site de Tientiergou

L'application sensu stricto des seuils déterminés par l'analyse statistique aboutit aux résultats synthétisés dans les Tableaux 5, 6 et 7.

Le Tableau 5 représente l'évolution brute de la classification entre les trois dates 1992, 2001 et 2014, tandis que les Tableaux 6 et 7 représentent l'évolution relative du nombre de pixels transformés d'une classe à l'autre entre 1992 et 2001 et entre 2001 et 2014.

Tableau 5 : Evolution brute du nombre de pixels par classe d'occupation des sols de 1992 à 2014

Classes	1992	2001	2014
Sol nu	240317 (23%)	236186 (23%)	184063 (18%)
Zone de brousse	451563 (43%)	444137 (42%)	453459 (43%)
Zone agricole	353610 (34%)	364987 (35%)	407788 (39%)
Total	1045490 (100%)	1045310 (100%)	1045310 (100%)

A partir du tableau 5, la figure 16 est reproduite pour une meilleure interprétation des différences des superficies des unités d'occupation desdites zones entre 1992 et 2014.

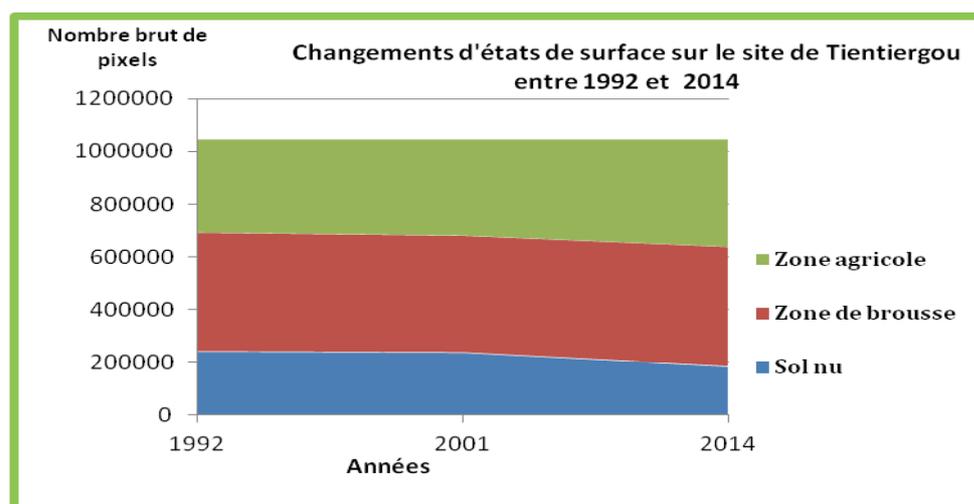


Figure 16 : Changements d'états de surface du site de Tientiergou entre 1992 et 2014

Tableau 6 : Évolution d'états de surface du site de Tientiergou de 1992 à 2001

Tientiergou	Années		Nombre d'années	Dynamique
	Superficie (ha)			
	1992	2001		
Sol nu	21629 (23%)	21257(23%)	10	-372
Zone de brousse	40641 (43%)	39972(42%)	10	-668
Zone agricole	31825 (34%)	32849(35%)	10	1024

En 1992, le paysage se caractérise par un équilibre relatif entre les zones de brousse (43%) et les zones agricoles (34%) et les sols nus (23%). Contrairement à Bitinkodji, les zones de brousse étaient majoritaires.

En 2001, c'est un maintien des sols nus (23%) qui est observé, une faible réduction des zones de brousse (1%) au profit des zones agricoles qui augmentaient de (1%). Contrairement à Bitinkodji, les zones de brousse étaient majoritaires.

De 1992 à 2001, il n'y a pas eu de changement majeur au niveau des superficies de nos trois classes d'occupation de sol à Tientiergou.

Tableau 7 3: Evolution d'états de surface du site de Tientiergou de 2001 à 2014

Tientiergou	Années		Nombre d'années	Dynamique
	Superficies			
	2001	2014		
Sol nu	21257(22%)	16566 (18%)	15	-4691.07 (4%)
Zone de brousse	39972 (41%)	40811(43%)	15	838.98 (2%)
Zone agricole	36701(37)	36701(39%)	15	3852.09 (2%)

En 2014, le paysage se caractérise par une réduction des zones de brousse de 4% au profit des zones agricoles et des zones de brousse qui augmentaient toutes de 2%.

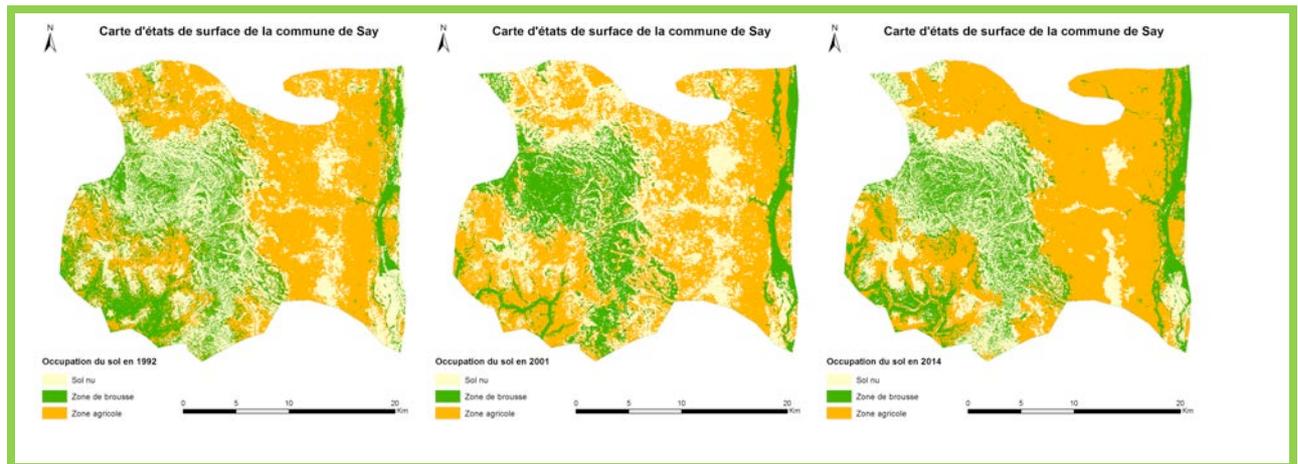


Figure 17 : Cartes montrant l'évolution d'états de surface du site de Tientergou de 1992 à 2014

D'après la figure 17, la tendance est très marquée entre la progression ou la régression des zones de brousse. Bien que nous pourrions pencher pour une légère tendance à l'augmentation de la végétation en 2001. Par contre, on observe une transformation quasi totale des zones de brousse situées à l'ouest en zones agricoles.

En 2014, on observe qu'une partie de cette zone est redevenue zones de brousse. Du côté de la régression nous remarquons que les zones de brousse sont clairsemées par des sols nus par rapport à 2001. Cette densification des zones de brousse pourrait être due à la présence d'herbacé et dont la disparition ou l'apparition dépendrait du volume de pluie, mais aussi de l'exploitation par l'homme (élevage).

Approximativement, nous remarquons que les superficies des différentes zones sont stables sur nos trois cartes.

Mais, l'éclaircissement des zones de brousse observé est plus important au niveau des parties limitrophes de zones agricoles.

Ces résultats montrent que les évolutions des superficies se concentrent essentiellement dans les zones agricoles et les zones de sol nu. Le maintien des superficies des zones de brousse peut être expliqué par la présence de marchés ruraux de bois qui constituent un rempart contre les défrichements agricoles.

1.1.3 Site de Banizoumbou

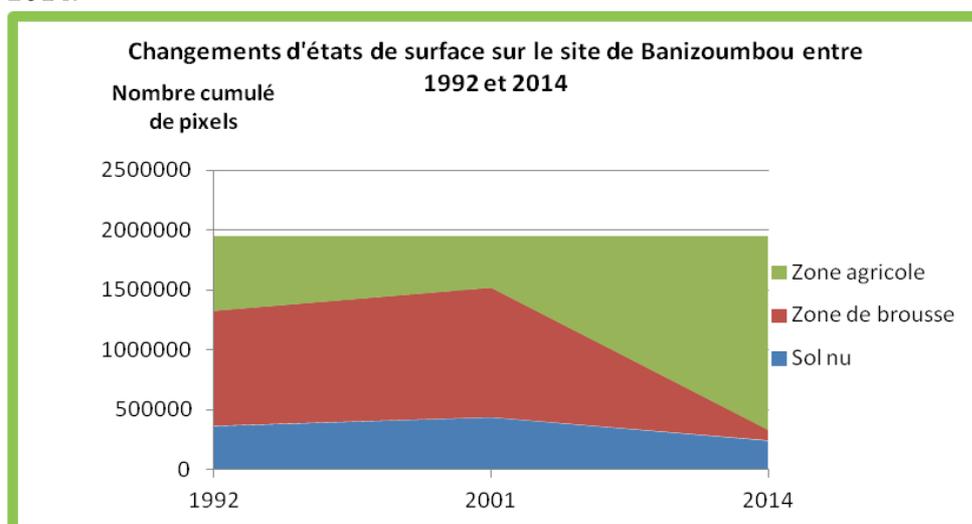
L'application sensu stricto des seuils déterminés par l'analyse statistique aboutit aux résultats synthétisés dans les Tableaux 8, 9 et 10.

Le Tableau 8 représente l'évolution brute de la classification entre les deux dates 1992, 2001 et 2014, tandis que les Tableaux 9 et 10 représentent l'évolution relative du nombre de pixels transformés d'une classe à l'autre entre 1992 et 2001 et entre 2001 et 2014.

Tableau 8 : Evolution brut du nombre de pixels par classe d'occupation des sols de 1992 à 2014

Classes	1992	2001	2014
Sol nu	32867 (19%)	39341(22%)	21903 (12%)
Zone de brousse	86798 (49%)	97751 56%)	8141 (5%)
Zone agricole	56304(32%)	38876(22%)	145924 (83%)
Total	175968	175968	175968

A partir du tableau8, la figure18 ci-après est établie pour une meilleure interprétation des différences des superficies des classes d'occupation du site de Banizoumbou entre 1992 et 2014.

**Figure 18 : Changements d'états de surface du site de Banizoumbou entre 1992 et 2014****Tableau 9 : Evolution d'états de surface du site de Banizoumbou de 1992 à 2001**

Tientiergou	Années	Nombre d'années	Dynamique
	Superficies		
Classes	1992	2001	
Sol nu	32867 (19%)	39341(22%)	6474 (3%)
Zone de brousse	86798 (49%)	97751 56%)	10953 (7%)
Zone agricole	56304(32%)	38876(22%)	-17427(10%)

En 1992 (tableau8 et figure18), le territoire communal se caractérise par une très grande étendue de zones de brousse (49%). Les zones agricoles représentaient 32%. La superficie dépourvue de végétation (sol nu) était très réduite (19%). Comme à Tientiergou, la zone de brousse était majoritaire.

De 1992 à 2001, on enregistre une augmentation des superficies des sols nus de 3% et de la superficie occupée par les zones de brousse (7%) au détriment des zones agricoles qui ont connu une réduction de 10%.

Partie 3 : Résultats

La tendance générale de l'évolution entre 1992 et 2001 sur la zone de Banizoumbou fait apparaître une augmentation des sols nus et des zones de brousse et une diminution des zones agricoles.

Ce phénomène peut être dû aux pratiques de la jachère très développées par les projets et programmes ayant intervenu dans la zone.

Tableau 10 : Evolution d'états de surface du site de Banizoumbou de 2001 à 2014

Banizoumbou	Années		Nombre d'années	Dynamique
	Superficies			
Classes	2001	2014		
Sol nu	39341(22%)	21903 (12%)	15	-17438 (10%)
Zone de brousse	97751 (56%)	8141 (5%)	15	-105892 (41%)
Zone agricole	38876(22%)	145924 (83%)	15	107048 (41%)

En 2014 (tableau8 et figure18), on observe une recomposition du paysage ayant entraîné une diminution des superficies de sols nus de 10% et des zones de brousse de 41% au profit des zones agricoles qui ont augmenté de 41%. Contrairement à Tientiergou, les agricoles étaient majoritaires.

De 2001 à 2014 (tableau10), on enregistre une disparition quasi totale de la zone de brousse qui passe de 56% à 5% soit une diminution de 51% en 15 ans.

Au final, en 15 ans l'essentiel de zones de brousse est défrichée puisque la surface occupée par les zones agricoles est passée de 22% à 83% soit une augmentation de 61% Ce phénomène peut s'expliquer par la surexploitation du bois et les défrichements agricoles.

Contrairement aux sites de Bitinkodji et Tientiergou, les zones de brousse de Banizoumbou sont celles qui ont connu la plus grande transformation et risquent de disparaître si des dispositions ne sont pas prises.

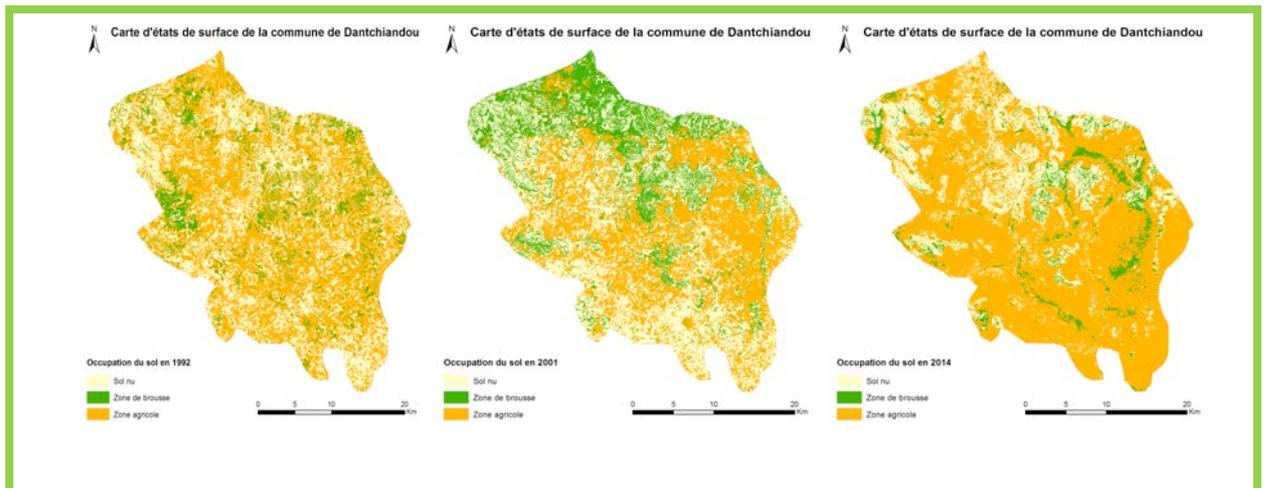


Figure 19 : Cartes montrant l'évolution d'états de surface du site de Tientiergou de 1992 à 2014

Selon la figure 19, la carte d'états de surface de 2001 montre une forte proportion des zones de brousse, mais clairsemées par endroits par des sols nus.

Contrairement aux cartes de 1992 et 2014 la différence est très marquée entre la progression ou la régression des zones de brousse.

En 2014, nous remarquons une transformation quasi-totale des zones de brousse en zones agricoles. Ce phénomène peut s'expliquer par la conquête des nouvelles terres, les terres anciennement cultivées étant devenues très pauvres.

1.2 Analyse des résultats de la méthode de grille de points

Nous n'avons pu calculer l'évolution du couvert végétal en 1992 par manque d'archives d'images lisibles sur Google Earth qui couvrent l'année.

1.2.1 Evolution du taux de couverture végétale du site de Bitinkodji de 2001 à 2014

L'analyse des taux de couverture végétal moyen résultant des calculs de données obtenues au niveau de trois échantillons sur chaque classe (zone) permet d'identifier les différentes dynamiques tableau 11 et figure 20.

Tableau 11 : Evolution du taux de couverture végétale de Bitinkodji de 2001 à 2014

Site	Zones	Années	Sol nu (%)	Végétation (%)
Bitinkodji	Zones de brousse	2001	34	66
	Zone de brousse	2014	46	54
	Zone agricole	2001	62	38
	Zone agricole	2014	74	25

A partir du tableau ci-dessus, le diagramme ci-après est reproduit pour une meilleure interprétation des différences de taux de couverture végétale entre 2001 et 2014.

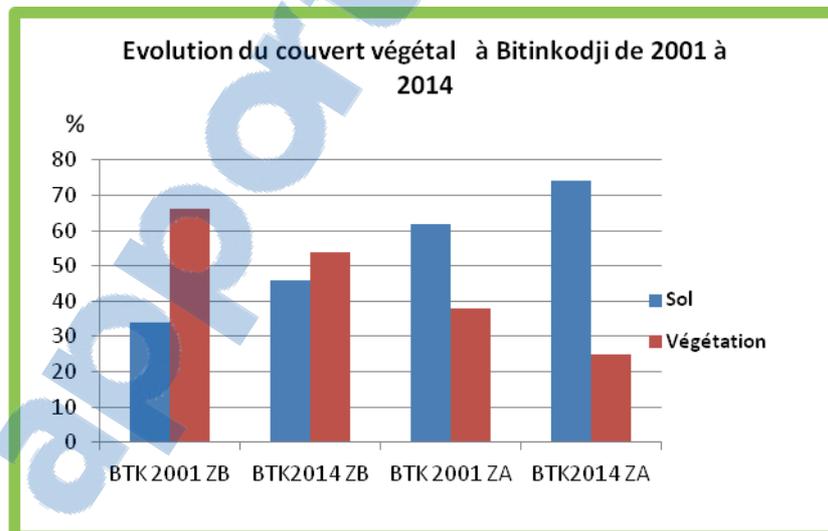


Figure 20 : Evolution du couvert végétal au niveau de Bitinkodji de 2001 à 2014

L'analyse du tableau ci-dessus et de la figure 20 révèle une dynamique régressive de la végétation en zone de brousse (ZB) et en zone agricole (ZA).

- Le taux de couverture végétale en zone de brousse estimé à 66% en 2001 est passée à 54% en 2014 soit une régression de 12% ;

- Le taux de couverture végétale en zone agricole estimé à 38% en 2001 est passé à 25% soit une diminution de 13%.

1.2.2 Evolution du taux de couverture végétale du site de Tientiergou de 2001 à 2014

L'analyse des taux de couverture végétal moyen résultant des calculs de données obtenues au niveau de trois échantillons sur chaque classe (zone) permet d'identifier les différentes dynamiques (tableau12 et figure 21).

Tableau 12 : Evolution du taux de couverture végétale de Tientiergou de 2001 à 2014

Site	Zones	Années	Sol nu (%)	Végétation (%)
Tientiergou	Zone de brousse	2001	25	75
	Zone de brousse	2014	45	55
	Zone agricole	2001	82	18
	Zone agricole	2014	65	35

A partir du tableau12, la figure21 est reproduite pour une meilleure interprétation de l'évolution du taux de couverture végétale de 1992 à 2014.

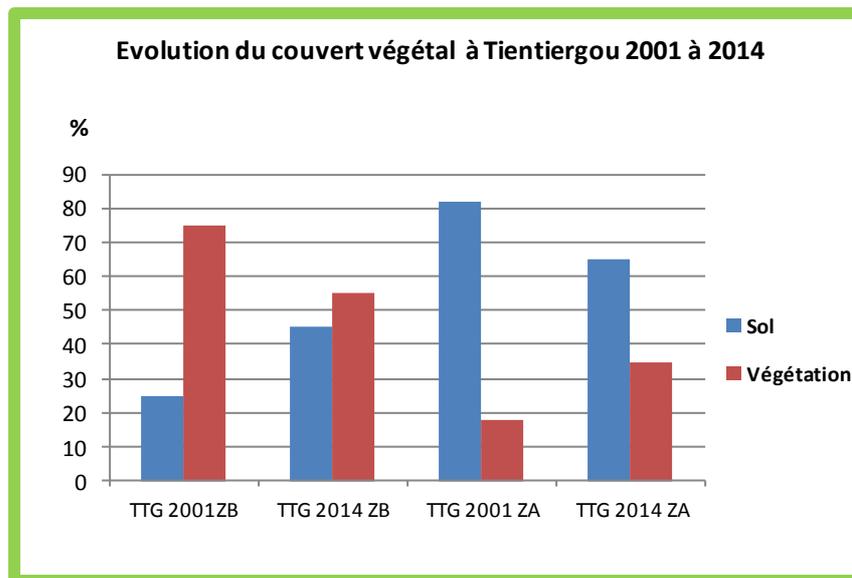


Figure 21 : Evolution du couvert végétal au niveau de Tientiergou de 2001 à 2014

D'après le tableau12 et la figure 21, nous dégageons les constats suivants :

- Le taux de couverture végétale en zone de brousse (ZB) a connu une dynamique régressive. Il est passé de 75% en 2001 à 55% en 2014 soit une diminution de 20% en 15 ans.
- Le taux de couverture végétale en zone agricole (ZA) a connu une dynamique progressive. En 15 ans, il a plus que doublé passant de 18% à 35% soit une augmentation de 17%.

1.2.3 Evolution du taux de couverture végétale du site de Banizoumbou de 2001 à 2014

L'analyse des taux de couverture végétal moyen résultant des calculs de données obtenues au niveau de trois échantillons sur chaque classe (zone) permet d'identifier les différentes dynamiques tableau13 et figure 22.

Tableau 13 : Evolution du taux de couverture végétale de Banizoumbou de 2001 à 2014

Site	Classes	Années	Sol nu (%)	Végétation (%)
Banizoumbou	Zone de brousse	2001	42	58
	Zone de brousse	2014	74	26
	Zone agricole	2001	28	72
	Zone agricole	2014	52	48

A partir du tableau ci-dessus, le diagramme ci-après est reproduit pour une meilleure interprétation des différences de taux de couverture végétale entre 1992 et 2014.

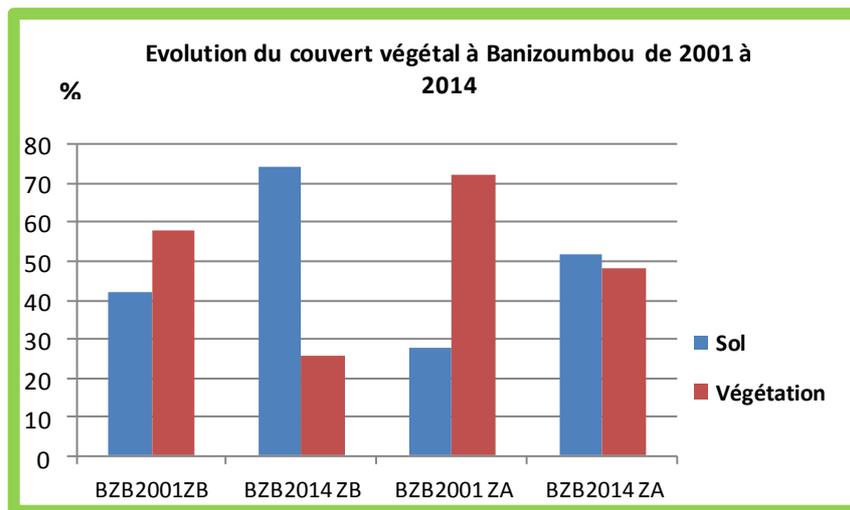


Figure 22 : Evolution du couvert végétal au niveau de Tientiergou de 2001 à 2014

L'analyse du tableau 13 et de la figure 22 révèle une dynamique régressive de la végétation en zone de brousse (ZB) et en zone agricole (ZA).

- Le taux de couverture végétale en zone de brousse estimé à 58% en 2001 est passée à 26% en 2014 soit une diminution de 32% en 15ans ;
- Le taux de couverture végétale en zone agricole estimé à 72% en 2001 est passé à 48% soit une baisse de 24% en 15ans.

La dynamique du taux de couverture végétale au niveau des différents sites est très variable d'une zone à l'autre et suivant les années.

Du point de vue, production de la biomasse au niveau de nos trois sites d'étude, globalement c'est une tendance à la dégradation des zones de brousse qui est observée.

Cette tendance est mise en évidence par les résultats des travaux de Leroux et al. 2015 figure 23.

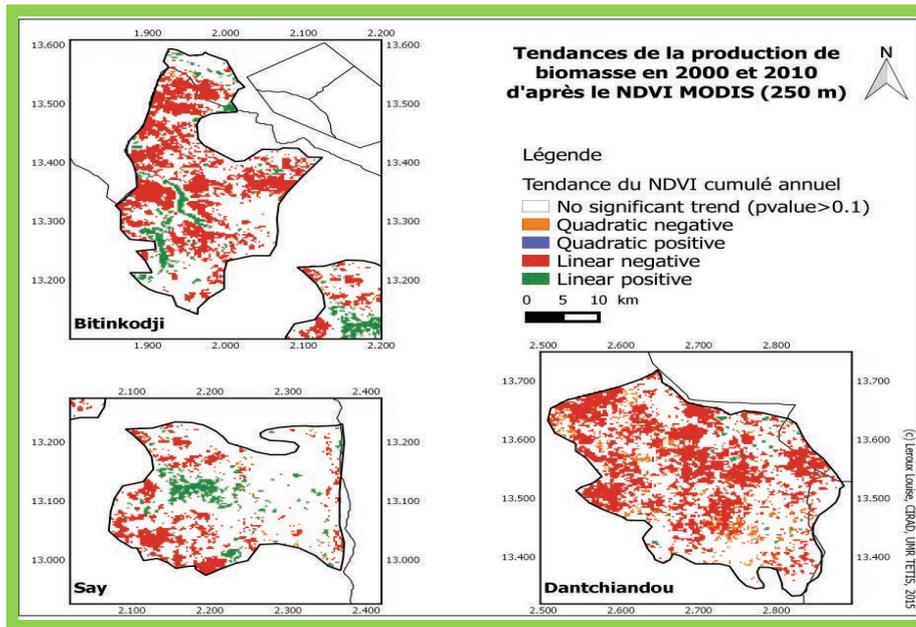


Figure 23 : Tendances de la production de biomasse de 2000 à 2010 (Leroux et al. 2015, in prep)

1.3 Analyse comparative des taux de couverture végétale

L'analyse des différents taux de couverture végétale des trois sites permet de dégager plusieurs constats :

Au niveau des zones de brousse :

- En 2001, le taux de couverture est de 66% (Bitinkodji), 75 % (Tientiergou) et 58% (Banizoumbou). Sur cette base, on peut conclure que les zones de brousse de Tientiergou restent les plus couvertes en végétation.
- En 2014, le taux de couverture passe à 54% (Bitinkodji) soit une diminution de 12%, à 55% (Tientiergou) soit une réduction de 20% et à 26% (Banizoumbou) soit une baisse de 29%.

Au niveau de ces trois sites d'étude (Bitinkodji, Tientegou et Baniszoumbou), le couvert végétal au niveau des zones de brousse reste profondément bouleversé.

Les formations contractées des plateaux sont en forte régression (figure23). La brousse tigrée typique a laissé place à des plateaux largement dénudés (sol nu 74% à Banizoumbou) où se développe désormais une steppe arbustive très clairsemée communément appelée brousse tigrée dégradée et brousse tigrée très dégradée. Cette régression est plus marquée au niveau de Banizoumbou où le taux de couverture végétale n'est que de 26%.

Au niveau de Bitinkodji, même si la situation n'est pas aussi catastrophique que l'on pourrait le penser. Cependant des inquiétudes demeurent quant au sort que réserve l'avenir à la zone de brousse menacée par le phénomène de l'étalement urbain de la ville de Niamey. Actuellement, le couvert forestier représente 54% en 2014 contre 66% en 2001.

En effet, chaque année c'est plusieurs opérations de lotissement qui sont conduites pour l'installation des nouveaux établissements (usines, centrale, magasins de stockage).

Par rapport à Tientiergou, le massif forestier (zone de brousse) est en train de se dégrader par endroits. Mais, Le taux de couverture végétale est appréciable encore (55%) en 2014.

La tendance entre 2001 et 2014 est visiblement à la régression de la végétation. Cette régression est la plus marquée à Banizoumbou et Tientiergou.

Les conditions climatiques n'expliquent que partiellement les dégradations de ces zones, parce que les formations contractées sont particulièrement résilientes aux conditions écologiques difficiles, du fait de leur fonctionnement hydrique particulier. L'originalité de ces formations est que leur fonctionnement hydrique repose sur une alternance de zones nues recouvertes de croûtes imperméables et de zones boisées qui ont une bonne capacité d'infiltration notamment grâce à l'activité de la macro-faune (termites) (JMK Ambouta, 1984, 1997). Les zones nues jouent un rôle d'impluvium pour les bandes boisées. L'eau qui ruisselle sur les zones nues alimente directement grâce à la pente, les bandes de végétation, qui bénéficient ainsi d'un apport en eau supérieur à celui des seules précipitations. Elles sont généralement en équilibre dynamique avec les variations du climat (J M K Ambouta, 1984). Les causes de cette dégradation sont donc à rechercher parmi les influences anthropiques.

En effet, ces terroirs dont les populations sont essentiellement des agropasteurs, la brousse tigrée constitue un élément majeur des systèmes d'élevage. Elle est pâturée sans discontinuité de juillet en avril et constitue le lieu de retrait des animaux en saison pluvieuse.

Une autre forme de pression ; le prélèvement du bois à travers le défrichement et la coupe incontrôlée de bois pour le ravitaillement de Niamey en bois-énergie et de service. Cette activité est devenue un enjeu économique et financier (Sidikou, 1997). Ces zones étant proche de Niamey, elles jouent un rôle important pour son ravitaillement.

Concernant particulièrement le bois de feu, le plan national de lutte contre la désertification a évalué en 1990, les besoins des populations nigériennes en combustible de la manière suivante :

- ✓ Les grands centres urbains : 0.6 kg / personne / jour ;
- ✓ Les villes moyennes : 0.7 kg /personne / jour ;
- ✓ Les zones rurales : 0.8 / kg / personne / jour.

Par rapport aux zones agricoles, les taux de couverture végétale observés en 2001 sont 38%, 18% et 72% respectivement à Bitinkodji, Tientiergou et Banizoumbou. Sur cette base, les zones agricoles du site Banizoumbou restent les plus boisées, suivies de celles de Tientiergou.

En 2014, le couvert forestier enregistré est de 25% à Bitinkodji, 35% à Tientiergou et 48% à Banizoumbou. Avec ce taux de recouvrement ligneux moyen de 48%, les zones agricoles de Banizoumbou passent pour être les plus couvertes en végétation des trois sites.

Mais les grandes tendances d'évolution de cette unité sont à l'augmentation du couvert végétal au niveau du site de Tientiergou et à la diminution de celui-ci au niveau de Bitinkodji et Banizoumbou.

Au niveau de Bitinkodji, la réduction du couvert peut trouver son explication au niveau de la double influence des facteurs climatiques et des divers impacts anthropiques. Mais, des poches de peuplement relativement denses existent dans les zones stratégiques (vallées, bas-fonds, bord du fleuve) encore mais sont moins étendues.

Par rapport à Banizoumbou, la cause de la régression du couvert forestier peut aussi être due à l'exploitation du bois dans les champs, le bois exploitable étant devenu rare dans les zones de brousse.

Enfin, s'agissant de Tientiergou le rétablissement de la végétation dans les zones agricoles peut se justifier par le transfert quasi total de l'exploitation du bois vers les zones de brousse toujours productives.

Partie 4 : Discussion

Le paysage de Bitinkodji, Tientergou et Banizoumbou s'est structuré depuis 1992 sous l'influence de plusieurs facteurs au nombre desquels le climat, la croissance démographique et les modifications induites par l'homme à travers ses pratiques de gestion des ressources naturelles.

Le climat et la croissance démographique associés aux modes d'exploitation du milieu rural agissent pour déterminer un gradient nord-sud de différenciation et de dégradation des unités de végétation.

Ainsi, par rapport à nos questions de départ sur chaque site, les résultats les confirment sauf à Tientergou.

En effet, à Tientergou, l'exploitation forestière actuelle n'a pas engendré la dégradation de la brousse comme relatée lors des enquêtes par les populations (annexe rapport de mission terrain). Elle a surtout provoqué une transformation des parties en bordure des zones agricoles en zone de brousse régulière dégradée, qui sont de fois défrichées pour être transformées par la suite en zones agricoles. Ces résultats sont en accord avec ceux fournis par la littérature. En effet, (Hassan, 2010) notait déjà que la brousse tigrée régulière qui couvre la plus forte proportion, 82 % en 1989 a connu une diminution de sa superficie de plus de 68 % environ. Par contre, selon le même auteur, la brousse tigrée dégradée a évolué de 770,92 ha en 1989 (18,09%) à 3 607,98 ha (84,68%) en 2010, soit une augmentation de 66,59%.

Par rapport à Banizoumbou plus spécifiquement, les témoignages des populations recueillis sur l'état actuel des brousses valident les tendances observées par satellite. En effet, « La brousse a disparu »; cette phrase est revenue régulièrement dans tous les entretiens. On observe de grandes étendues de plages nues par endroit.

Les espèces qui existent encore, en majorité composées de combrétacées, sont menacées, car les populations exploitent parfois abusivement. A l'inverse, les zones agricoles se sont continuellement ré végétalisées.

Notre étude met donc en évidence deux processus antagonistes :

- d'une part, une tendance naturelle à la reforestation des zones agricoles certainement due aux pratiques de la RNA ;
- et d'autre part une pression anthropique qui a entraîné progressivement la dégradation des brousses tigrées typiques et leur conversion en zones de brousse tigrée dégradée voire très dégradée.

La méthode par caractérisation de la structure des zones pour évaluer le couvert végétal proposée permet de quantifier les évolutions de la végétation sur les formations contractées connues sous le nom de brousse tigrée au travers de l'utilisation d'un indice de végétation pertinent : le PVI. Cependant si la relation entre indices de végétation et densité du couvert forestier a été mise en évidence sur de nombreux sites, elle reste néanmoins délicate à établir et elle reste spécifique de chaque zone, notamment car elle est très sensible aux paramètres du sol. D'autre part, la mise en relation de l'évolution du couvert végétal en zone de brousse et en zone agricole reste à établir de manière plus approfondie. Des étalonnages supplémentaires, sur d'autres zones dans le bassin de Niamey seraient nécessaires pour valider la démarche et pour envisager son extension.

La méthode de grille de points que nous avons utilisée pour évaluer le taux de couvert forestier semble donner des résultats satisfaisants car ils sont en bon accord avec les données collectées et les observations sur le terrain.

Toutefois des questions subsistent :

La méthode a été appliquée au niveau de trois communes seulement sur 52 qui renferme le bassin d'approvisionnement en bois –énergie de Niamey.

Qu'en est-il de la fiabilité de nos résultats à l'échelle du bassin ?

Dans quelle mesure, nos échantillons des zones invariables ont-ils été bien identifiés ? Nous saurions le dire mais la classification par seuillage des indices de végétation a permis de bien discriminer les zones de brousse des zones agricoles. Les zones invariantes peuvent avoir des valeurs d'indice très proches (Figure 11). Toujours dans ce sens, l'on ne saurait écarter l'éventualité de la présence des classes de zones agricoles dans les classes de zones de brousse (courte jachère), même si elles ont une réflectance plus faible dans le PIR que ces dernières. L'acquisition des images à la même date pourrait nous édifier sur cette question.

Enfin, l'étude a aussi mis en évidence que les données satellitaires haute résolution, comme celles des satellites Landsat, sont bien adaptées à l'évaluation de l'évolution de la végétation contractée (brousse) et de végétation en zone agricole.

L'étude montre que la méthode est facilement reproductible pour un coût raisonnable et que l'intervalle de 10-14 ans est pertinent pour dégager les grandes tendances des évolutions du couvert forestier sous forte influence anthropique. Une telle méthode appliquée sur un ensemble représentatif de sites permettrait aisément de suivre la dynamique du couvert forestier à l'échelle du bassin d'approvisionnement en bois –énergie de Niamey.

Conclusion et Perspectives

La dynamique du couvert végétal qui a caractérisé les sites étudiés de 1992 à 2014 est très prononcée. Dans le contexte du changement climatique et de l'augmentation de la pression démographique, la compréhension et le suivi de l'évolution de l'état des surfaces de la végétation est un enjeu crucial pour les populations qui vivent et dépendent de ces ressources et pour les décideurs.

L'analyse comparative entre nos trois sites d'étude a permis de mettre en évidence des différences de caractéristiques moyennes des évolutions de couvert forestier entre les zones de brousse et les zones agricoles. Si ce résultat n'est pas surprenant, il confirme cependant que la méthode mise en place permet de quantifier ces différences et est donc susceptible d'apporter des informations pertinentes pour l'étude du lien entre taux de couverture végétale, exploitation forestière et pratiques de gestion des populations. Les analyses des résultats par la méthode de caractérisation des structures de zone apportent déjà quelques éclairages sur les évolutions comparées des sites. Ainsi il est constaté, sur la période 1992-2001, que la tendance générale au niveau des trois sites est au maintien des zones de brousse plus exposées à l'exploitation. Par contre, pour la période suivante (2001-2014), une tendance à la dégradation est observée en zones de brousse, alors que des reforestations sont constatées en zones agricoles.

Sur le terroir communal de Bitinkodji, les axes de défrichement sont principalement dus à la proximité de la ville de Niamey qui s'étale chaque jour sur la commune.

Dans la zone de Tientergou, l'exploitation de la zone de brousse pendant 25 ans a permis à cette zone de se conserver ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle les marchés ruraux de bois constituent un rempart contre le défrichement agricole.

Par rapport à Banizoumbou, nous notons une dégradation quantitative et qualitative de la zone de brousse tigrée. A l'inverse c'est la densification forestière qui est observée dans les zones agricoles à cause des pratiques de la RNA.

L'estimation de la végétation, et plus encore le taux de couverture, avec des indices de végétation, est indirecte et nécessite une validation pour chaque type de zone. Ces relations ne seront pas transposables en dehors des sites d'étude sans contrôles sur le terrain.

Par rapport aux méthodes traditionnelles d'évaluation des potentialités forestières (photographies aériennes, terrain, cartographie), la télédétection apporte donc une information cartographique fiable et rapide au niveau des grandes zones. Elle constitue, pour les services forestiers nationaux, un outil de suivi et de gestion du milieu, adapté à l'évolution rapide des conditions environnementales du Niger. Les résultats qualitatifs (indices de végétation et taux de couverture) apportent un élément pour l'élaboration des stratégies d'exploitation et de gestion.

En effet, ces nouvelles données peuvent être intégrées dans les préparatifs des opérations d'inventaire forestier au niveau des formations forestières contractées. Il s'agit de croiser les faciès de végétation avec le taux de couverture végétale et les indices de végétation pour déterminer la richesse locale du faciès en question. Il serait donc intéressant de moduler les résultats de l'inventaire à l'intérieur de chaque faciès au lieu de les généraliser. Pour ce faire, une typologie des brousses est nécessaire en fonction de la valeur du NDVI. A ce propos, nous proposons l'utilisation de trois classes : brousse tigrée dense (NDVI fort), brousse tigrée moyenne (NDVI moyen) et brousse tigrée dégradée (NDVI faible). Cette nouvelle approche peut être déjà testée par FONABES dans le cadre des travaux d'inventaire pour l'élaboration des schémas directeurs d'aménagements communaux des communes cibles.

Références

- Ambouta Karimou. JM, 1984** : Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest-nigérien. Thèse de doctorat de 3ème cycle, université de Nancy, 116p.
- Amadou B., 2005**. La Stratégie Energie Domestique du Niger: concept et opérationnalisation, groupe d'apprentissage sur la gouvernance des ressources forestières, 48 p.
- Bakary Djaby. 2010**. Modélisation spatiale des flux organiques et minéraux assurant la productivité durable des systèmes culture-élevage dans le sahel nigérien. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, août 2010, 388 pag;
- B. Mougenot et S. Hamani, 1997**. Possibilité de classification des formations contactées à partir de la télédétection aérienne et satellitaire. Exemple de l'ouest nigérien In: D'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens - Paris :J. Libbey Eurotext, 1997, pag 59-68.
- CENTRE REGIONAL D'ENSEIGNEMENT SPECIALISE EN AGRICULTURE. 2006**. impacts des investissements dans la gestion des ressources naturelles (GRN) au Niger : rapport de synthèse. Université de Niamey, Niger, septembre 2006, 65pag.
- CIRAD, 2014**. Rapport de mission : lancement des travaux de cartographie de la ressource, dans le cadre de l'étude : Elaboration des Schémas Directeurs d'Approvisionnement en Combustibles Domestiques des Centres Urbains de Maradi et Zinder et Elaboration d'un Programme National Energies Domestiques, 24p.
- Defourny P. 1992**. Contribution aux méthodes d'évaluation et de suivi par télédétection satellitaire de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Catholique de Louvain, janvier 1992, 270pag.
- Diello P. et al. 2005**. Relations indices de végétation-pluie au Burkina Faso : cas du bassin versant du Nakambé. In : Hydrological Sciences Journal – des sciences Hydrologiques 50(2), 207-221p.
- Djibo H., Montagne P., 1997**. L'aménagement villageois sylvo-pastoral de la formation de brousse tachetée de Tientergou (arrondissement de Say, Niger), In: D'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens - Paris : J. Libbey Eurotext, 1997, Pp 203-215.
- Faran O.M., 2005**. Évolution de la végétation et du modelé dans l'Ouest du Niger : région de Zarmaganda » in *Lawali Dambo, Emmanuel Reynard (Eds). Vivre dans les milieux fragiles : Alpes et Sahel*. Université Abdou Moumouni, Département de Géographie et Université de Lausanne, Institut de Géographie. Travaux et recherches n°31.
- Garba I., 2000**. Inventaire des ligneux sur image haute résolution. Mémoire de fin d'études DESS (CRESA) Faculté d'Agronomie Université Abdou Moumouni. 58 p.
- Glemas P. 2007** Pertinence des données MODIS VCF au Mali. Mise en place d'une validation des taux de couvert forestier, Mémoire d'études en Agronomie approfondie, Sup Agro, Montpellier France, 62. pag.

-
- Hassane B., 2013.** Evaluation de la participation des communautés aux actions de récupération des terres dans la commune de Say : cas du terroir de Tientergou, mémoire de Mastère, CRA, 73 p.
- Hamma H., 2014.** Problématique de la gestion communautaire des massifs forestiers au Niger : cas du massif forestier de Tientergou. Mémoire de Mastère gestion intégrée des ressources en eau et environnement, Centre Régional Agrhymet de Niamey, 71p.
- Yvon-Carmen Houéhanou Hountondji Y.C.H, 2008.** Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Liège, 153p.
- I. Aboubacar, 1995 :** Etude de la productivité des formations forestières de brousse tigrée et de brousse diffuse : conséquences pour la gestion et la régénération de ces formations. Mém. IPR de Katibougou spécialité Eaux et Forêts : 161p.
- I. ABOUBACAR, 1996.** Productivité de la brousse tigrée dans l'Ouest du Niger. Dip.DEA.
- I.Aboubacar., 2000.** Dynamique de la croissance et productivité des structures forestières contractées des plateaux de l'Ouest du Nigérien. Thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse III, 231 p.
- Idrissa S. A., 2006.** Cartographie de l'occupation des sols de la vallée du fleuve Niger de Karma à Say et analyse de la dynamique de changements intervenus entre 1975-2005. Mémoire de DEA géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Abdou Moumouni de Niamey, 151p.
- Kanembou L., 2006.** Processus d'ensablement des cuvettes dans la région de Gouré et suivi de la dynamique par télédétection. Mémoire de maîtrise, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Abdou Moumouni de Niamey, 118p.
- Gazull L. 2007.** Bois-énergie et déforestation au Mali. Mesure de l'impact de l'exploitation forestière dans le bassin d'approvisionnement de Bamako, 25pag.
- Leroux, L., Bégué, A., Lo Seen, D., Jolivot, A., Kayitakire, F., 2015.** From regional to local scale: Toward a better understanding of recent biomass productivity dynamics and its drivers to support food security policies in the Sahel. (in prep).
- Larwanou M., Adamou M. M., Mahaman L. R., Danguimbo I., 2012.** Contribution de la Régénération Naturelle Assistée des ligneux dans l'approvisionnement en bois des ménages dans le département de Magaria (Niger), 13p.
- Loireau M., 1993.** Dynamique d'un paysage sahélien au Niger : bilan paysage entre la production primaire et l'utilisation des ressources par les groupes sociaux et des ressources à l'aide de la télédétection spatiale haute résolution. Mémoire de DEA.130 p.
- Loireau M., d'Herbes J.M., 1996.** Cartographie des unités d'occupation des terres du Super Site Central Est (Banizoumbou) du programme Hapex-Sahel - Eds. Hoepffner M., Lebel T., Monteny B., Interactions surface continentale/atmosphères : l'expérience Hapex-Sahel. Actes des Xe Journées Hydrologiques, Montpellier, 14-14 nov. 1994. Editions ORSTOM, Paris 1996 : pp 105-122.

-
- Mamane M.B.O., 2012.** Mise en œuvre de la Stratégie Energie Domestique : Etat des lieux de la consommation des ménages en énergies domestiques dans la ville de Niamey (Niger). Mémoire Master es Sciences Agronomiques, CRESA de Niamey, 89p.
- Mougenot B., Hamani S., 1997.** Les possibilités de classification des formations contractées à partir de la télédétection aérienne et satellitaire. Exemple de l'ouest nigérien. In : Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens. J.M. d'Herbès ; J.M.K. Ambouta ; R. Pelter John Libbey Eurotest, 1997, Paris 59-68p.
- Moussa M. S., 2006.** Système d'information (SIG) et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du kori Goubé degré carré du Niger. Mémoire de DEA géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Abdou Moumouni de Niamey, 73p.
- Montagne P., Mamoudou H., 1999.** Dix ans de mise en œuvre de la Stratégie Energie Domestique au Niger : premier bilan. Actes de l'atelier international sur la foresterie communautaire en Afrique; FAO, 26-30 avril 1999 Banjul, Gambie.
- Programme d'Actions Communautaires, 2011 :** Plan de Développement Communal Commune Rurale de Bitinkodji, 86 p.
- Programme d'Actions Communautaires, 2013 :** Plan de Développement Communal Commune Urbaine de Say, 59 p.
- Projet Energie II - Energie Domestique, 1991.** Schéma directeur d'approvisionnement en bois énergie de Niamey, SEED-CTFT, 128p.
- Régis J P., Hélène D., Rainatou G. et, Ichaou A., 2009.** Bilan après quinze ans de gestion communautaire d'une forêt villageoise de l'Ouest nigérien, Article de recherche Sécheresse 2009 ;20 (1e) : e20-e31), Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre la Désertification Niamey Niger, Institut national de recherche agronomique, 12 p.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout particulièrement à Messieurs Laurent GAZULL, Régis PELTIER et Pierre MONTAGNE qui m'ont offert la possibilité de travailler au sein de l'UR BSEF. Leur rigueur scientifique, leurs conseils techniques, leur disponibilité et la confiance qu'ils m'ont accordée ont été des facteurs indéniables de réussite dans ce stage de six mois au CIRAD Baillarguet Montpellier.

Je remercie énormément Jean pierre CHERY, mon tuteur, d'avoir toujours été là pour répondre à mes questions.

Je souhaite également remercier Pierre BAZILE Directeur adjoint de l'UMR TETIS pour toute sa disponibilité du début à la fin de l'année et pour la réussite du Mastère.

Mes remerciements à Louise LEROUX, thésarde à l'UMR TETIS pour ses remarques et/ou propositions particulièrement pertinentes, d'autant qu'elle a toujours été très réactive pour répondre à mes interrogations. Par ailleurs, sa contribution, via des aides méthodologiques a aussi été des apports précieux pour atteindre les objectifs de ce stage.

Monsieur Ibro ADAMOU Directeur Général Adjoint des Eaux et Forêts pour son soutien indéfectible et les multiples informations qu'il m'a fournies dans le cadre de ce travail,

Merci à tous les auditeurs SILAT 2014-2015 d'avoir animé mes pauses avec un forum de copains qui régale.

Plus globalement merci à tout le personnel de la MTD pour leur sens de l'intégration et leur accueil.

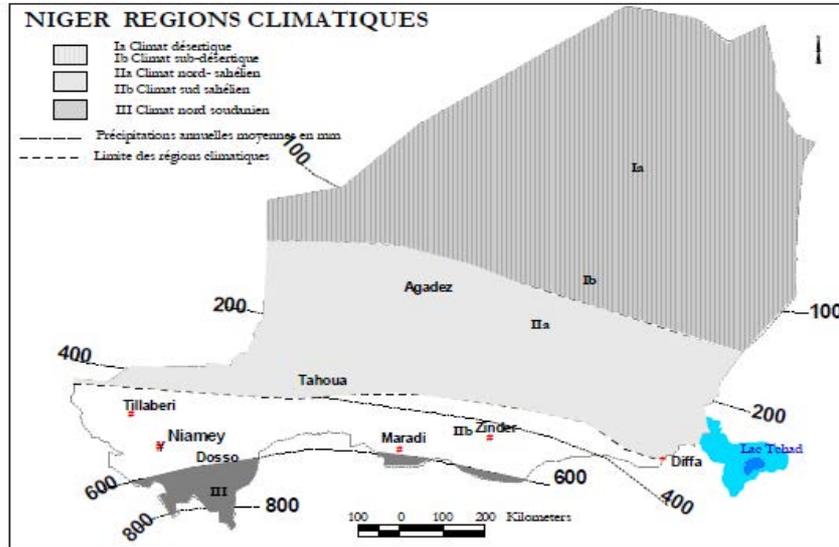
Enfin, mes remerciements aux enseignants et à l'équipe de direction du mastère SILAT pour cette année où savoirs et encouragements ont été prodigués dans la bonne humeur.

SIGLES ET ABREVIATIONS

BM	: Banque mondiale
CIRAD	: Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
FONABES	: Gestion des Forêts Naturelles et Approvisionnement Durable en Bois-Energie des villes du Sahel
CIFOR	: Center for International Forestry Research
GPS	: Global Position System
INS	: Institut National de Statistique
NDVI	: Normalized difference vegetation Index
NOS	: Nomenclature de l'Occupation des Sols
ONFI	: Office National des Forêts International
PVI	: Perpendicular Vegetation Index
RNA	: Régénération Naturelle Assistée
SDA	: Schéma Directeur d'Approvisionnement
SED	: Stratégie Energie Domestique
SVM	: Séparateur à Vaste Marge
TSAVI	: Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index

ANNEXES

Annexe 1 : Zones climatiques du Niger



Source : IGNN 2005

Annexe2 : Photosat du Niger 2006 (les zones les plus végétalisées apparaissent en vert, au Sud-Ouest du pays (forêts sèches), dans les vallées alluviales du Centre-Sud (parcs agroforestiers) et dans la dépression du Lac Tchad, à l'extrême SudEst)



Source : IGNN 2006

Annexe3 : Choix des sites d'étude

SITE DE BANIZOUMBOU

Le site de Banizoumbou est situé dans la commune rurale de Fakara (Dantchandou). Cette commune est localisée entre le 13° 30' et 13° 45' Nord, 2° 35' et 2° 50' Est et couvre une superficie d'environ 1.045 Km² (Issa et al, 2005).

Sur le plan paysager, le territoire communale est constitué des plateaux cuirassés communément appelés brousse tigrée et de zones agricoles dans les vallées. La commune de Dantchandou a fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques depuis les années 1990 (Hiernaux et Ayantude, 2004) à nos jours. Ces interventions scientifiques se sont intéressées à plusieurs questions dont les plus importantes sont le transfert de fertilité, l'agriculture et l'élevage, le climat et l'environnement. Ainsi, plusieurs projets de recherche sont intervenus dans le terroir de Banizoumbou considéré comme le super site de l'IRD (ex ORSTOM). Les plus importants sont TropSoils (1991), EPSAT-SG (‘Estimation des Précipitations par Satellite’, Lebel et al. 1997), HAPEX-Sahel (‘Hydrology Atmosphere Pilot Experiment’, Goutorbe et al. 1997). La recherche sur les systèmes de production par le consortium ILRI-ICRISAT-INRAN (‘International Livestock Research Institute’, ‘International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics’, et ‘Institut National de la Recherche Agronomique au Niger’ respectivement), le PAD (Projet d'aide à la décision-Financement Belgique DGCD), le Projet Changement Climatique (ACDI- AGRHYMET), le Projet Engrais FAO (GCP/NER/041/BEL) et AMMA (‘African Monsoon Multidisciplinary Analysis’, Enfin, les projets JIRCAS (Japan International Research Center for Agricultural Sciences) ou ECLIS, (Elevage, Climat et Société) qui continuent à valoriser les données du terroir de Banizoumbou.

Après plus de 20 ans d'efforts, il est important d'évaluer les impacts de ces investissements scientifiques dans la gestion des ressources naturelles (GRN) en général et de la Régénération Naturelle Assistée (RNA) en particulier. Ainsi, l'analyse des données satellitaires permet-elle de mettre en évidence l'impact de ces investissements scientifiques sur la dynamique du paysage observable ces dernières années ?

SITE DE TIENTERGOU

Le massif de Tientergou, objet de notre étude est situé à 50 km au sud -ouest de Niamey et à 15 km à l'ouest de la ville de Say chef-lieu de la commune. Elle est située entre les longitudes 5°50' et 6°00' Est et les latitudes 14°40' et 14°50' Nord. Elle couvre une superficie de 673 km² représentant 10,35% de la superficie totale du Département de Say.

Pour faire face à l'insuffisance de la gestion par les coopératives forestières, le gouvernement du Niger, appuyé par ses partenaires au développement décida en 1988, d'adopter la stratégie énergie domestique dont les objectifs étaient d'inverser la tendance à la dégradation des ressources forestières et contribuer au bien-être des communautés en luttant contre la pauvreté. Fort de son potentiel en ressources naturelles, de nombreux projets d'aménagement forestier ont intervenu au niveau du terroir de Tientergou. Ainsi, le massif forestier de Tientergou fut l'un des premiers à être aménagé dans le cadre de la stratégie énergie domestique, au début de 1990. Il est constitué par les 31 000 hectares de brousse qui entourent le village, l'un des plus anciens parmi les 22 hameaux limitrophes de la forêt. L'autre composante du paysage est constituée des zones agricoles qui sont des surfaces cultivées d'étendues variables situées à proximité des centres urbains, des villages ou le long des routes.

ANNEXES

Après une vingtaine d'année d'exploitation, il serait légitime de se demander si l'exploitation de la forêt à travers les marchés ruraux de bois a contribué à la modification du paysage de cette forêt.

Ainsi, l'analyse par télédétection permet-elle de préciser la question du rôle de l'exploitation du bois sur l'évolution du couvert végétal de Tientergou ?

SITE DE BITINKODJI

La Commune de Bitinkodji est située dans le degré carré de Niamey et sur la rive droite du fleuve Niger à 30 km au Sud-Ouest de Niamey. Son relief est caractérisé essentiellement par des plaines et des glacis utilisés pour les cultures, des plateaux (zone de brousse) et des vallées ou bas-fonds (zone agricole) creusés par des cours d'eau temporaires appelés localement Koris.

Les plateaux, composante importante du paysage sont constitués des terres dégradées. Le couvert végétal est en majorité composé d'épineux et est dominé par les acacias et balanites issus des reboisements et de la régénération naturelle dans les bas-fonds et les terres dunaires.

L'exploitation du bois est très développée mais elle se fait de manière anarchique et incontrôlée par la filière animalière. En outre, le surpâturage, lié à la sédentarisation des ethnies nomades, continue de favoriser la désertification.

Dans l'ensemble, les formations végétales ont subi de fortes dégradations tant anthropiques que naturelles liées à la forte pression de la demande en bois de chauffe de la ville de Niamey.

La situation par rapport aux axes de circulations permet d'expliquer certains défrichements et la façon dont les ressources ligneuses sont exploitées.

En effet, la proximité de Niamey, la présence des routes, des couloirs de passage sont autant de facteurs qui jouent sur le recul ou la densification du couvert ligneux.

Ainsi, l'analyse des images satellites Landsat permet-elle de préciser la question du rôle de la proximité de la ville de Niamey et l'impact de l'exploitation du bois sur l'évolution du couvert végétal?

Annexe 4 : Caractéristiques des capteurs Landsat TM, ETM+ et OLI

Capteurs	Résolution spectrale (µm)	Résolution spatiale (m)	Dates d'acquisition
Landsat TM	0.45 - 0.52 (bleu)	30	
	0.52 - 0.60 (vert)	30	
	0.63 - 0.69 (rouge)	30	18 Septembre 1992
	0.76 - 0.90 (PIR)	30	25 Septembre 1992
	1.55 - 1.75 (MIR)	30	
	10.40-12.50 (IRT)	120	
	2.08 - 2.35 (IRM)	30	
Landsat ETM+ SLC-on	0.45-0.52 (bleu)	30	
	0.52-0.60 (vert)	30	
	0.63-0.69 (rouge)	30	20 octobre 2001
	0.77-0.90 (PIR)	30	18 septembre 2001
	1.55-1.75 (MIR)	30	

ANNEXES

Capteurs	Résolution spectrale (μm)	Résolution spatiale (m)	Dates d'acquisition
	10.40-12.50 (IRT)	60	
	2.08-2.35 (IRM)	30	
	0.52-0.90 (PAN)	15	
Capteurs	Résolution spectrale (μm)	Résolution spatiale (m)	Dates d'acquisition
Landsat OLI	0.450-0.51 (bleu)	30	
	0.53-0.59 (vert)	30	
	0.64-0.67 (rouge)	30	
	0.85-0.88 (PIR)	30	
	1.57-1.65 (MIR1)	30	09 octobre 2014
	2.11-2.29 (MIR2)	30	16 octobre 2014
	0.50-0.68 (PAN)	15	
	1.36-1.38 (CIRRUS)	30	
	10.60-11.19 (IRT1)	100*(30)	
	11.50-12.51 (IRT2)	100*(30)	

Annexe 5 : Analyse de la qualité de la classification des sites en 2014

La précision des classifications obtenues a été évaluée à travers l'utilisation d'une matrice de confusion. Un indice de validation de la classification a été aussi employé. Il s'agit de l'indice de Kappa. Il caractérise le rapport entre les pixels bien classés et le total des pixels sondés (SKUPINSKI et al. 2009). De plus, une étude portant sur l'occupation des terres peut être validée si l'indice de Kappa est compris entre 50% et 75% (PONTIUS, 2000).

- SITE DE BITINKODJI

Tableau 1 : Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test (en ligne)

Bitinkodji 2014	Sols nus	Zones de brousse	Zones agricoles	Total	Erreur d'omission (%)
Sols nus	217	1	12	230	5
Zones de brousse	1	363	37	401	10.46
Zones agricoles	3	0	316	319	0.9
Total	221	364	365	950	
Erreur d'excédent(%)	1.8	0.27	15.5		16.36

ANNEXES

Il y a 13 pixels de sols nus mal classés dont 1 en zones de brousse et 12 en zones agricoles. Par contre 38 pixels de zones de brousse sont classés en zones agricoles (37) et en sol nu (1). Alors que 3 pixels seulement des zones agricoles sont classés sols nus. La classification sous-estime donc la ressource ligneuse dans les zones de brousse. Globalement la classification est satisfaisante sur Bitinkodji en 2014 puisqu'elle ne surestime pas la part de couvert forestier mais qu'elle a plutôt tendance à la sous-estimer. L'indice kappa étant de 0.91, nous pouvons dire que notre classification est satisfaisante

- **SITE DE TIENTERGOU**

Tableau 2 : Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test (en ligne)

Tientergou2014	Sols nus	Zones de brousse	Zones agricoles	Total	Erreur d'omission (%)
Sols nus	125	0	47	172	37,6
Zones de brousse	6	175	0	181	3,42
Zones agricoles	0	3	528	531	0,56
Total	131	178	635		0
Erreur d'excédent (%)	4,8	1,77	8,95		41,52

L'analyse du tableau2 révèle que 47 pixels sols nus sont classés en zones agricoles. Tous les pixels classés zones de brousse par la classification supervisée sont effectivement zones de brousse. Par contre des pixels de zones de brousse sont classés en sols nus. La classification sous-estime donc la ressource ligneuse au niveau des zones de brousse. Quarante-huit pour cent des pixels zones de brousse sont bien classés. La classification est donc acceptable sur le site de Tientergou puisqu'elle ne surestime pas la part de couvert forestier mais qu'elle a plutôt tendance à la sous-estimer. L'indice de kappa est de 88 % ce qui est acceptable car il est supérieur à 75%.

- **SITE DE BANIZOUMBOU**

Tableau 3 : Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test (en ligne)

Banizoumbou2014	Sols nus	Zones de brousse	Zones agricoles	Total	Erreur d'omission (%)
Sols nus	149	1	16	166	11,41
Zones de brousse	5	239	3	247	3,35
Zones agricoles	0	139	1191	1330	11,67
Total	154	379	1210	1743	0,00
Erreur d'excédent (%)	3,36	58,58	16,25		26,43

Au niveau du site de Banizoumbou, les résultats sont aussi satisfaisants. En effet, le sol nu est très bien décrit par la classification. Un seul pixel de sol nu est classé en zones de brousse. Quelques pixels de zones de brousse sont classés en sol nu (3 %). Là encore, la classification sous-estime le couvert forestier. Par contre, elle sur estime le couvert forestier dans les zones agricoles car 12% de zones agricoles sont classés zones de brousse.

L'analyse du coefficient kappa (78%) montre que la différenciation des classes de zones agricoles est moins précise certainement due au reverdissement des zones agricoles.

Rapport-Gratuit.com

RESUME

Dans un but de gestion et de recherche, une étude sur l'évolution comparée en zone de brousse et en zone agricole de 1992 à 2014 dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Niamey a été réalisée.

L'étude a pour objectif de comprendre comment la dynamique récente du couvert forestier a évolué en fonction de l'exploitation forestière et des pratiques de gestion des ressources naturelles des populations.

Pour ce faire, six scènes Landsat ont été acquises aux mois de septembre et d'octobre 1992, 2001 et 2014. Elles couvrent l'ensemble de nos trois sites d'étude. En complément, des données cartographiques et des images Google Earth ont été utilisées. Ces couches initiales ont été exploitées pour découper les sites d'étude.

Les opérations de terrain (30 jours) ont donné lieu à des enquêtes semi-structurées auprès des populations et des transects de végétation pour caractériser les paysages.

L'approche méthodologique consiste en une analyse croisée des données d'observation sur le terrain et l'interprétation sous *Arcgis* et *Qgis* des images Google Earth de 2001 et 2014 et des imageries satellitaires Landsat de 1992, 2001 et 2014. L'interprétation des images par les différents indices de végétation (NDVI, PVI, TSAVI) a permis de discriminer les zones de brousse et les zones agricoles.

L'analyse des résultats a montré que trois unités majeures structurent le paysage des sites étudiés (zones de brousse, zones agricoles et sol nu). Les ressources ligneuses de ces unités sont constituées de formations végétales contractées sur les plateaux, de pars agro forestiers au niveau des glacis. Ces unités constituent des zones d'exploitation du bois-énergie pour approvisionner la ville de Niamey. Actuellement les brousses tigrées régulières plus productives ont été progressivement remplacées par des brousses tigrées dégradées très peu productives. Par contre les zones agricoles se sont étendues et enrichies en végétation. Par rapport au couvert forestier, la tendance est à la dégradation des zones de brousse contrairement aux zones agricoles qui se reverdissent. Ainsi, l'équilibre écologique est rompu dans les zones de brousse. Ce qui représente plus qu'un danger pour cet écosystème.

MOTS CLÉS : brousse tigrée, zone agricole, NDVI, PVI, TSAVI, couvert végétal, bassin d'approvisionnement en bois-énergie, schéma directeur d'approvisionnement

ABSTRACT

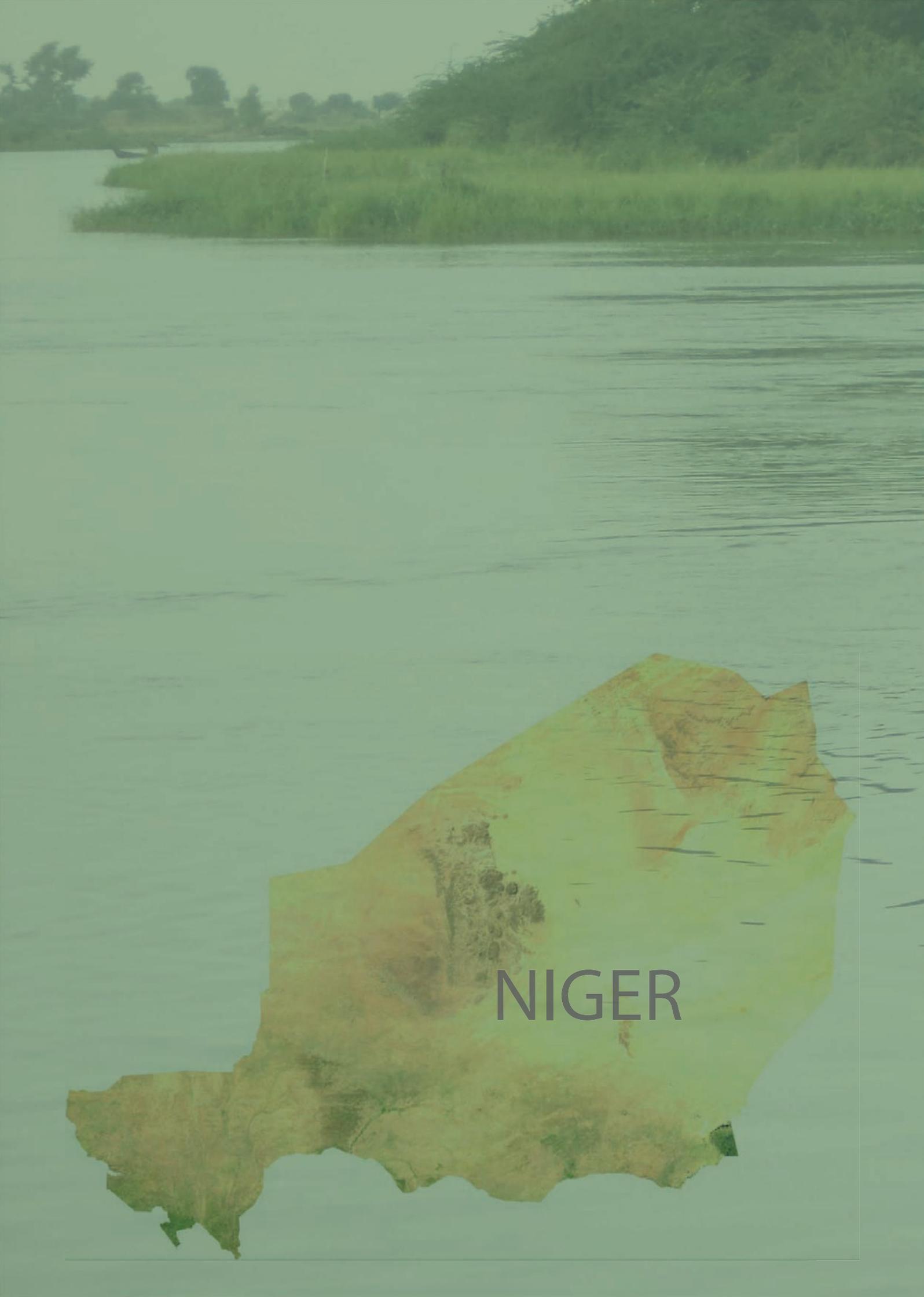
In the interests of management and research, a study on the comparative evolution in the bush area and in agricultural zone of 1992-2014 in the wood energy supply basin Niamey was conducted.

The study aims to understand how the recent dynamics of the forest cover has evolved based forestry and natural resources of people management practices. Do this six Landsat scenes were acquired in the months of September and October 1992, 2001 and 2014. They cover all of our three study sites. In addition, map data and Google Earth imagery has been used. These initial layers were used to cut the study sites. Field operations (30 days) resulted in semi-structured surveys of populations and vegetation transects to characterize the landscape.

The methodological approach is a cross-analysis of observational data in the field and interpretation under Arcgis Qgis and Google Earth images of 2001 and 2014 and Landsat satellite imagery 1992, 2001 et 2014. The interpretation of images different vegetation indices (NDVI, PVI and TSAVI) allowed to discriminate areas of bush and farmland. Analysis of the results showed that three major units structure the landscape of the study sites (bush areas, agricultural areas and bare soil).

The timber resources of these units consist of contracted plant formations on trays, leaving agro forestry in glazes. These units are operating zones wood energy to supply the city of Niamey. Currently the most productive regular tiger bush were gradually replaced with tiger bush degraded very marginal. By cons agricultural areas have expanded and enriched with vegetation. Compared to the forest cover, the trend is the degradation of bush areas unlike agricultural areas that turn green again. Thus, the ecological balance is broken in bush areas. This represents more than a threat to the ecosystem.

KEY WORDS: tiger bush, agricultural area, NDVI, PVI, TSAVI, vegetation cover, supply woodfuel basin supply master plan.



NIGER