



Mémoire
Présenté par
GUEDE Cataud
Marius

UFR des Sciences de
la Terre et des
Ressources Minières

**APPORT DE LA TELEDETECTION A LA GESTION INTEGREE
DU LITTORAL DU BAS-SASSANDRA : CARTOGRAPHIE DE
L'OCCUPATION DU SOL ET DES RÉSERVES FORESTIÈRES
DU DÉPARTEMENT DE SAN PEDRO (SUD-OUEST DE LA
CÔTE D'IVOIRE)**

Année académique :
2005-2006

République de Côte d'Ivoire

Année Universitaire 2006-2007

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Université de Cocody

N° d'ordre :



UFR des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières

CENTRE UNIVERSITAIRE DE RECHERCHE ET D'APPLICATION EN TÉLÉDÉTECTION

MÉMOIRE

Pour l'obtention du Diplôme d'Études Approfondies en

TÉLÉDÉTECTION ET SIG

Option : Analyse Spatiale et Environnementale

THÈME

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION À LA GESTION INTEGRÉE
DU LITTORAL DU BAS-SASSANDRA : CARTOGRAPHIE DE
L'OCCUPATION DU SOL ET DES RÉSERVES FORESTIÈRES
DU DÉPARTEMENT DE SAN PEDRO (SUD-OUEST DE LA
CÔTE D'IVOIRE)

Présenté par : GUEDE CATAUD MARIUS

Maître ès Sciences Humaines, option Géographie

Date de soutenance : 25 Avril 2008

Le mémoire : Pr AFFIAN KOUADIO

Composition du jury

Président : Prof AKA Kouamé

Examineur : Prof AFFIAN Kouadio

Examineur : Dr DJAGOUA Valère

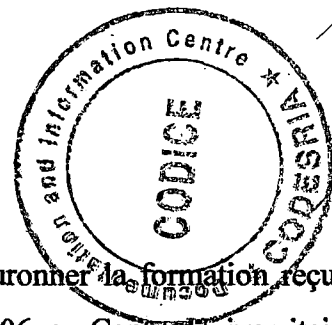
Examineur : Dr SALEY Bachir

1804.01

GUE

14773

28 AVR. 2010



18.04.01
GUE
14773

AVANT-PROPOS

Ce travail de recherche que nous présentons vient couronner la formation reçue en Télédétection et SIG, au cours de l'année académique 2005-2006, au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) de l'Université de Cocody-Abidjan. Il s'inscrit dans un des quatre axes de recherche dudit centre, à savoir la Gestion Intégrée du Littoral (GIL), et se veut une contribution à une meilleure connaissance de l'environnement naturel du département de San Pedro à travers une cartographie de l'état d'occupation du sol.

Cette étude a par ailleurs bénéficiée d'une subvention du programme de petites subventions pour la rédaction de mémoires et thèses du Conseil pour le Développement de la Recherche en Sciences Sociales en Afrique (CODESRIA).

Si nous avons pu mener à terme nos travaux, c'est sans doute grâce au concours fort appréciable de certaines personnes. Nous tenons dans ces pages à leur témoigner notre profonde gratitude. Nous prions DIEU le Tout puissant, père de notre Seigneur Jésus-Christ, afin qu'il leur rende au centuple tout ce qu'ils ont consenti comme sacrifice à notre endroit.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu aux responsables du CODESRIA pour la subvention dont ils nous ont fait bénéficier.

Nous sommes particulièrement reconnaissants à celui qui a accepté d'encadrer ce Mémoire, le Professeur AFFIAN Kouadio, Maître de conférences à l'UFR SRTM et Directeur du CURAT. Il a toujours montré à notre égard une bienveillante sollicitude et ses conseils et orientations nous ont permis de conduire à bien ces travaux.

Remerciements et reconnaissances ne peuvent traduire exactement les sentiments que nous éprouvons à l'égard de Monsieur TAPEKO Kipré Sylvain, Commandant de la Garde Républicaine de Yamoussoukro pour son soutien financier qui a permis d'assurer notre scolarité au CURAT. Merci aussi de la confiance, la grande sollicitude qu'il a à notre égard et pour l'intérêt qu'il porte à nos études.

Nous voudrions également exprimer notre gratitude à tout le corps professoral du CURAT et plus particulièrement aux Docteurs KOUAME Fernand, TOURE Augustin, SALEY Bachir, DJAGOUA Eric, KOLI Bi Zuéli, et HAUHOUOT Célestin pour leur encadrement de proximité et leur soutien sans faille tout au long de ce travail.

Nous sommes aussi redevable au Docteur N'GOTTA N'guessan, Maître-Assistant à l'IGT pour nous avoir recommandé lors de notre inscription à cette formation, conseillé, puis accepté de lire ce manuscrit.

Nous ne voudrions pas oublier tous les Doctorants du CURAT mais plus particulièrement MOBIO Jean Brice, KOUAME Adonis et ADJA Miessan, qui nous ont été d'une aide très appréciable dans le traitement des images satellitaires.

Merci à tous nos camarades de la Promotion EDAT 7 : SAKO Nakouma, OKAINGNI Jean Claude, ZRO Bi Ferdinand, AKADJE Marie Claude, PETE Ange, KOUADIO Amani Jean Louis, KOUADIO Maffoué Jeanne, KASSI Jean Baptiste, ADON Rodrigue et TOURE Aboubacar.

Nous exprimons toute notre gratitude au personnel administratif du CURAT : Monsieur N'GONIAN Victor et Madame TCHOUM Clémentine.

Nous ne saurions oublier toute notre famille et nos amis KAKOU Charles et LOBA Valéry, votre soutien et vos prières nous ont permis de surmonter toutes les difficultés rencontrées au cours de ces recherches.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, directement ou indirectement nous ont aidé à la réalisation de ce document. Que DIEU vous accorde sa mansuétude !

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	i
Table des matières	iii
Liste des abréviations et sigles	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Résumé	viii
Abstract	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS	3
I.1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	4
I.1.1. Cadre physique	4
I.1.1.1. Localisation	4
I.1.1.2. Climat	4
I.1.1.3. Géologie	6
I.1.1.4. Sols	6
I.1.1.5. Hydrologie	7
I.1.1.6. Végétation	7
I.1.1.7. Relief	9
I.1.2. Cadre humain	9
I.1.2.1. Population	9
I.1.2.2. Activités économiques	10
I.1.2.2.1. Agriculture	10
I.1.2.2.2. Exploitation forestière	10
I.2: TERMINOLOGIE DE TÉLÉDÉTECTION	11
I.2.1. Définition et concepts	11
I.2.2. Différents domaines de la télédétection	11
I.2.3. Utilisation de la télédétection dans la cartographie d'occupation du sol	11
CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES	14
II.1. MATÉRIELS	15
II.1.1. Données	15
II.1.2. Logiciels	15
II.2. MÉTHODES	15

II.2.1. Prétraitement-----	15
II.2.1.1. Correction géométrique-----	16
II.2.1.2. Mosaïquage-----	16
II.2.1.3. Extraction de la zone d'étude-----	17
II.2.2. Amélioration du contraste de l'image-----	18
II.2.2.1. Etalement dynamique-----	18
II.2.2.2. Analyse en composantes principales (ACP)-----	18
II.2.2.3. Composition colorée-----	19
II.2.3. Extraction d'informations-----	19
II.2.3.1. Calcul d'indice de végétation-----	19
II.2.3.2. Classification de l'image Landsat 7-----	20
CHAPITRE III : RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSIONS-----	24
III. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS-----	25
III.1. Analyse en composante principale-----	25
III.2. Indices de végétation-----	28
III.2.1. NDVI-----	28
III.2.2. Indice de brillance-----	28
III.3. Compositions colorées-----	29
III.3.1. Composition colorée : ETM+4 (R) –ETM+5 (V) –ETM+3(B)-----	29
III.3.2. Composition colorée : NDVI (R) – ACP 3 (V) – ACP 1(B)-----	30
III.4. Classification supervisée-----	31
III.4.1. Choix des thèmes cartographiques-----	31
III.4.2. Description des unités cartographiques retenues-----	32
III.4.3. Evaluation de la classification supervisée-----	34
III.4.3.1 Matrice de confusion-----	34
III.4.4. Comparaison de la classification-----	37
III.5. DISCUSSION-----	38
Conclusion générale-----	40
Références bibliographiques-----	41

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ACP : Analyse en Composantes Principales

ARSO : Autorité Régionale pour l'aménagement du Sud-Ouest

CCT : Centre de Cartographie et de Télédétection

CEDEAO : Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

CODESRIA : Conseil pour le Développement de la Recherche en Sciences Sociales en
Afrique

CURAT : Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection

EDAT : Ecole Doctorale Africaine de Télédétection

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus

GIL : Gestion Intégrée du Littoral

LANDSAT : Land Satellite

IB : Indice de Brillance

IGCI : Institut Géographique de Côte d'Ivoire

INS : Institut National de la Statistique

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NOAA : National Oceanologic and Atmospheric Administration

RVB : Rouge Vert Bleu

SAPH : Société Africaine de Plantation d'Hévéas

SOGB : Société de plantation d'hévéas de Grand-Béréby

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre

STRM : Sciences de la Terre et des Ressources Minières

TM : Thematic Mapper

UFR : Unité de Formation et de Recherche

UTM: Universal Transverse Mercator

WGS: World Geodetic System

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude	5
Figure 2 : Réseau hydrographique du Département de San Pedro	8
Figure 3 : Image extraite de la zone d'étude	17
Figure 4 : Schéma récapitulatif des traitements réalisés	22
Figure 5 : Première composante principale	26
Figure 6 : Deuxième composante principale	27
Figure 7 : Troisième composante principale	27
Figure 8 : Indice normalisé de végétation (NDVI)	28
Figure 9 : Indice de brillance	29
Figure 10 : Composition colorée ETM+ 4 ETM+ 5 ETM+ 3	30
Figure 11 : Composition colorée NDVI – ACP 3 – ACP 1	31
Figure 12 : Carte d'occupation du sol du département de San Pedro (Scène 197 -056 et 197 -057 du 23 Mars 2001)	33
Figure 1 : Carte d'occupation du sol du département de San Pedro (CCT, 2005 modifiée par Guedé)	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Matrice de corrélation des canaux bruts de Landsat ETM+	18
Tableau II : Variances des différentes composantes de l'ACP	25
Tableau III : Matrice de corrélation entre ACP	26
Tableau IV : Matrice de confusion	36
Tableau V : Moyennes des indices	37
Tableau VI: Superficies en ha et proportion occupée par les différents thèmes	37

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

RÉSUMÉ

Cette étude est une contribution à la cartographie de l'occupation du sol et des réserves forestières du Sud-Ouest ivoirien par télédétection. Le département de San Pedro a été choisi comme site d'étude. Il est délimité par les latitudes 4°45' et 5°50' Nord et les longitudes 6°42' et 7°38' Ouest.

La carte d'occupation du sol a été réalisée à partir des images des scènes 197-056 et 197-057 de Landsat ETM+ du 23 Mars 2001. A l'aide du logiciel ENVI une classification par Maximum de vraisemblance a été réalisée sur une combinaison d'images composées des néo-canaux ACP 1, ACP2 et ACP 3, de l'indice de végétation (NDVI) et de l'indice de brillance. Le traitement réalisé avec une précision globale de 82,96 % permet d'obtenir la cartographie à moyenne échelle du mode d'occupation du sol avec les six thèmes suivants : forêt dense, forêt dégradée, établissements humains, cultures et jachères, étendue d'eau, et les cultures industrielles. A l'analyse, l'on remarque que le département de San Pedro connaît une très forte anthropisation de son espace. En effet, 61,38 % du territoire départemental est sous l'emprise des activités humaines. Ce qui traduit également un recul important des réserves forestières.

Par cette méthode, la télédétection prouve son utilité et son efficacité dans l'élaboration de la carte d'occupation du sol et des réserves forestières. Elle est par conséquent un outil précieux de suivi et de gestion des problèmes environnementaux de la zone littorale.

Mots clés : Télédétection, Landsat ETM+, Cartographie d'occupation du sol, Classification, Littoral, San Pedro.

ABSTRACT

This study is a contribution to the mapping of land and forest reserves of Ivorian Southwest by the remote sensing. The department of San Pedro has been selected as our study's area. It is bordered by latitudes $4^{\circ} 45'$ and $5^{\circ} 50'$ North and longitude $42^{\circ} 6'$ and $7^{\circ} 38'$ west. The map of land was carried out from Landsat ETM+ scenes (197-056 and 197-057) March 23, 2001.

With the software ENVI 4.1 a classification by Maximum likelihood was performed on a combination of image composed of new-ACP channels 1, 2, 3 and the vegetation index (NDVI) and the brightness index.

The processing carried out with an accuracy of 82,96 % allows to obtain the cartography with medium-scale mapping mode of a land with six themes: dense forest, degraded forests, human settlements, crops and fallow lands, the extent of water, and industrial crops.

We notice that the department of San Pedro extremely suffers the consequences of very strong anthropisation of its space.

Indeed, 61,38 % of the department is under the influence of human activities. This also reflects a major setback of forest reserves.

By this method, remote sensing proves its usefulness and effectiveness in the preparation of the mapping of land and forest reserves. It is therefore a useful tool for monitoring and managing environmental problems of the coastal zone.

Keywords: Remote Sensing, Landsat ETM+, Land cover mapping, Classification, Coastal zone, San Pedro.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le littoral du Bas-Sassandra, tout comme le reste du littoral ivoirien, connaît une grave dégradation de son environnement. Cet état de fait est essentiellement lié à une forte pression démographique, et à la surexploitation de ses ressources naturelles, corollaire d'une intense activité économique. Le point de départ d'une telle situation réside dans la mise en œuvre d'un gigantesque programme d'aménagement et de développement régional initié en 1969 par l'Etat et exécuté par l'Autorité Régionale pour l'aménagement du Sud-Ouest (ARSO).

Ce programme d'aménagement dont les objectifs majeurs étaient de (1) sortir la région de son isolement géographique et de (2) promouvoir son développement économique, a contribué à susciter d'importantes mutations dans la trame spatiale de la région. Ainsi donc la mise en valeur du territoire fondée sur l'exploitation extensive des ressources forestières a provoqué une immigration massive de population originaire aussi bien d'autres régions de la Côte d'Ivoire que de pays limitrophes, occasionnant du coup une rapide augmentation de la population et une forte pression sur le foncier rural.

Par ailleurs, le Bas-Sassandra est devenu le théâtre d'une exploitation massive et anarchique des ressources forestières, qui constituent la principale ressource de la région. Cette surexploitation est due à la création de vastes plantations industrielles et villageoises.

Le programme d'aménagement et de développement régional du Sud-Ouest, même s'il a permis un relatif développement économique de la zone, n'a pas atteint son objectif initial qui était de faire de la région le second pôle économique du pays. De plus son interruption brutale dans les années 1980 a amplifié les problèmes environnementaux et socio économiques nés de sa mise en œuvre, auxquels il est impératif d'apporter une solution efficace. Aujourd'hui, la relance du processus de développement économique de cette région, enjeu majeur pour les décideurs et élus locaux doit se faire dans une approche de développement durable qui non seulement préserve les ressources naturelles, mais aussi assure la continuité de la mise en valeur du territoire.

Le travail que nous avons entrepris a pour objectif principal de fournir aux usagers de l'espace littoral (Etat, collectivités territoriales, acteurs socio économiques, populations) un outil d'aide à la décision qui leurs permettrait de prendre la meilleure décision face à une problématique d'aménagement. Afin d'atteindre l'objectif général, des objectifs spécifiques ont été identifiés. Il s'agit de :

- Faire une analyse de l'occupation du sol
- Réaliser l'inventaire, la cartographie des ressources naturelles.

Le présent mémoire dont le thème est « Apport de la télédétection à la gestion intégrée du littoral du Bas-Sassandra : cartographie de l'occupation du sol et des réserves forestières du département de San Pedro. » s'articulera autour de trois chapitres.

D'abord dans le premier chapitre nous aborderons des généralités sur la zone d'étude et la télédétection. Ensuite dans le deuxième chapitre, nous présenterons la méthodologie de traitement des données. Enfin dans le troisième chapitre, nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus avant de les discuter.

Une conclusion et des perspectives mettront fin à ce mémoire.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

CHAPITRE I
GÉNÉRALITES

CODESRIA - BIBLIOTHÈQUE

I.1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

I.1.1. Cadre physique

I.1.1.1. Localisation

Le Département de San Pedro, l'espace d'étude, compte deux sous-préfectures (Grand-Béréby et San Pedro). Situé entre le 6°42' et 7°38' de longitude Ouest et 4°45' et 5°50' de latitude Nord, il couvre une superficie de 6 912 km². Il est limité au Nord par le département de Soubré, à l'Ouest par le département de Tabou, à l'Est par le département de Sassandra, enfin au Sud par l'Océan Atlantique (figure 1). Sur le plan biogéographique, l'espace d'étude appartient au domaine forestier guinéen de la basse Côte d'Ivoire, caractérisé par une végétation exubérante sous climat chaud et pluvieux (Guedé, 2005).

I.1.1.2. Climat

Le département de San Pedro à l'instar de la région littorale du Bas-Sassandra, appartient au climat équatorial. Ce régime climatique est fortement influencé par le courant équatorial ou courant de Guinée qui est orienté dans la direction Est et apporte des eaux chaudes jusqu'au littoral de la Côte d'Ivoire. Les éléments dominants de ce climat sont les pluies saisonnières et la chaleur relativement élevée.

Le département connaît globalement deux saisons humides et deux saisons sèches. La grande saison de pluie s'étend de Mars à Juillet, ensuite vient une courte saison sèche d'Août à Septembre, une courte saison humide prend la relève en Octobre et Novembre suivie d'une grande saison sèche de Décembre à Février. La pluviométrie est comprise entre 1800 et 2200 mm, avec des écarts qui croissent d'Ouest en Est et au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la côte. Le déficit hydrique cumulé est de 200 à 250 mm (Guedé, 2005).

Au niveau des températures, il est à noter que les variations saisonnières de températures sont insignifiantes. Les températures moyennes les plus basses sont généralement observées au cours des saisons humides (24°C) et les plus hautes, pendant la saison sèche (27°C) (Lena, 1979).

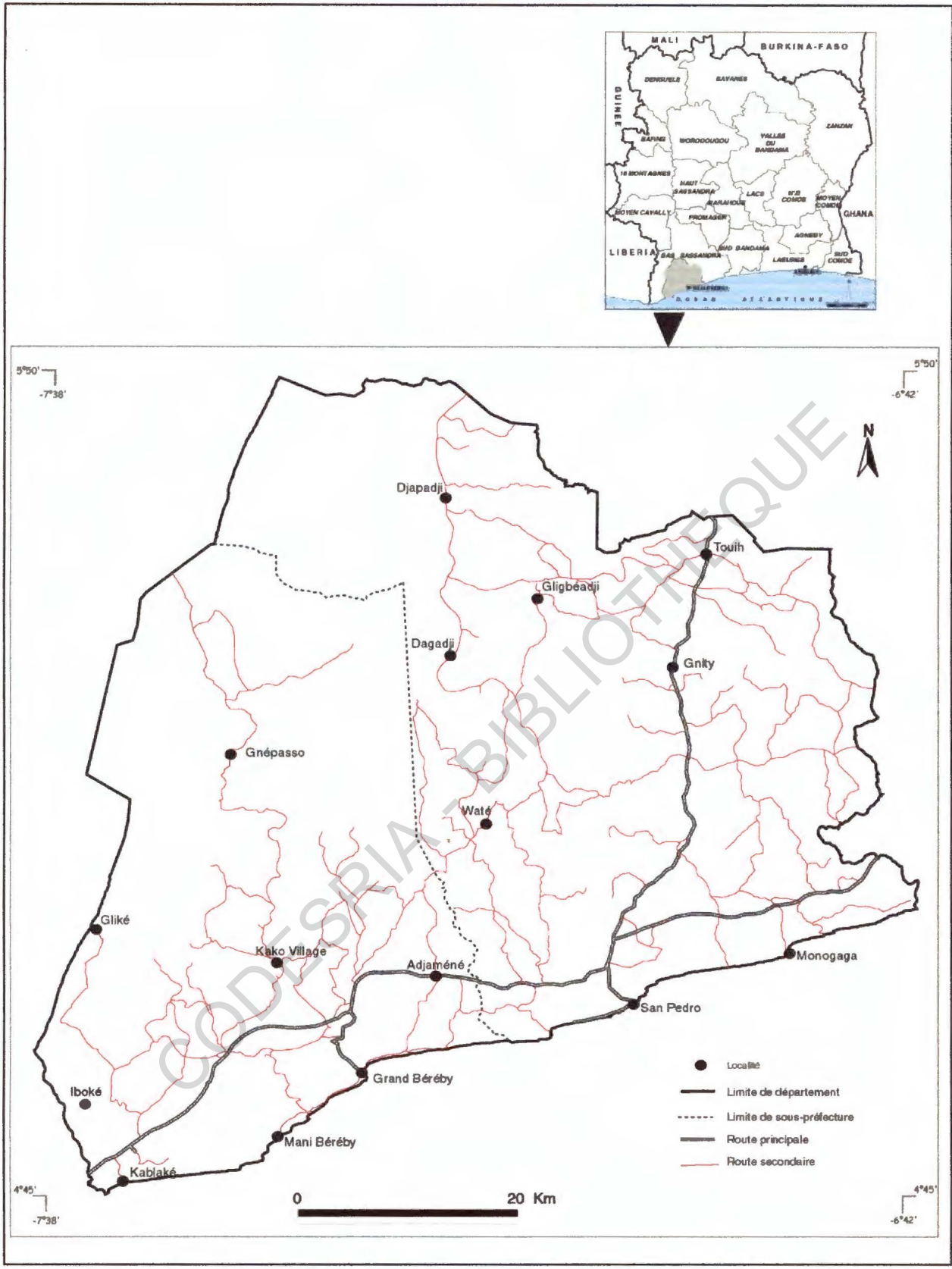


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

I.1.1.3. Géologie

Le substratum géologique du département de San Pedro appartient au socle épi éburnéen. Il se partage en quatre subdivisions : le tertiaire, le protérozoïque, le birimien et l'archéen (Lena, 1979).

Au plan spatial, seuls quelques dépôts sédimentaires du tertiaire subsistent sur une étroite frange du littoral à Monogaga. Ils sont constitués essentiellement de sédiments argileux.

Par contre, les roches du protérozoïque proviennent de la granitisation éburnéenne, et sont composées de granitoïdes à biotite et de granitoïdes à deux micas. Les gisements des premières formations citées sont plus étendus et couvrent la majeure partie du département. Les granitoïdes à deux micas représentent des gisements ponctuels localisés au centre et au nord de la sous-préfecture de San Pedro.

La division du birimien comprend les roches du complexe volcano-sédimentaire (métasédiments et métavulcanites) et les roches à métamorphisme plus intense.

Enfin les roches de l'archéen sont très faiblement représentées dans la région du Bas-Sassandra. Issues du socle épi libérien, on note seulement deux petits gisements de granites divers à Grand-Béréby.

I.1.1.4. Sols

Au plan pédologique, le département de San Pedro est dominé par les sols ferrallitiques fortement dessaturés. Cependant, on y rencontre aussi des sols bruns tropicaux et les complexes de sols hydromorphes minéraux et de sols peu évolués (Schwartz, 1989).

Les sols bruns tropicaux : proviennent de formations mésozonales de position stratigraphique avec un *Ph* neutre à alcalin et une texture fine à très fine. Enfin, leur capacité de rétention en eau utile est très élevée (BETPA, 1984). Ces sols se localisent sur une bande côtière au niveau de Grand-Béréby. Ils sont intercalés de petites bandes de sols hydromorphes organiques.

Les sols hydromorphes : se localisent sur trois (3) types d'espaces ; les bourrelets de berges, les berges de petites rivières au lit encaissé et les moyennes terrasses. Ils correspondent à deux catégories de sols qui sont les sols hydromorphes minéraux à gley et pseudo gley et les sols hydromorphes organiques. Par ailleurs, ces sols sont formés sur matériaux alluvion – colluvial, issus de roches diverses (Lena, 1979).

I.1.1.5. Hydrologie

Il existe de nombreux cours d'eau dans la région du Bas-Sassandra qui s'articulent autour de trois principaux bassins versants : le bassin versant du fleuve Cavally à l'ouest, le bassin versant du fleuve Sassandra à l'est et au centre un bassin versant regroupant l'ensemble des fleuves côtiers.

Le département de San Pedro est drainé par de nombreux fleuves côtiers dont les plus importants sont : Dodo, Néro, San Pedro, Brimay, Niouhourou, Bolo, Nonoua (figure 2). Localisés au Sud entre les bassins versants des deux principaux fleuves qui drainent le Bas-Sassandra, à savoir le Sassandra et le Cavally, ils se partagent un bassin versant de 8 000 kilomètres carrés et sont jalonnés, sur la quasi totalité de leurs cours, de rapides. Le principal bassin est celui du San Pedro (Lena, 1979).

I.1.1.6. Végétation

La végétation de la région littorale du Bas-Sassandra fait partie du domaine Guinéen avec une forte dominance du secteur ombrophile. D'autres formations végétales de dimensions plus réduites existent dans cette région. Aussi trouve-t-on des forêts marécageuses et des savanes. On peut observer dans cette partie de la Côte d'Ivoire deux grands groupements floristiques : la forêt à *Eremospatha macrocarpa* et *Diospyros manii*, et la forêt à *Diospyros spp* et *Mapania spp* (Lena, 1979).

La forêt à *Eremospatha macrocarpa* et *Diospyros manii* représente le type floristique le plus répandu dans le Bas-Sassandra. Son existence est liée aux sols granitiques et migmatites mais plus encore, aux précipitations avoisinant 1700 mm de pluie. En dessous de cette quantité de pluie, la végétation a les caractéristiques des espèces propres à la forêt semi décidue.

La forêt à *Diospyros spp* et *Mapania spp* est liée à l'existence de sols à forte capacité de rétention en eau et de sols issus de roches métamorphiques. Ce type de forêt qui se développe généralement à l'extrême Sud-Ouest de la région, à cause de la pluviométrie très élevée, s'observe également sur une petite zone schisteuse dans la partie Nord de San Pedro.

Les forêts marécageuses s'observent dans le secteur de San Pedro, au fond des vallées humides où les sols sont mal drainés et parfois gorgés d'eau.

A l'intérieur des terres, l'on rencontre des marécages d'eau douce le long des cours d'eau, et des estuaires. Cependant, les embouchures de rivières côtières et fleuves abritent deux types de mangroves : la mangrove à palétuvier blanc (*Avicenna africana*) et la mangrove à palétuvier rouge (*Rhizophora racemosa*).

La savane se résume à deux petites unités situées à proximité de la côte sur la rive gauche de la Néro. Elle se développe sur des sols hydromorphes issus des alluvions argileux de la Néro. Cette végétation se caractérise par des peuplements disséminés de palmiers (*Borassus aethiopum*) et de graminées (*Hyparrhenia spp*).

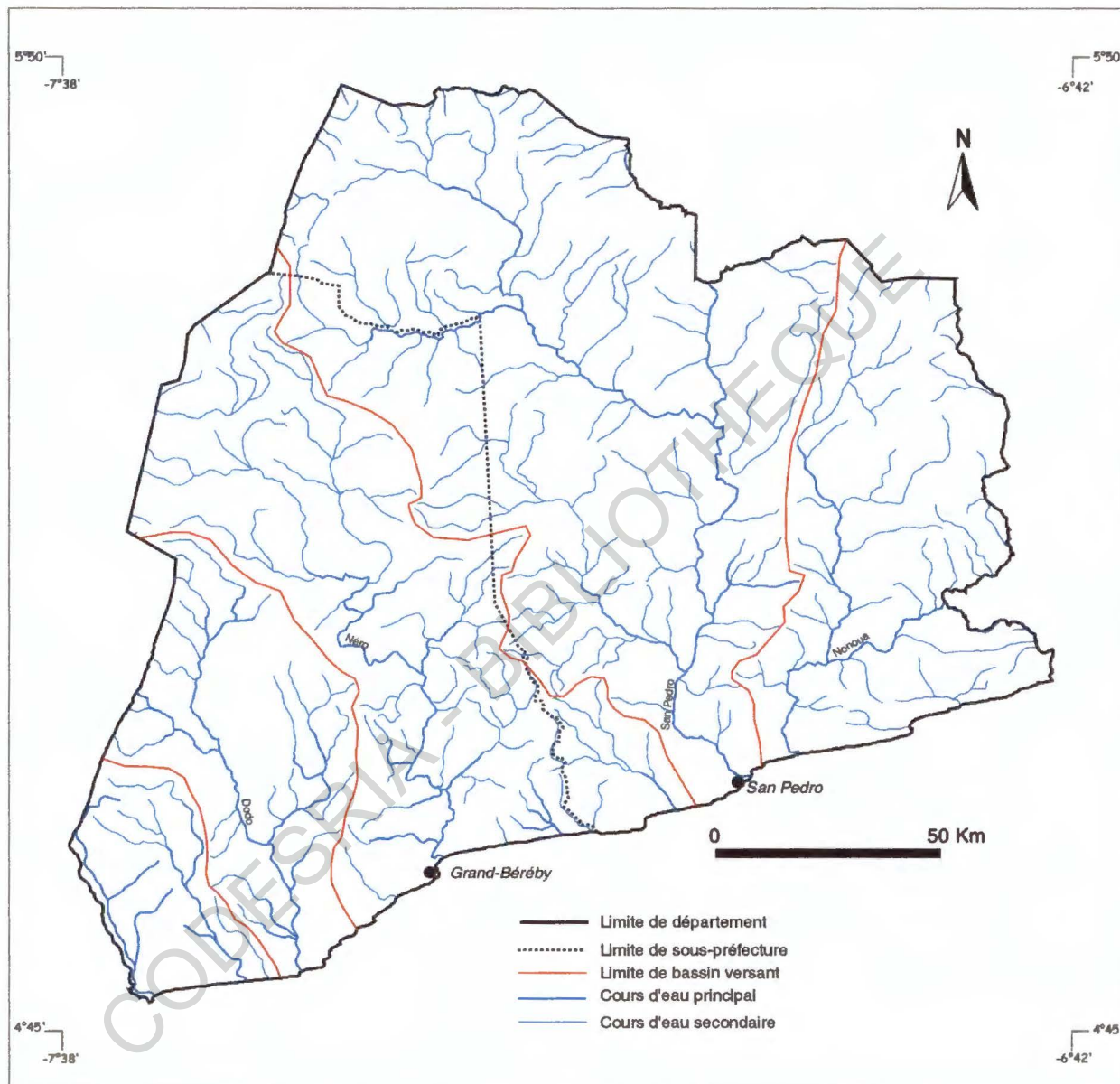


Figure 2 : Réseau hydrographique du Département de San Pedro

I.1.1.7. Relief

La zone d'étude se caractérise par une planitude d'ensemble et un moutonnement. Les altitudes s'inclinent de deux cents mètres (200 m) dans la partie septentrionale vers le niveau de la mer (Schwartz, 1989).

La frange littorale est constituée de bas plateaux très peu disséqués par l'érosion, reposant sur les granitoïdes, excepté les alentours de San Pedro.

A l'Ouest, les basses terres arrivent à la mer sous forme d'étroites langues sinueuses entre collines cristallines le long des cours d'eau. Mais plus à l'Est à partir de Grand-Béréby apparaissent des plaines littorales largement ouvertes, séparées par des escarpements pouvant former des falaises.

La majeure partie de la région située au Sud de la ligne marquant les 200 m d'altitudes, présente un paysage de collines, de vallonnements et de mamelonnements. Les plateaux s'élèvent à des altitudes variant entre 120 et 150 mètres, tandis que les plaines offrent une grande monotonie. Deux caractéristiques essentielles se dégagent de cette zone : la faible importance des vallées et la présence d'eau stagnante.

La morphologie du trait de côte présente un tracé en « dent de scie » (Schwartz, 1989) dû à une série de failles en échelon qui découpent la côte en sept secteurs séparés par des escarpements, comme l'anse de Grand-Béréby et la conque de Monogaga. Le tracé présente également de nombreuses baies issues de roches moins résistantes et des caps dus à des affleurements de roches dures mises à nu.

Le littoral du Bas-Sassandra est une côte en grande partie rocheuse avec des secteurs surélevés à l'Ouest de San Pedro, donnant l'aspect de falaise (falaise vive à l'Est de San Pedro). Des zones basses s'observent cependant, dans un petit secteur de San Pedro et de Grand-Béréby.

I.1.2. Cadre humain

I.1.2.1. Population

Le département de San Pedro abrite une population estimée à 422 204 habitants avec une densité de 35,1 hbts/km². Elle représente 39,20 % de la population de la région du Bas-Sassandra et 2,80 % de la population nationale (INS, 1998).

Resté jusqu'à la fin des années 1960 un territoire sous-peuplé, le département connaît une évolution spectaculaire de sa population ; de 50 433 habitants en 1975, elle est passée à 168 174 habitants en 1988 puis à 422 204 habitants en 1998 soit un taux d'accroissement

estimée à 9,68 % entre 1988 et 1998. Ce taux est trois fois supérieure au taux national qui est de 3,3 % (INS, 1998).

Ce boom démographique est le résultat des vagues de migration de populations originaires des autres régions de la Côte d'Ivoire et aussi des pays de la sous région. Ces flux migratoires ont été suscités par l'ARSO. Ce phénomène d'immigration a abouti à la formation d'une population cosmopolite dans laquelle les étrangers ont une représentativité moyenne estimée à environ 30 %. Les ressortissants de la CEDEAO constituent plus de 98% des populations étrangères du Bas-Sassandra (Guedé, 2005).

I.1.2.2. Activités économiques

I.1.2.2.1. Agriculture

L'agriculture est l'activité économique dominante dans cette région comme partout ailleurs en Côte d'Ivoire. Elle occupe plus de 60 % de la population active (Guedé, 2005). Le département de San Pedro connaît un développement remarquable des productions agricoles lié pour l'essentiel à l'abondance des ressources forestières et à la forte migration de colonisation agricole née de la mise en valeur du territoire régionale par l'ARSO.

Les cultures sont dominées par le binôme Café – Cacao dont la région est devenue depuis deux décennies la nouvelle « boucle ». A côté de ces cultures de rente se développent aussi le palmier à huile, l'hévéa, le cocotier et les agrumes dont les vastes étendues de plantations sont l'apanage de grandes sociétés agro-industrielles telles SOGB et SAPH.

L'activité agricole exercée aussi bien par les populations rurales que par les entreprises mobilise d'importantes superficies de terre. Cet état de fait a un impact majeur sur la dégradation du milieu forestier.

I.1.2.2.2. Exploitation forestière

L'exploitation forestière est une activité très ancienne. A l'origine du premier tissu industriel, elle est aujourd'hui la principale ressource du Sud-Ouest. Selon les données de la Direction de la Production et des Industries Forestières, 20 opérateurs économiques agréés en qualité d'exploitants forestiers exercent sur 26 périmètres couvrant une superficie globale de 847817 hectares. La production totale de bois au titre de l'année 2004 était évaluée à 29 891 892 mètres cube (Guedé, 2005).

Les activités économiques décrites ci-dessus ont un impact significatif sur l'évolution du couvert forestier. Par conséquent, elles peuvent nous permettre de mieux appréhender l'état de l'occupation du sol.

La section suivante présente quelques définitions de notions de télédétection et l'intérêt de l'utilisation de cette technique pour la cartographie de l'occupation du sol.

I.2. TERMINOLOGIE DE TÉLÉDÉTECTION

I.2.1. Définition et concepts

D'après, le C I L F (1997), la télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractères physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec eux. Pour analyser ces caractères, elle utilise les propriétés d'émission ou de rayonnement des ondes électromagnétiques des objets.

La télédétection trouve des applications dans de nombreux domaines : géologie, hydrologie, biologie (cultures), aménagement de territoire, foresterie, océanographie etc. (Touzani, 2003).

I.2.2. Différents domaines de la télédétection

Selon la nature des capteurs utilisés par les satellites, on distingue deux grands domaines de la télédétection. Il s'agit de la télédétection passive et de la télédétection active. Cinq variables permettent d'appréhender la télédétection (Bonn, 1996) :

- le type de vecteur (avion, satellite ou navette spatiale),
- le mode d'acquisition (analogique ou numérique, passif ou actif),
- la résolution spatiale,
- la gamme spectrale utilisée,
- la surface observée.

Nous utiliserons dans le cadre de cette étude la télédétection satellitaire passive ou optique.

I.2.3. Utilisation de la télédétection dans la cartographie d'occupation du sol.

La télédétection demeure depuis près de trois décennies l'outil scientifique le plus utilisé pour la cartographie, le suivi des phénomènes naturels et humains et la gestion de

l'environnement (Kanga, 2006). Aussi, les données de télédétection sont-elles couramment utilisées pour étudier l'évolution de l'occupation et l'utilisation des sols (Hubert-Moy, 2004).

De nombreux satellites existent et fournissent constamment des images des différents endroits du monde. Les données fournies par ceux-ci peuvent être réparties en plusieurs catégories : basse résolution spatiale (100 mètres et plus), moyenne résolution spatiale (80 m), haute résolution spatiale (10 à 30 mètres) et très haute résolution spatiale (2 mètres) PAIN-ORCET M. et *al* 1998. Cependant, la littérature révèle que de nombreuses études ont été menées à partir des images fournies par les satellites Landsat pour la réalisation de cartographie d'occupation du sol. Sans être exhaustif, nous pouvons citer des auteurs comme Song et *al*, (2001) ; Dibi (2001) ; Sylla, (2002), Kouadio (2006) et Kanga, (2006)

Selon Kanga (2006), l'intérêt de l'imagerie satellite réside dans la possibilité qu'elle offre de disposer, pour l'étude d'espaces très étendus, d'un ensemble de données relatives à l'état de l'occupation du sol. A caractère numérique, l'image satellite se présente sous forme multispectrale nous permettant d'avoir une idée de l'état de l'occupation du sol selon différentes bandes spectrales. De plus, la répétitivité de l'information et la disponibilité des images permettent la mise à jour régulière des documents cartographiques. Par ailleurs, par rapport aux techniques de levée classiques, la télédétection par satellite est précise et rentable, et permet d'obtenir des données en temps utile.

L'analyse systématique d'une image satellite dépend de la qualité de l'image dont dispose l'interprète, mais aussi des objectifs assignés à l'étude réalisée. Ainsi, il est possible de réaliser l'analyse informatique de l'image directement à partir d'une combinaison des canaux d'origine de l'image (Kanga 2006). Par contre, en vue de mettre en relief certains éléments géographiques (végétation, sols nus...), certains auteurs (Dibi, 2001 ; Sylla, 2002, Kouadio, 2006) génèrent des néo canaux et des indices (végétation, couleur...). La création des néo canaux permet de rehausser la qualité visuelle de l'image afin de faciliter l'identification des entités géographiques présentes sur l'image, alors que les indices permettent de réduire l'effet de la réflectance de certains éléments géographiques dans la réflectance globale mesurée par le capteur. Dans la littérature, les indices les plus couramment dérivés pour la réalisation des cartes d'occupation du sol sont le NDVI, l'indice de brillance (Mas et *al*, 2001).

Conclusion partielle

Situé dans le sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, le Département de San Pedro bénéficie d'un milieu physique très favorable. Le relief plat et très peu accidenté est drainé par un important système fluvial. Le climat chaud et pluvieux conditionne l'existence d'un domaine forestier dominé par la forêt ombrophile. Tous ces atouts ont fait de cet espace une importante zone agricole qui connaît un essor démographique considérable.

Les activités économiques majeurs (agriculture et exploitation forestière) exercés dans la région ont un impact significatif sur les ressources naturelles qui se dégradent au fil du temps.

L'utilisation de la télédétection dans cette étude vise à mener un diagnostic de l'état d'occupation du sol.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

CHAPITRE II

MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1 MATÉRIELS

II.1.1. Données

Pour la réalisation de la carte de l'occupation du sol, nous avons utilisé essentiellement trois types de données:

1. L'imagerie satellitaire : la zone d'étude est couverte par deux scènes d'images (197 – 056 ; 197 – 057) acquises par le capteur ETM+ du satellite Landsat. Ces différentes scènes acquises à la date du 23 mars 2001 comprennent chacune huit (8) bandes spectrales dont six (6) de résolution 30 mètres, une (1) bande thermique de résolution 60 mètres et une (1) autre bande panchromatique de résolution 15 mètres. Les bandes (6) et (8) de résolution spatiale différente n'ont pas été utilisées dans le traitement de l'image satellite.

Les images utilisées dans le cadre de cette étude ont été téléchargées sur le site Internet <http://glcfapp.umiacs.umd.edu/index.shtml> . Elles comportent par endroits des nuages.

2. Une carte d'occupation du sol au 1 / 200 000 réalisée par le Centre de Cartographie et de Télédétection du Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD) en 2005. Cette carte élaborée à partir des images Spot de 2004, nous a servi de base pour la classification dirigée effectuée dans le cadre de ce travail.
3. Une carte topographique au 1/50 000 réalisée par l'IGCI en 1973. Elle a été utile aussi dans l'identification de certaines unités d'occupation du sol.

II.1.2. Logiciels

Dans le cadre de cette étude, nous avons eu recours au logiciel **Envi 4.1** pour le traitement numérique des images satellites. Les logiciels Arcview et Paint ont été utilisés également pour le traitement des cartes et figures. Enfin, le traitement de texte et tableurs a été réalisé respectivement à partir des logiciels Word et Excel.

II.2. MÉTHODES

II.2.1. Prétraitement

Les opérations de prétraitement d'images réalisées au cours de cette étude se résument essentiellement à la correction géométrique, au mosaïquage, à l'extraction de la zone d'étude, et à l'amélioration du contraste de l'image.

II.2.1.1. La correction géométrique

Il s'agit dans cette étape de redresser géométriquement l'image satellite et de la présenter dans le système de projection cartographique usuelle en Côte d'Ivoire (UTM WGS 84). Ce procédé est impératif parce que des déformations, liées d'une part à la courbure de la terre, à la variation d'altitude du sol, à la réfraction atmosphérique et d'autre part des erreurs liées aux systèmes de mesures et aux mouvements de la plateforme, affectent l'image enregistrée par le capteur du satellite (Sylla, 2002). Dans le cadre de cette étude, la méthode de correction d'image à partir d'une carte préalablement numérisée et géoréférencée a été utilisée. Elle comprend trois étapes:

- La première étape, consiste au repérage des points de calage (amers), représentés par les croisements des différentes voies de communications matérialisées aussi bien sur l'image Landsat non corrigée que sur la carte numérique géoréférencée. Nous avons choisi 12 points amers répartis de façon homogène sur toute l'image. Le nombre de points amers choisis correspond au polynôme d'ordre 3. Selon Kwassi (2001) pour réaliser une bonne correction géométrique, le nombre de points amers doit être supérieur au minimum requis (10 dans le cas du polynôme d'ordre 3) ;
- La deuxième étape se résume au calcul de la relation qui existe entre les points du fichier source et les mêmes points du fichier référence. Ainsi l'erreur résiduelle pour la transformation présente est de 0,09 pixels pour les colonnes et 0,011 pixels pour les lignes. Rapportée à la taille du pixel qui est de 30 m x 30 m, l'erreur résiduelle est de 3 m. Cette valeur inférieure au demi pixel est satisfaisante ;
- La troisième étape consiste au rééchantillonnage de l'image corrigée. En effet, les points des pixels dans le nouveau système de coordonnées étant décalés par rapport au système de coordonnées d'origine, il s'agit d'attribuer de nouvelles valeurs de pixels aux points dans l'image Landsat corrigée par une méthode d'interpolation. La méthode de rééchantillonnage par convolution cubique a été choisie pour cette étude. Elle donne une image de qualité visuelle acceptable.

Après le redressement géométrique et le rééchantillonnage, l'image obtenue possède des coordonnées Longitude / Latitude avec leurs correspondants géographiques. Elle est de ce fait superposable à toute autre carte.

II.2.1.2. Mosaïquage

C'est une opération qui consiste à assembler deux ou plusieurs scènes d'images afin d'en obtenir une seule. Le département de San Pedro étant à cheval sur les scènes d'images dont nous disposons (197-056 et 197-057), il nous a paru nécessaire de réaliser une mosaïque afin de travailler sur tout l'espace. La mosaïque a été réalisée sur la base du géoréférencement des images. Par la suite, nous avons procédé à l'extraction de la zone d'étude.

II.2.1.3. Extraction de la zone d'étude

L'extraction de la zone d'étude a été faite sur l'image résultante de la mosaïque. Pour ce faire, une base de données a été créée à partir des canaux ETM+1, ETM+ 2, ETM+ 3, ETM+ 4, ETM+ 5 et ETM+ 7. Nous avons extrait la zone d'étude selon ses contours administratifs. En effet, un masque a été créé à partir du fichier vecteur du contour administratif et appliqué à la scène mosaïquée. Ainsi, la zone d'étude de dimension 3998 sur 4015 pixels (figure 3) a pu être extraite.

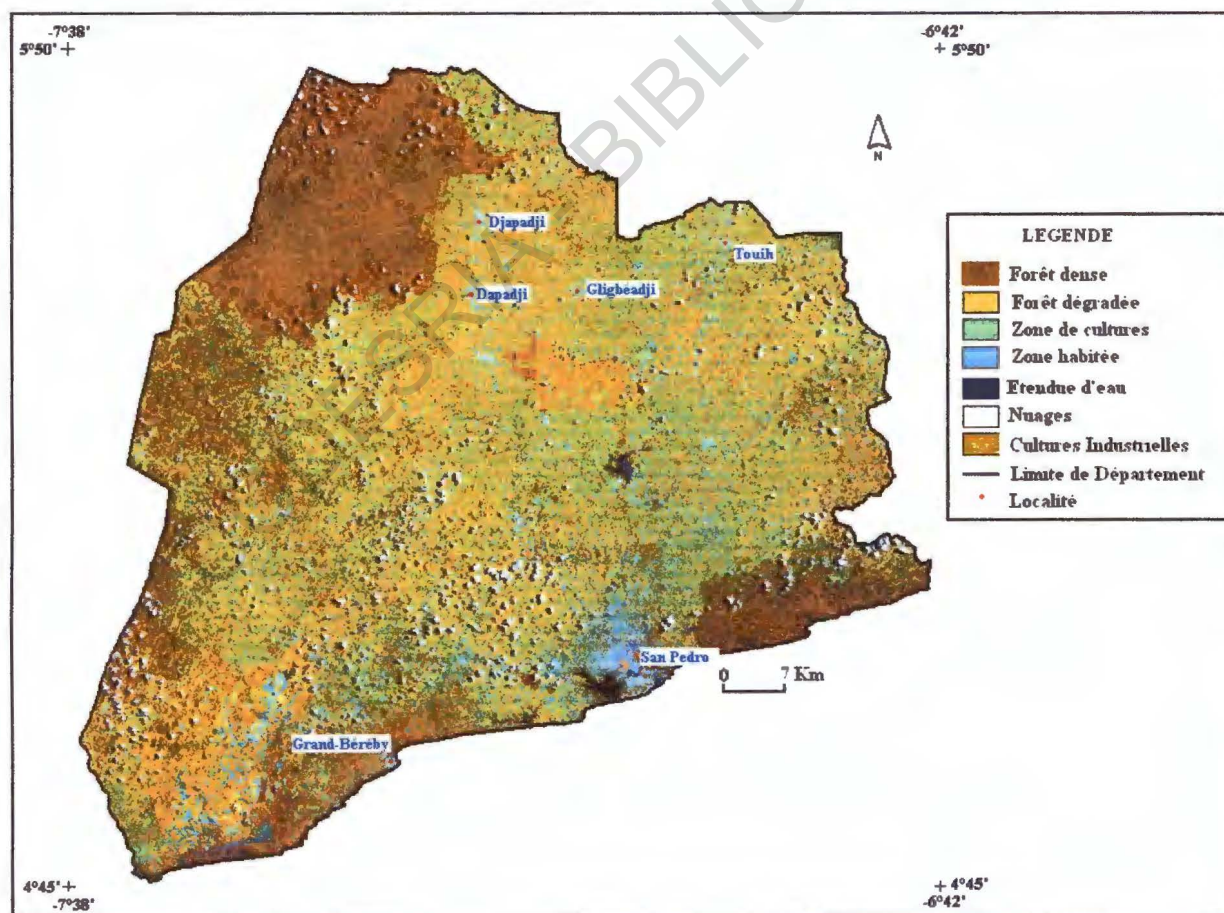


Figure 3 : Image extraite de la zone d'étude

II.2.2. Amélioration du contraste de l'image

« Une image brute ne permet pas une extraction directe des objets à analyser » (Coster et Chermant, 1985). Pour une meilleure identification des informations contenues dans les images, il faut procéder, par diverses techniques, à l'amélioration du contraste de l'image. Cela inclut tous les procédés consistant à modifier l'aspect visuel de l'image en vue de faciliter son interprétation. Plusieurs méthodes d'amélioration d'image existent. Il s'agit dans le cadre de cette étude de l'étalement dynamique, l'analyse en composantes principales (ACP) et la composition colorée (RVB).

II.2.2.1. Etalement dynamique

La technique de l'étalement interactif de dynamique par point d'inflexion permet de sélectionner d'abord la portion d'histogramme à étaler et de fixer ensuite l'étendue de l'étalement à partir de l'analyse visuelle des points d'inflexion de l'histogramme. Cette opération a été réalisée sur les différentes compositions colorées que nous avons réalisées:

- ETM+4 (R) / ETM+5 (V) / ETM+3 (B)
- NDVI (R) / ACP 3 (V) / ACP 1 (B)

III.2.2.2. Analyse en composantes principales (ACP)

L'information recueillie dans les différentes bandes spectrales est fortement corrélée (Tableau I). L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est nécessaire pour réduire le nombre de bandes en présence afin de ne retenir que celles contenant les informations pertinentes. Cet algorithme permet aussi d'accentuer le contraste de l'image, mettant ainsi en évidence l'information recherchée : les types d'affectations du sol.

Tableau I : Matrice de corrélation des canaux bruts de Landsat ETM+

Bandes	ETM+ 1	ETM+ 2	ETM+ 3	ETM+ 4	ETM+ 5	ETM+ 7
ETM+ 1	1					
ETM+ 2	0,93	1				
ETM+ 3	0,89	0,96	1			
ETM+ 4	0,42	0,64	0,51	1		
ETM+ 5	0,54	0,76	0,71	0,91	1	
ETM+ 7	0,68	0,86	0,96	0,72	0,92	1

Le niveau de corrélation entre les différentes bandes de l'image est supérieur à 50% sauf entre les bandes ETM+1 et ETM+4. Pour ces deux bandes, la corrélation est de 42 %. Les plus fortes corrélations s'observent entre les bandes ETM+ 3 et ETM+ 2 d'une part et ETM+ 3 et ETM+ 3 d'autre part. Le tableau ci-dessus présente les corrélations entre les différents canaux de l'image.

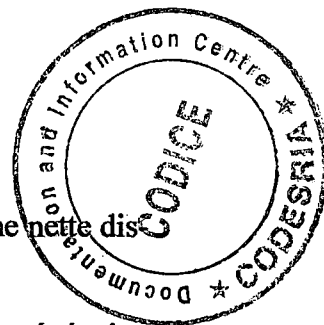
III.2.2.3. Composition colorée

Les compositions colorées permettent la visualisation concrète des images satellitaires. Elles offrent une meilleure synthèse de l'information. Il s'agit de créer une image composite (images fausse couleur) en utilisant les couleurs primaires que sont le rouge (R), le vert (V), et le bleu (B) pour trois canaux d'entrée. Les compositions colorées réalisées dans ce travail sont les suivantes :

- ETM+4 (R) / ETM+5 (V) / ETM+3 (B)
- NDVI (R) / ACP 3 (V) / ACP 1 (B)

En effet, ces différentes bandes mettent en évidence des informations spécifiques :

- ETM+ 3, canal du visible, fait mieux ressortir les sols nus mais permet aussi une nette distinction entre les sols nus et la végétation vivante.
- ETM+ 4, canal du proche infra-rouge, est très riche en informations portant sur la végétation et permet également une nette distinction des surfaces d'eau libre et de la végétation.
- ETM+5, canal du moyen infrarouge, se trouve mieux indiqué aussi bien pour l'étude de la végétation vivante, de la caractérisation de la végétation sénescence ou sèche que pour l'identification des sols et des roches (Bannari, et *al*, 1995).



II .2.3. Extraction d'informations

II.2.3.1. Calcul d'indice de végétation

Dans cette étude, deux (2) indices ont été calculés. Il s'agit de l'indice de végétation normalisé (NDVI), et de l'indice de brillance (I B).

L'indice de végétation normalisé (NDVI) est directement lié au rayonnement photosynthétique actif absorbé par le couvert végétal (Turker et Seller, 1986) et permet de discriminer le couvert végétal. Sa formule est la suivante :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R), \text{ d'ou } NDVI = (ETM+4 - ETM+3) / (ETM+4 + ETM+3).$$

L'indice de brillance est dérivé à partir des bandes 3 et 4 de Landsat TM selon la formule suivante : $\sqrt{PIR^2 + R^2}$

La formule peut s'appliquer aux bandes 3 et 4 de Landsat ETM+. L'indice de brillance dans ce cas là s'écrit comme suit : $\sqrt{(ETM + 4)^2 + (ETM + 3)^2}$

II.2.3.2. Classification de l'image Landsat 7

Dans cette étude, nous nous sommes limités à réaliser une classification supervisée parce que nous avons une connaissance a priori des différents objets existants sur le terrain (localisation, nature) à travers une carte d'occupation du sol existante du secteur réalisée par le CCT en 2005. Ainsi la photo-interprétation, l'utilisation de cartes thématiques (données auxiliaires) permettent de repérer sur l'image des zones homogènes. La classification supervisée a été réalisée sur la base d'une composition colorée faite à partir des néo-canaux que sont l'indice de végétation normalisé (NDVI), les composantes principales 3 et 1 (ACP 3, ACP 1) et l'indice de brillance. Dans le cadre de ce travail, l'algorithme de classification dit *Maximum de vraisemblance* a été utilisé. Cette méthode, par la règle d'affectation de chaque pixel, permet de réduire les risques d'erreur, en utilisant au mieux les probabilités d'appartenance. L'appartenance d'un pixel à une classe est déterminée suivant la probabilité plus ou moins importante d'y être intégrée. Il s'agit de la méthode jugée la plus performante par de nombreux auteurs (Bonn et Rochon, 1992).

▪ Evaluation de la classification supervisée

L'évaluation de la classification supervisée s'est faite par l'analyse de la séparabilité des classes à travers la matrice de confusion (tableau IV) qui permet d'obtenir les indices de performance que sont la précision cartographique, la précision de l'inventaire, l'erreur de commission, l'erreur d'omission et la précision globale. Une synthèse de tous les traitements d'images effectués sur l'image est présentée à la figure 4.

▪ Amélioration de la classification supervisée

Très souvent, les images classifiées présentent certaines hétérogénéités ou incohérences (tâches ou trous dans les zones classées) qui sont soit le reflet fidèle de la réalité spatiale contenue dans les images, soit des erreurs de classification.

Pour avoir de bons résultats de la classification, il faut corriger ces erreurs par une généralisation de l'environnement en ignorant les hétérogénéités locales au profit de la classe d'objet qui domine dans le voisinage.

Il faut pour cela, utiliser des opérateurs morphologiques que sont les filtres. Ainsi, pour que la classification supervisée retenue pour la carte finale soit plus lisible, plus synthétique et opérationnelle, nous y avons appliqué un filtre médian 3X3. Cet opérateur procède d'abord par la suppression des pixels isolés, ensuite, à une homogénéisation des classes en

supprimant toutes les hétérogénéités locales. Il présente l'avantage d'une homogénéisation du contenu des classes sans grande modification de l'information spatiale.

Tous ces traitements ci-dessus énumérés, nous ont permis d'aboutir à l'élaboration d'une carte de l'occupation du sol du département de San Pedro pour l'année 2001.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

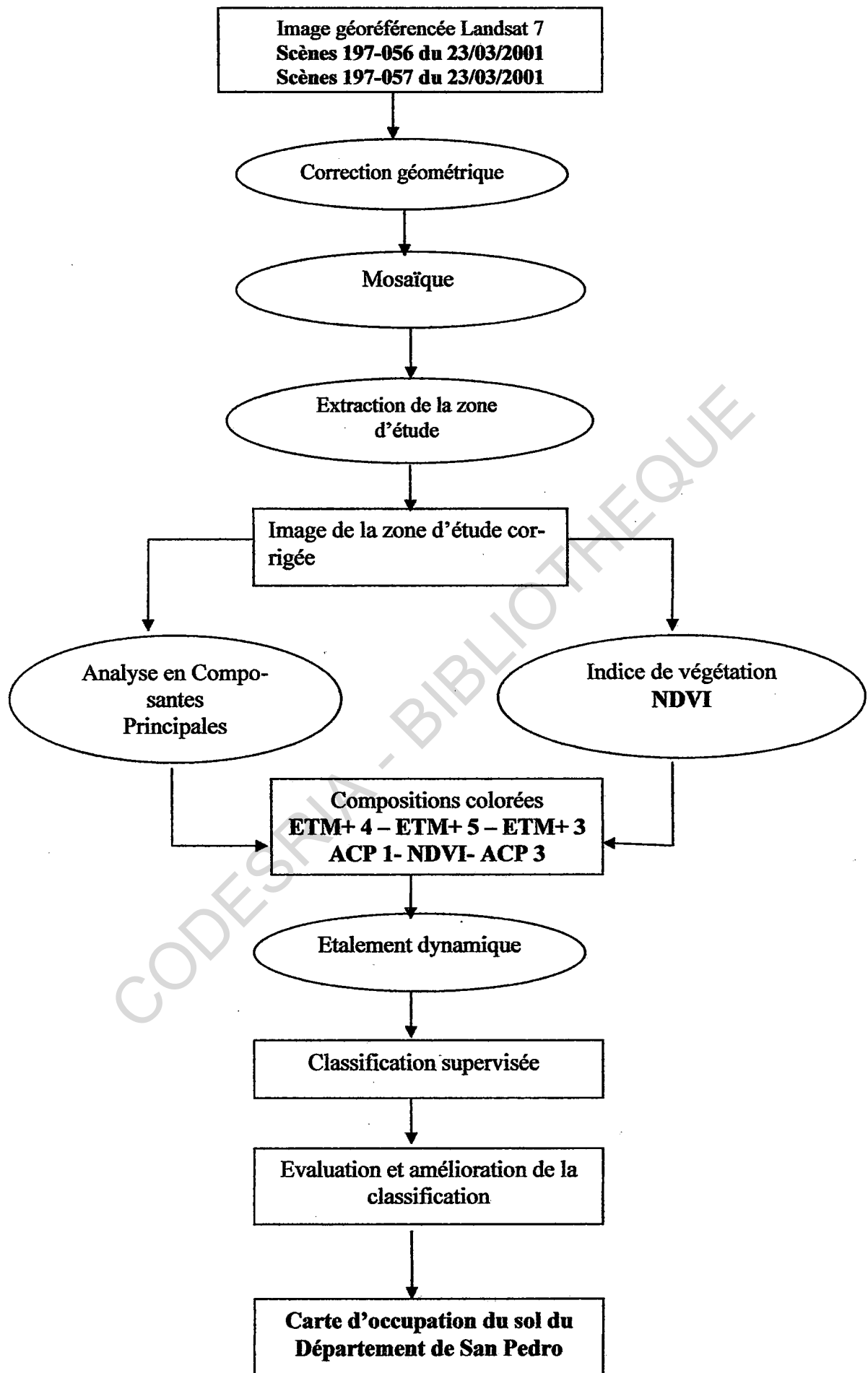


Figure 4 : Schéma récapitulatif des traitements réalisés

Conclusion partielle

Les images Landsat ETM+ utilisées dans cette étude ont subi de nombreuses opérations de traitement numériques afin d'obtenir la carte d'occupation du sol. Tout d'abord, une mosaïque des deux scènes d'images couvrant le département a été réalisée afin d'extraire la zone d'étude et de procéder à la correction géométrique. Ensuite, l'analyse en composantes principales a été effectuée pour décorrélérer les différentes bandes spectrales de l'image. Pour améliorer l'interprétation visuelle de l'image, deux compositions colorées ont été réalisées à partir des canaux bruts ETM+ 4, ETM+ 5 et ETM+ 3 d'une part et des néo-canaux NDVI et IB d'autre part. Enfin, une classification supervisée a été effectuée directement à partir des néo-canaux ACP 1, ACP 3, NDVI et IB, parce que les données secondaires (carte d'occupation du sol du CCT élaborée en 2005, carte topographique au 1/ 50 000 et carte du bilan forestier), permettaient d'identifier les différentes unités géographiques contenues dans l'image.

CHAPITRE III

**RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS
ET DISCUSSION**

III. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III.1. Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales, permettant de décorrélérer l'information sur différentes bandes de l'image, a été réalisée dans cette étude pour extraire les informations communes aux différents canaux bruts (Tableau II). Les trois premières composantes (ACP 1, ACP 2 et ACP 3) résument 99,23 % de l'information spectrale. Cependant, pour la suite des travaux, seule la première et la troisième composante (ACP 1 et ACP 3) ont été retenues. En effet, ces composantes principales présentent une meilleure qualité visuelle. Les images des trois premières composantes sont présentées aux figures 5, 6 et 7.

Tableau II : Variances des différentes composantes de l'ACP

Composantes	Valeur propre	Variance (%)	Variance cumulée (%)
1	4756,7105	80,43	80,43
2	897,0113	15,17	95,60
3	214,9334	3,63	99,23
4	33,2102	0,56	99,79
5	7,7637	0,13	99,92
6	4,7909	0,08	100

A l'analyse du tableau II, nous pouvons observer que :

- les variances décroissent de façon progressive de l'ACP1 à l'ACP6
- les trois premières composantes concentrent 99,23 % de l'information contenue dans les canaux de l'image brute.
- l'ACP1 80,43 % et l'ACP3 3,63 % présentent les images mieux contrastées.

Tableau III : Matrice de corrélation entre ACP

Canaux ACP	ACP1	ACP2	ACP3	ACP4	ACP5	ACP7
ACP1	1					
ACP2	-0,22	1				
ACP3	-0,38	-0,001	1			
ACP4	0,16	0,02	-0,32	1		
ACP5	-0,83	0,53	0,19	-0,05	1	
ACP7	0,64	-0,15	0,31	0,12	-0,59	1

La matrice de corrélation des ACP montre de façon générale une decorrélation entre les différentes composantes principales. Cependant, l'ACP 5 et L'ACP 7 restent fortement corrélées respectivement avec l'ACP 2 (53 %) et l'ACP 1 (64 %). Les valeurs négatives dénotent elles, de la complémentarité qui existe entre les informations contenues sur les différentes composantes. C'est-à-dire que l'ACP 5, par exemple, fournit à la première composante 83 % des informations dont elle ne disposait pas.

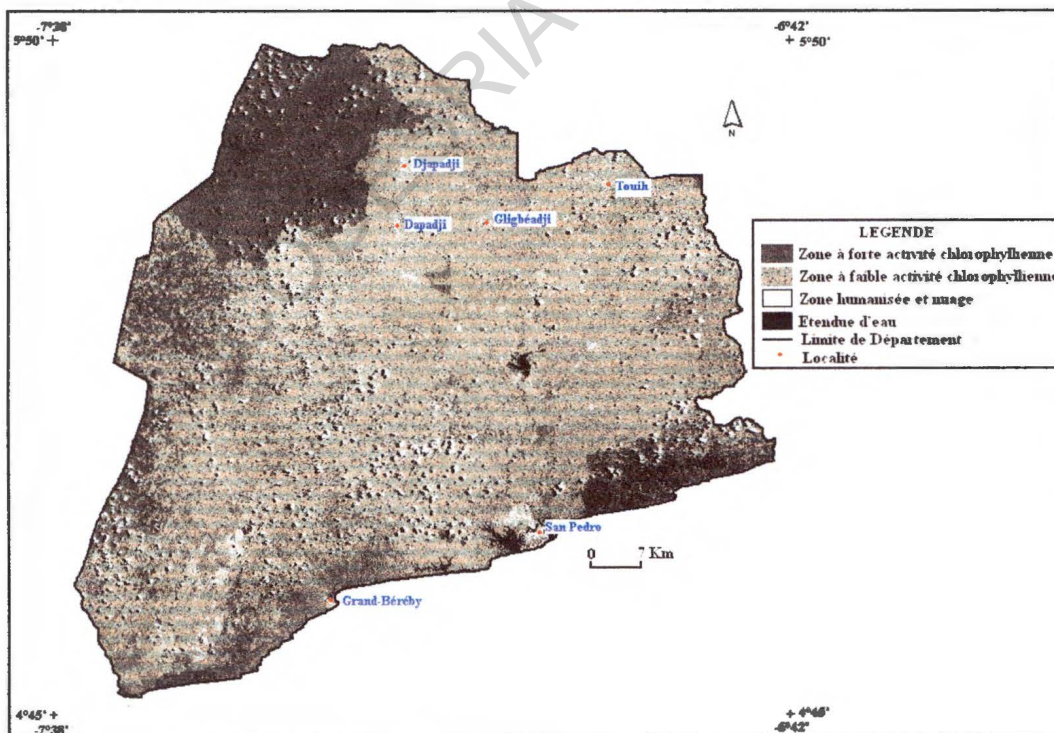


Figure 5 : Première composante principale

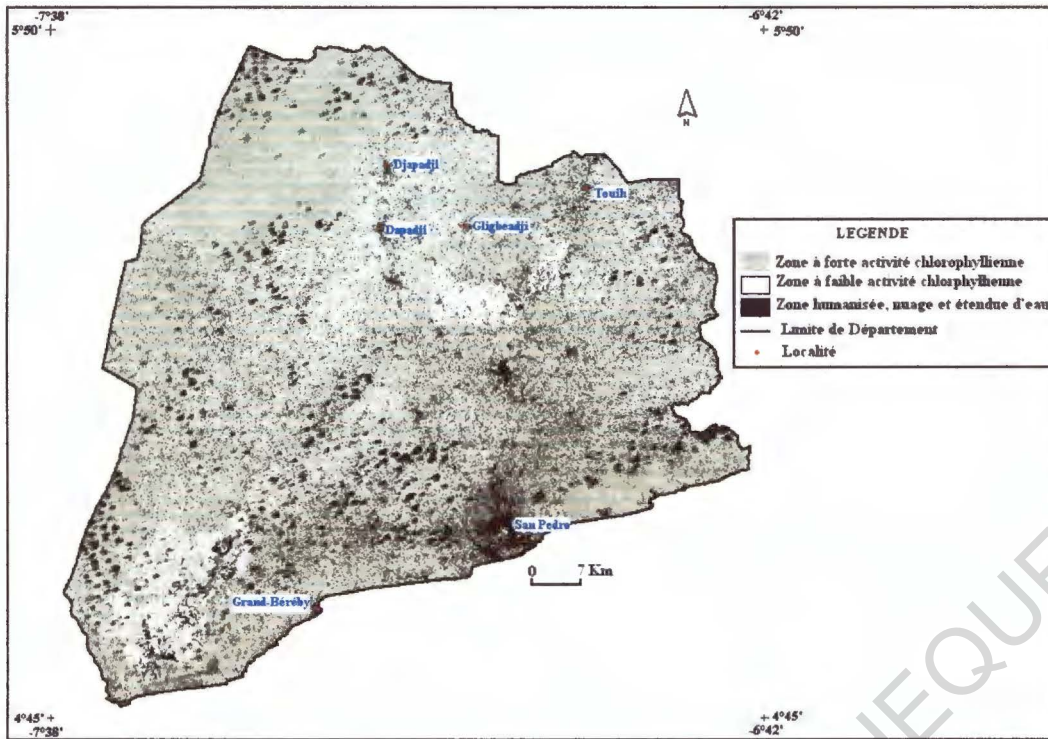


Figure 6 : Deuxième composante principale

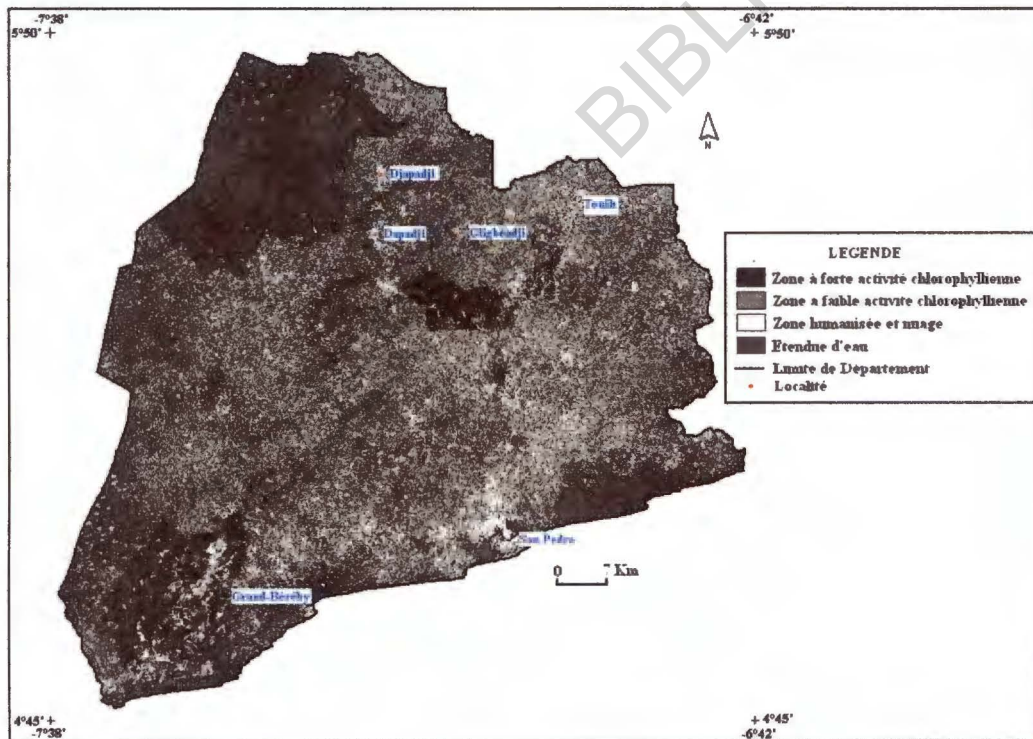


Figure 7 : Troisième composante principale

III.2. Indices de végétation

III.2.1. Le NDVI

Cet indice (figure 8) met en évidence la végétation à forte activité chlorophyllienne qui apparaît sur l'image en couleur bleue. Les secteurs où l'activité chlorophyllienne est faible apparaissent en bleu plus clair alors que les zones habitées et les nuages présents sur l'image sont en violet. Il est très utilisé dans les études d'occupation du sol pour mettre en relief les différents types de formations végétales présentes dans la zone étudiée.

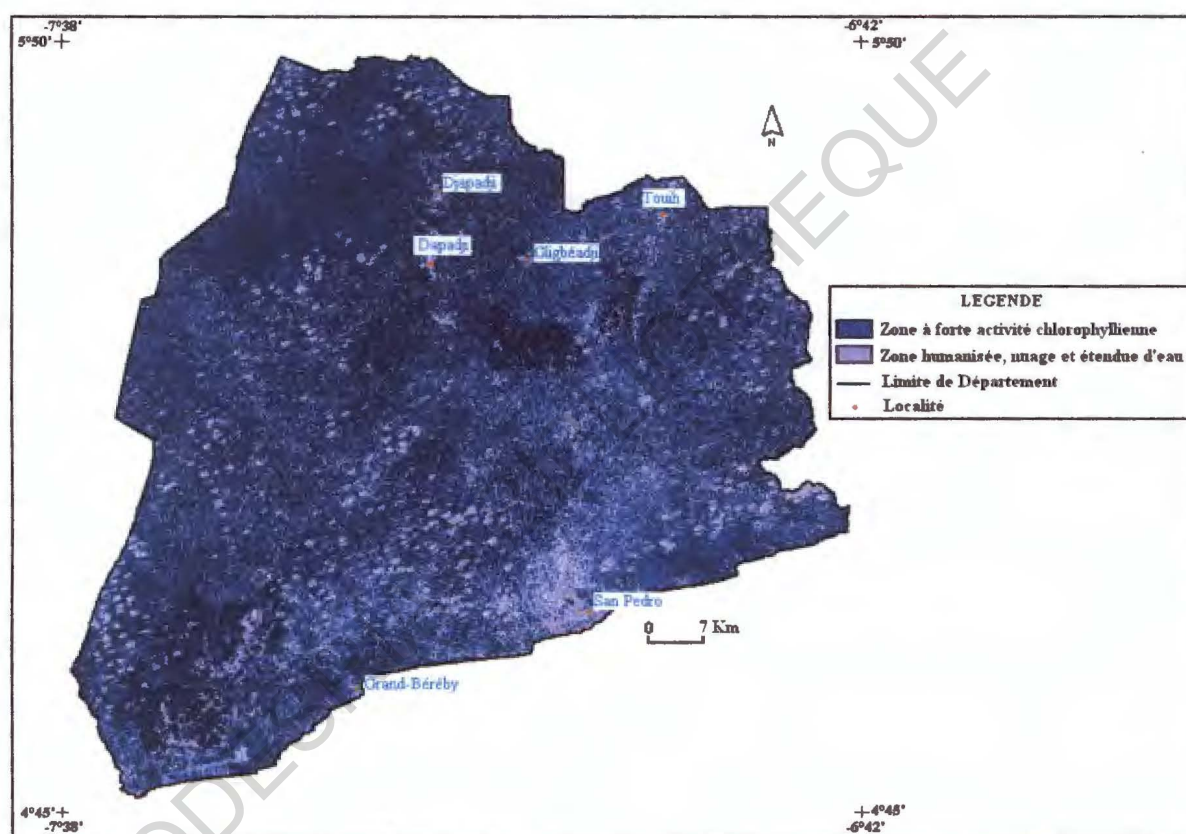


Figure 8 : Indice normalisé de végétation (NDVI)

III.2.2. Indice de brillance

Cet indice produit une image (figure 9) qui présente les espaces humanisés (peu ou faiblement chlorophylliens) et les nuages en blanc alors que les zones de végétation sont en gris. Les étendues d'eau apparaissent sur l'image en noir. L'indice de brillance a été utilisé pour mettre en évidence les zones où l'action humaine est importante. Ces zones laissent apparaître des sols partiellement ou totalement dénudés.

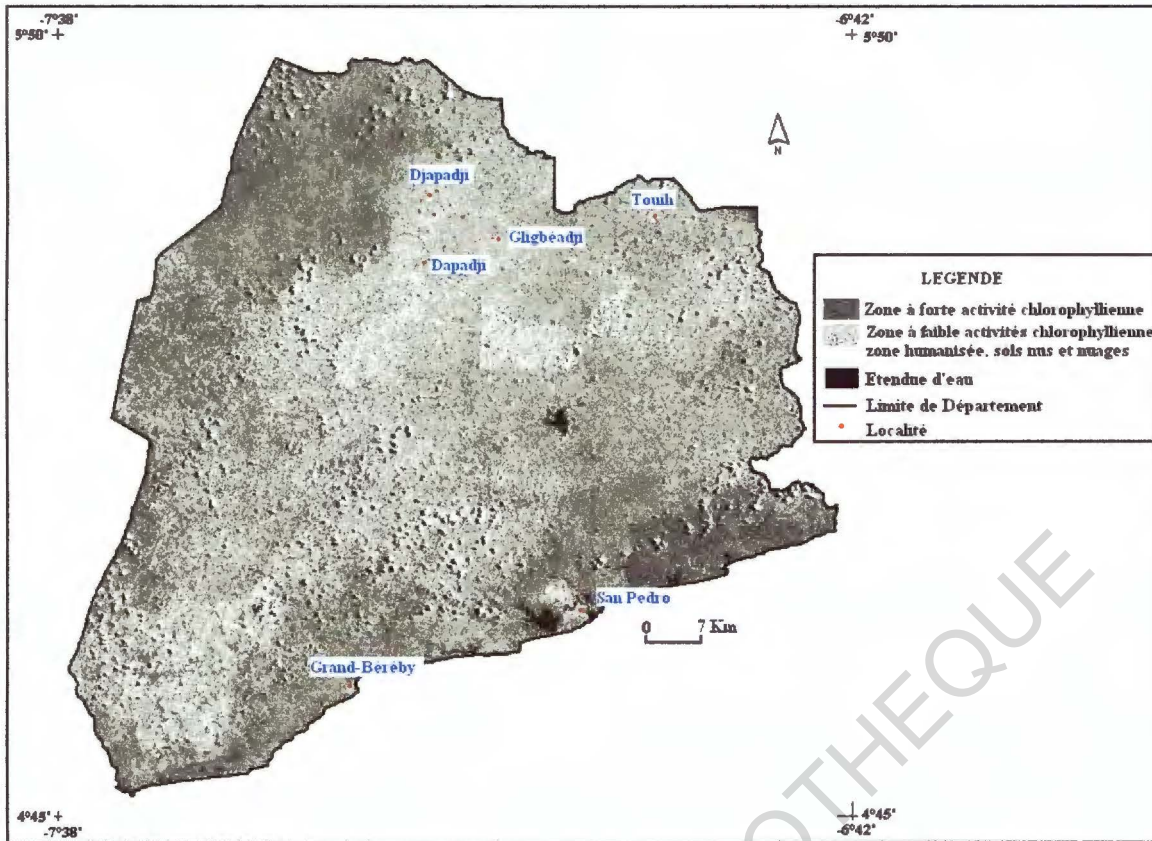


Figure 9: Indice de Brilliance

III.3. Compositions colorées

La composition colorée est une image couleur générée à partir de trois couleurs de base que sont le rouge (R), le vert (V) et le bleu (B). A chacune de ces couleurs, l'analyste assigne non seulement une bande bien précise de l'image, mais aussi la valeur du niveau de gris correspondante. Dans notre étude, les deux compositions colorées suivantes ont été réalisées :

- ETM+4 (R) / ETM+5 (V) / ETM+3 (B)
- NDVI (R) / ACP 3 (V) / ACP 1 (B)

III.3.1. Composition colorée : ETM+4 (R) / ETM+5 (V) / ETM+3 (B)

L'image obtenue après égalisation d'histogramme (figure 10) met en relief les formations forestières bien conservées (en couleur marron) que constituent les forêts classées du rapide Grah au Nord-Ouest et du Monogaga à l'extrême Sud-Est de l'image. Les surfaces d'eau (lacs, lagunes et fleuves) apparaissent en bleu foncé alors que la couleur bleu ciel clair fait référence aux espaces habités et sols. Les zones de cultures sont représentées par le vert

alors que la couleur orange discrimine des cultures industrielles. Enfin, le jaune ocre quant à lui met en évidence la forêt dégradée.

III.3.2. Composition colorée : NDVI (R) / ACP 3 (V) / ACP 1 (B)

Cette composition colorée (Figure 11) met en évidence les espaces fortement dégradés que sont les sols nus, les champs et jachères.

Ensuite, nous avons appliqué un étalement dynamique afin d'améliorer la qualité de l'image pour une meilleure reconnaissance des unités d'occupation du sol. Les zones de forêts bien conservées (couleur ocre) sont également très bien visibles. Sur l'image les espaces humanisés apparaissent en couleur bleu ciel.

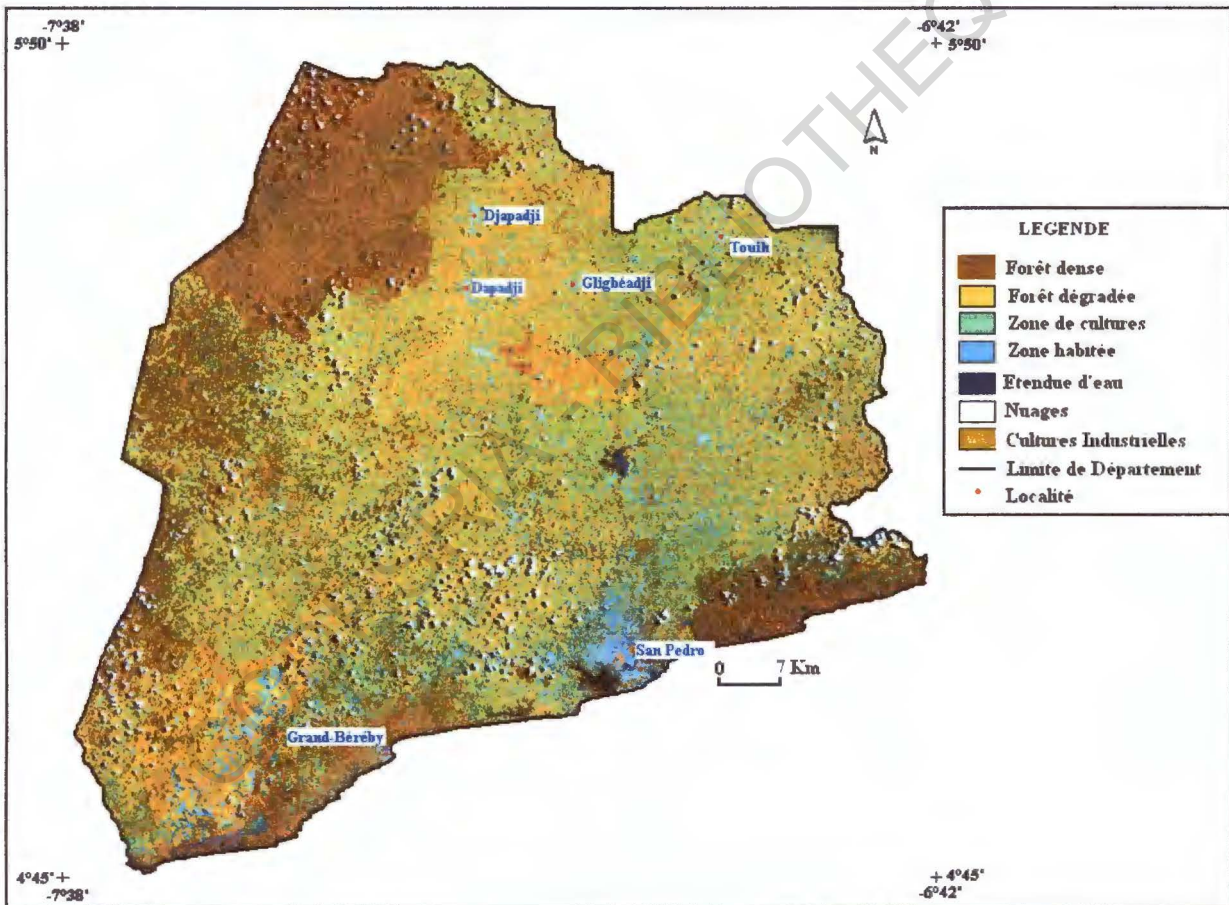


Figure 10 : Composition colorée ETM+ 4 / ETM+ 5 / ETM+ 3

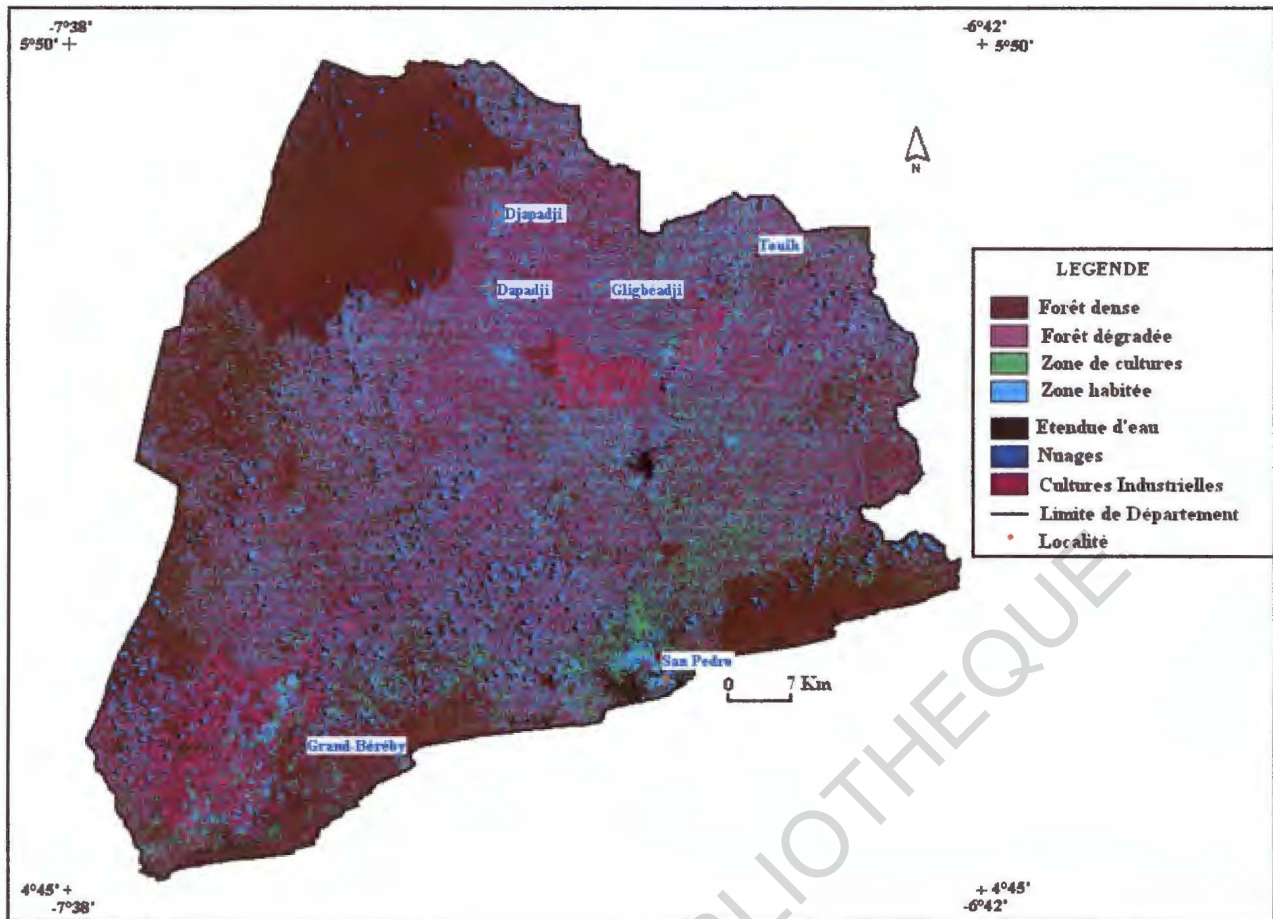


Figure 11 : Composition colorée NDVI (R)-ACP 3 (V)-ACP 1 (B)

III.4. Classification supervisée

III.4.1. Choix des thèmes cartographiques

Se basant sur les unités d'occupation du sol définies par le CCT (carte d'occupation du sol, 2005) et la carte du bilan forestier, nous avons défini sept thèmes dont six types d'occupation du sol et un thème regroupant les nuages présents sur l'image :

- forêt dense
- forêt dégradée
- établissements humains
- cultures et jachères
- étendue d'eau
- cultures industrielles
- nuages

III.4.2. Description des unités cartographiques retenues

Unité 1 : la forêt dense

Sous ce vocable, nous avons regroupé les forêts classées, les zones humides (mangroves, les forêts marécageuses et forêts galeries) et les autres surfaces forestières encore bien conservées.

Unité 2 : la forêt dégradée

Il s'agit essentiellement des forêts qui ont été détériorées par les activités humaines. Elle présente une densité ligneuse faible et s'apparente au plan physiologique aux plantations forestières.

Unité 3 : les établissements humains

Ce thème regroupe les agglomérations rurales, les campements agricoles, les villes, les plages et aussi les sols nus. Tous ces éléments ont des valeurs de réflectance très voisines.

Unité 4 : étendue d'eau

Nous trouvons dans ce thème à la fois les fleuves et les retenues d'eau comme les lacs et les lagunes.

Unité 5: cultures et/ou jachères

Ce sont surtout les unités agricoles individuelles des petits exploitants. Cette unité cartographique concerne plus précisément les plantations de café, cacao, et les cultures vivrières. Nous avons inclus aussi dans ce thème les jachères c'est-à-dire d'anciennes parcelles de cultures laissées au repos ou des parcelles défrichées pour la création de nouvelles plantations.

Unité 6: cultures industrielles

Représentent les différentes cultures de type industriel qui mobilisent de grandes étendues. Ce sont soit des plantations appartenant à des unités agro-industrielles, soit des plantations villageoises. Il s'agit respectivement de plantation de palmiers à huile, d'hévéa et de cocoteraie.

Unité 7: nuages

Ce thème prend en compte les nuages et leurs ombres portées qui cachent par endroit les informations. En effet, ces formations nuageuses recouvrent par endroit différents éléments du paysage. Ne pas les isoler augmenterait le risque que leur signature spectrale perturbent la classification.

La carte d'occupation du sol du Département de San Pedro pour l'année 2001 est présentée par la figure 12.

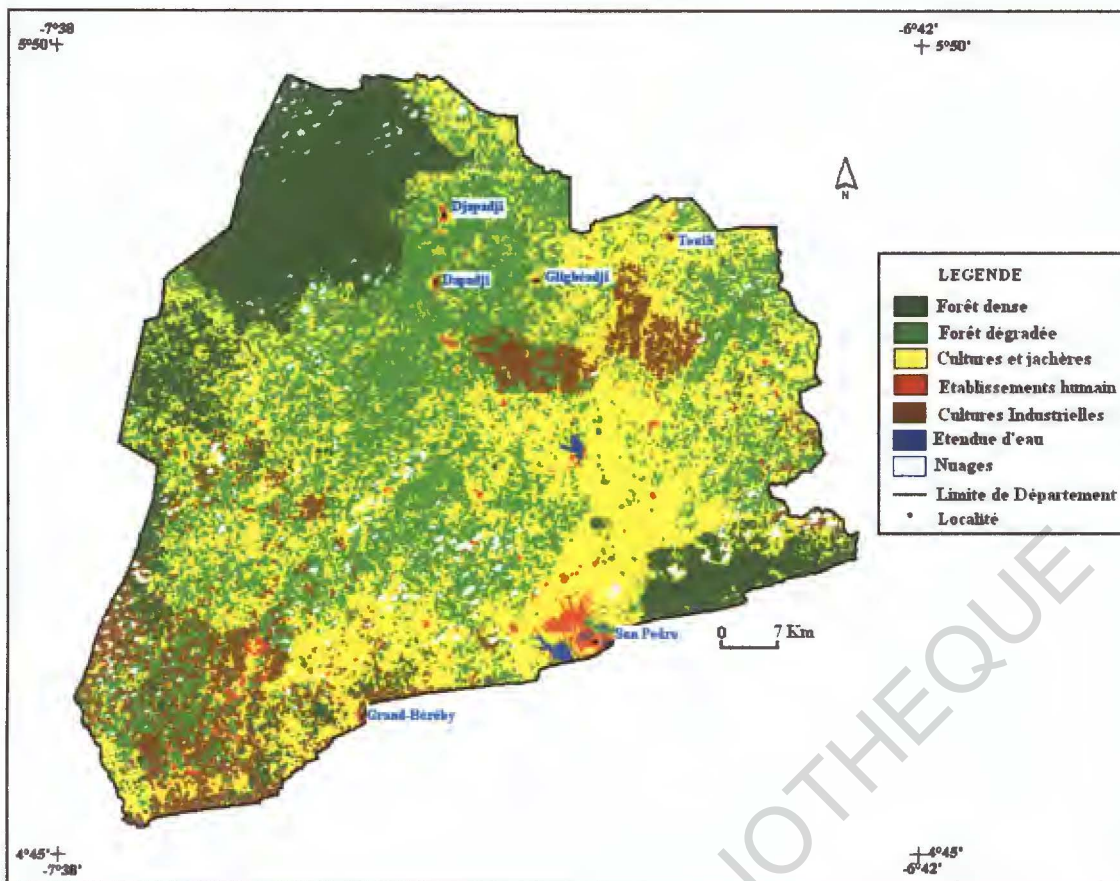


Figure 12 : Carte d'occupation du sol du département de San Pedro (Scène 197 -056 et 197-057 du 23 Mars 2001)

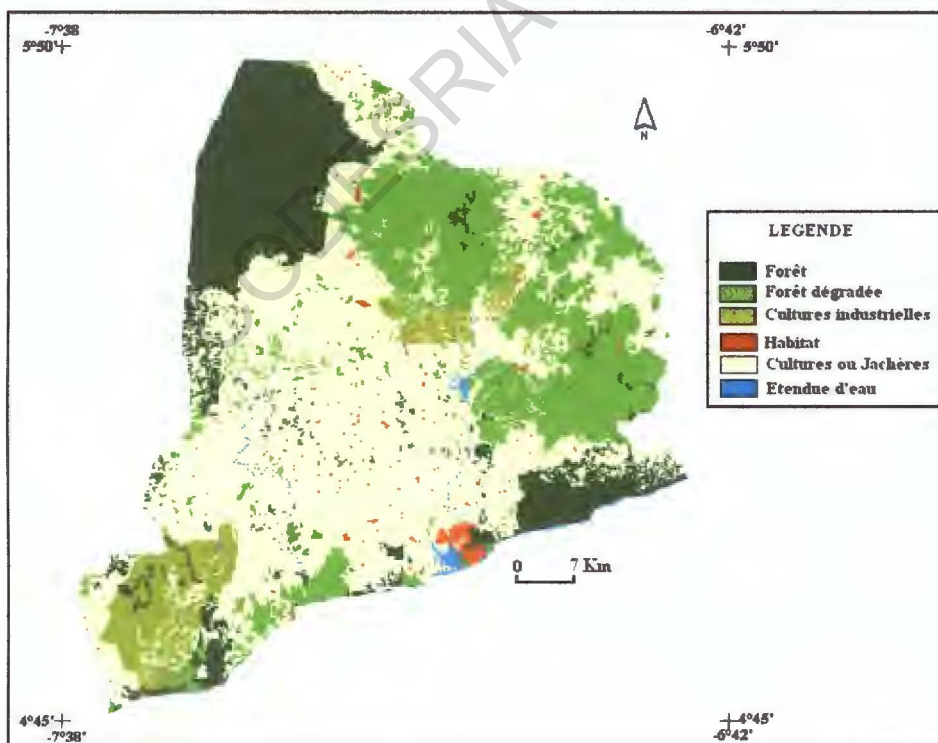


Figure 13 : Carte d'occupation du sol du département de San Pedro (CCT, 2005 modifiée par Guedé)

III.4.3. Evaluation de la classification supervisée

III.4.3.1 Matrice de confusion

Cette technique est effectuée pour apprécier le degré de validité du traitement (classification) réalisé sur l'image. Les éléments exprimant la précision et les erreurs de traitement sont calculés à partir de la matrice de confusion (Foody, 1992). Il s'agit de la précision cartographique, la précision d'inventaire, la précision globale du traitement et les erreurs d'omission et de confusion. La matrice de confusion est présentée au tableau IV.

La précision cartographique est représentée par le nombre de pixels bien classés dans un thème, sur l'ensemble des pixels terrain du thème. Lorsque cette valeur avoisine 100 %, le traitement est considéré comme valide (Dibi, 2002). Dans le cadre de cette étude, l'image classifiée présente une précision cartographique moyenne de 79,26 %. Les différents thèmes utilisés pour la classification présentent des précisions cartographiques supérieures à 60 %. Les pourcentages les plus élevés se constatent au niveau des thèmes « forêts denses », « forêts dégradées » et établissements humains » avec respectivement 95,21 %, 89,28 % et 85,55 %. La précision cartographique la plus faible (61,85 %) s'observe au niveau du thème « étendue d'eau ». Cette faible performance se justifie en partie par la difficulté d'échantillonner les cours d'eau longés par les forêts galeries.

La précision de l'inventaire est donnée par le nombre de pixels classés dans un thème sur l'ensemble des pixels terrain du thème. Les types d'affectation au sol ne sont pas homogènes lorsque la valeur de la précision d'inventaire est fortement éloignée de 100 %. Ainsi, les thèmes « étendue d'eau », « forêt dense », « cultures et jachères », « cultures industrielles » et « nuage », avec une précision d'inventaire supérieure à 70 %, présentent une homogénéité importante alors que le thème « établissements humains » est très peu homogène avec une précision d'inventaire estimée à 57,80 %. Cependant, les thèmes « forêt dense » et « nuage » présentent des valeurs maximum de précision d'inventaire estimées respectivement à 97,17 % et 97,48 %.

La précision globale du traitement est donnée par le nombre de pixels bien classés dans un thème sur le total des pixels terrain. Dans le cadre du traitement réalisé dans cette étude, elle est de l'ordre de 82,96 %. Ce qui signifie qu'en réalité que, sur 100 pixels terrain, 82 sont effectivement affectés à leur thème, les 18 pixels restants étant mal classés à cause de diverses erreurs qui peuvent être soit des erreurs d'omission, soit des erreurs de commission.

Le pourcentage de traitement global (82,96 %) et de précision cartographique (79,26 %) réalisé au cours de la classification laisse entrevoir des erreurs de commission (20,75 %) et d'omission (18,45 %) très importantes. Les thèmes « étendue d'eau », « nuage », « cultures et jachères » et « cultures industrielles » avec respectivement 38,15 %, 28,60 %, 25,59 % et 22,92 % détiennent les erreurs de commission les plus élevées. Par contre le thème « forêts dégradées » présente la plus faible erreur de commission. Celle-ci est estimée à 4,79%.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

Pour ce traitement, l'erreur de commission moyenne est de 20,75 %. Ce taux est très élevé comparé à ceux obtenues par Dibi (11,55 %) en 2001 et Sylla (05,80 %) en 2002.

Tableau IV : Matrice de confusion

		Image de contrôle							Total pixels classification	Précision de l'inventaire (%)	Erreur de commission (%)
		1	2	3	4	5	6	7			
Image classifiée	Etendue d'eau 1	66 986	13 164	4 784	9 220	11 268	351	2 537	108 310	79,28	38,15
	Etablissements humains 2	16	279 364	149	26 221	3	737	6 412	312 902	57,80	10,72
	Forêt dense 3	21	425	1 479 426	41 199	194 378	13 840	71	1 729 360	97,17	14,45
	Cultures et jachères 4	0	120 344	3 118	2 119 907	204	604 891	437	2 848 901	91,65	25,59
	Culture industrielle 1 5	339	532	27 724	61 766	714 825	122 088	124	927 398	71,64	22,92
	Forêt dégradée 6	0	11	7 226	37 650	73 082	2 343 241	2	2 461 212	75,83	4,79
	Nuages 7	17132	69457	16	16 980	4 019	4923	284780	397 307	97,48	28,60
	Total pixels terrain	84 494	483 297	1 522 443	2 312 943	997 779	3 090 071	294 363	8 785 390		
	Précision cartographique (%)	61,85	89,28	85,55	74,41	77,08	95,21	71,41			
	Erreur d'omission (%)	20,72	42,20	2,83	8,35	28,36	24,17	2,52			

Tableau V : Moyennes des indices

	Erreur d'omission	Erreur de commission	Précision cartographique	Précision de l'inventaire
Moyenne	18,45 %	20,75 %	79,26 %	81,55 %
Précision globale			82,96 %	
Coefficient kappa			0,78 %	

III.4.4. Comparaison de la classification

Il s'agit ici de comparer les résultats de la classification obtenue dans le cadre de cette étude avec la carte d'occupation du sol réalisée par le CCT. Notre analyse portera sur l'appréciation des superficies occupées par les différents types d'occupation du sol sur les différentes cartes (tableau VI).

Tableau VI: Superficie en ha et proportion occupée par les différents thèmes

Thèmes	Carte du CCT modifiée		Carte d'occupation du sol réalisée	
	Superficies en ha	Proportion en %	Superficies en ha	Proportion en %
Forêt dense	120 500,77	17,69	117 317,35	17,22
Forêt dégradée	147 227,00	21,62	125 192,46	18,38
Habitat	7 451,82	1,09	9 109,78	1,34
Cultures ou jachères	359 828,06	52,83	369 555,52	54,25
Cultures industrielles	41 030,76	6,03	39 467,21	5,79
Etendue d'eau	4 960,74	0,73	6 705,75	1
Nuages	-	-	13 721,15	2,02
Total	681 049,14	100	681 049,22	100

En effet, sur les différentes cartes, les écarts s'observés au niveau de chaque types d'occupation du sol sont faibles. Pour les thèmes « forêt dense », « forêt dégradée » et « cultures industrielles », les superficies estimées par le CCT sont supérieures à celles estimées dans la classification réalisée. La situation inverse s'observe pour les autres thèmes (« habitat », « cultures ou jachères » et « étendue d'eau »).

III.5.DISCUSION

La carte d'occupation du sol de l'espace d'étude a été élaborée à partir de la méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance. L'application de cet algorithme a permis d'identifier six types d'affectation ou d'utilisation du sol et un autre thème regroupant les nuages. Le choix d'isoler les nuages présents sur l'image dans la classification répond à la volonté de minimiser leurs effets.

L'analyse de la matrice de confusion révèle un pourcentage élevé d'erreurs de commission (20,75 %) et d'omission (18,45 %) signe d'une difficulté à discriminer de façon très évidente certains thèmes. Ces taux sont largement supérieurs à ceux obtenus, dans une étude similaire réalisée à partir d'images satellitaires Landsat ETM+ dans les îles Ehotilé, par Kwassi (2001) avec des pourcentages estimés respectivement à 10,63 % et 10,99 %.

En effet, les cultures industrielles constituées de plantations d'hévéa, de palmiers à huile et de cocoteraie présentent des signatures spectrales très proches de celle des arbres des blocs de forêts. Ainsi, ce thème présente une importante confusion avec les thèmes « forêts denses » et « forêts dégradées ». D'où la nécessité pour une étude ultérieure plus fine d'utiliser des images de très haute résolution spectrale et spatiale. Nous pourrions aboutir à de meilleurs résultats avec les images Landsat si les données secondaires à notre disposition avaient été complétées par des missions. Ces dernières auraient permis de choisir les parcelles d'entraînement plus homogènes.

Malgré, la difficulté à discriminer de façon évidente certains thèmes et une précision globale de traitement relativement importante, nous avons pu réaliser une carte d'occupation du sol très proche de celle élaborée par le CCT en 2005. En effet, avec une méthode différente et des images de résolution spatiale différente, nous avons obtenu pour les différents types d'affectation du sol des superficies très voisines. Cela démontre que l'analyse informatique des images peut donner des résultats probants.

La précision globale obtenue lors du traitement informatique réalisé est de 82,96 %. Cette valeur est négligeable comparativement à celles obtenues par Sylla (2002) et Kwassi (2001) qui ont obtenus 95,44 % et 93,98 %. Cependant, elle est proche de celle obtenue par Dibi (2001) estimée à 87,43 %.

Au regard de la carte d'occupation du sol obtenue, nous pouvons constater de façon générale, une très forte humanisation de l'espace départemental. En effet, mis ensemble, les surfaces de cultures (thème 4 et 5) et les établissements humains (thème 2) laissent apparaître une dégradation importante. En terme de superficie, ils représentent 61,38 % du terri-

toire départemental. Les forêts dans leur ensemble, c'est-à-dire l'unité forêt dense + forêt dégradée constituent un peu plus du quart de l'espace départemental. La très forte demande en terre pour des besoins d'exploitation agricole n'est pas un phénomène récent mais semble se faire maintenant au détriment des forêts classées et réserves naturelles du département voir même de la région. Pour ESSAN (1995), la raréfaction des terres conduit les paysans à infiltrer les forêts classées. Il estime que les forêts classées du département de San Pedro, Rapide Grah et Monogaga, connaissent des taux de dégradation respectifs de 50-75 % et 80-90 %.

Conclusion partielle

La classification supervisée par maximum de vraisemblance réalisée avec une précision globale de traitement à 82,96 % a permis d'identifier 7 types d'occupation du sol. La carte d'occupation du sol du département de San Pedro dérivée de cette classification révèle une très forte anthropisation du territoire. En effet, plus de 60 % de l'espace d'étude est sous l'emprise de l'activité humaine.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude réalisée à partir de l'imagerie satellitaire Landsat ETM+ du 23 mars 20001, a permis d'élaborer une carte d'occupation du sol et d'estimer les superficies des réserves forestières du département de San Pedro.

La méthodologie utilisée est basée sur une classification des images satellitaires par la méthode de maximum de vraisemblance. Avec une précision cartographique de 79,26 %, elle a permis d'identifier six grands types d'occupation du sol et un thème nuage. Il s'agit des forêts denses, des forêts dégradées, des établissements humains, des cultures et jachères, des cultures industrielles et des étendues d'eau.

Par ailleurs, l'analyse des résultats obtenus fait ressortir une forte anthropisation de l'espace marquée par le recul très important du couvert forestier. Les superficies forestières dans le département de San Pedro sont estimées à 242 509,81 hectares, ce qui représente 35,60 % du territoire.

Cette étude fait la démonstration que la télédétection est un outil performant pour la cartographie et la gestion des réserves forestières.

Cependant, la dégradation avancée des ressources naturelles de la région invite à faire les recommandations suivantes :

- Généraliser cette méthode de cartographie à l'ensemble de la région du Sud-Ouest car c'est une importante zone agricole.
- Mener un suivi très strict de l'état de l'occupation du sol à l'effet de contrôler et maîtriser les problèmes environnementaux de la région.
- Intégrer la base de données cartographique obtenue sur l'occupation du sol à un système d'information en vue d'optimiser les projets d'aménagement du territoire.
- Utiliser des images satellitaires de très haute résolution spatiale (10 mètres) en vue de réaliser une cartographie beaucoup plus détaillée ou des images Radar pour s'affranchir des contraintes nuageuses.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BANNARI A., MORIN D., et HE D.C. (1995) : Caractéristiques de l'environnement urbain à l'aide des indices de végétation dérivés des données hautes résolutions spatiales et spectrales. Actes des journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUPELF-UREF, Liège, pp 44-64.

BETPA. (1984). Projet de développement intégré de la région du Sud-Ouest (bilan diagnostique)

BONN F, et ROCHON G. (1992) : Précis de Télédétection, principe et méthode. Volume 1. Sainte-Foy, Presse de l'université du Québec / AUPELF, 485 p.

BONN F, et ROCHON G, (1996) : Précis de Télédétection, applications thématiques volume 2. Sainte-Foy, Presse de l'Université du Québec / AUPELF, 633 p.

COSTER M., et CHERMANT J.L. (1985) : Précis d'analyse d'images. Edition du CNRS, Paris, 521 p.

CILF, (1997) : Terminologie de télédétection et photogrammétrie : manuel de terminologie didactique de télédétection et de photogrammétrie, 455 p.

DIBI N.H. (2001) : Evaluation de l'imagerie spatiale haute résolution pour la cartographie du couvert végétal de la forêt classée de Bouaflé et sa périphérie. Mémoire de DEA de télédétection et SIG, Université de Cocody, 68 p.

ESSAN K. (1995) : Croissance démographique, pression foncière et dégradation de l'environnement : le cas du Sud-Ouest ivoirien. CIDEP, 43 p.

FOODY G.M. (1992): On the compensation for change agreement in image classification accuracy assessment. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58, pp 1459-1460.

GADDAS F. (2001) : Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages application à "la moyenne vallée du rhone". Thèse, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 218 p.

GUEDE M. (2005) : Atlas du littoral du Bas-Sassandra, Mémoire de Maîtrise, Université d'Abidjan-Cocody, 142 p.

HUBERT-MOY L. (2004) : Occupation du sol et Télédétection : De l'inventaire à la modélisation prédictive. HDR, Université de Renne 2 Haute Bretagne, 278 p.

KANGAH A. (2006) : Utilisation de la télédétection et d'un système d'information géographique (SIG) pour l'étude des pressions anthropiques sur les paysages géomorphologiques des savanes sub-soudanaises : exemple du degré carré de Katiola (Centre-Nord ivoirien) Thèse unique de géographie, Université de Cocody. 199 p.

KOUADIO H. B., (2006) : Apport de la télédétection et d'un système d'information géographique (SIG) à la gestion intégrée et participative des aires protégées en côte d'ivoire : application au parc national de comoé (réserve de biosphère). Rapport d'étude, 60 p.

KWASSI A.E. (2002) : Apport de la télédétection à la gestion intégrée du littoral : cartographie des mangroves et occupation du sol des îles Ehotilé (lagune Aby-Côte d'Ivoire).Mémoire de DEA de télédétection et SIG, Université de Cocody, 78 p.

LACOMBE J.P. (2001) : Initiation au logiciel Envi 3.2, Télédétection spatiale. Cahiers de Travaux Dirigés, Institut National Polytechnique de Toulouse Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, 89 p.

LENA P. (1979) : Transformation de l'espace rural dans le front pionnier du Sud-Ouest ivoirien. ORSTOM-Abidjan, 345 p.

MAS J.F., RAMIREZ I. (2001): Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. ITC Journal, pp 278-283.

MOKADEM A.I., NONGUIERMA A., DAUTREBANDE S. (1991): L'imagerie satellitaire pour l'étude des bas-fonds au sahel. Sécheresse, 2, pp 189-198.

PAIN-ORCET M., LO SEEN D., FAUVET N., TREBUCHON J.F., DIPAPOUNDJI B. (1998) : Les cartes, la télédétection et les SIG, des outils pour la gestion et l'aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale. Rapport CIRAD-Forêt, 31 p.

PUECH C. (1991): Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par des petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne. In Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris 1991, pp 323-340.

SCHWARTZ A. (1989) : Du sassandra au cavally : Une anthropologie du sous-peuplement : l'opération San Pedro et le développement du Sud-Ouest ivoirien. Thèse de doctorat, Université Paris 5, 1050 p.

SONG C., CURTIS E. WOODCOCK, KAREN C. SETO, M PAX LENNEY, et MACOMBER S.A. (2004): Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? In ISPRS Journal of photogrammetry & Remote Sensing, 59 p.

SYLLA D. (2002): Dynamique de l'occupation du sol dans le Nord de la Côte d'Ivoire (1986-2000): exemple du département de Korhogo. Mémoire de DEA de télédétection et SIG, Université de Cocody, 68 p.

TUCKER C.J et SELLERS P.J. (1986): Satellite remote sensing of primary production. International Journal of Remote Sensing, 7, pp 1395-1416.

TOUZANI A. (2005) : L'apport des outils spatiaux dans la mise à niveau de la cartographie rurale et urbaine en Afrique. Exemple, la formation poste graduée en technologie spatiale au CRASTE-LF. 2nd FIG Régional Conférence Marrakech, Maroc, 2-5 Décembre 2003, 5 p.

