

CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL DE LA VILLE DE KISANGANI (R.D. CONGO) ET SA PÉRIPHÉRIE ENTRE 2002 ET 2010

MARÉCHAL JUSTINE

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2011-2012

CO-PROMOTEURS: LEJEUNE PHILIPPE ET BOGAERT JAN

©Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL DE LA VILLE DE KISANGANI (R.D. CONGO) ET SA PÉRIPHÉRIE ENTRE 2002 ET 2010

MARÉCHAL JUSTINE

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2011-2012

CO-PROMOTEURS: LEJEUNE PHILIPPE ET BOGAERT JAN

Remerciements

Ce Travail de Fin d'Etudes a été réalisé conjointement dans l'unité « Gestion des Ressources Forestières et des Milieux Naturels » et dans l'unité « Biodiversité & Paysage », toutes deux membres du département « Forêts, Nature et Paysage » de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le travail de terrain a été pris en charge par la Faculté des Sciences de l'Université de Kisangani (UNIKIS) et par le projet d'appui à la "Recherche Forestière au Congo" (REFORCO), projet de l'Union Européenne piloté par le Centre pour la Recherche Forestière Internationale (CIFOR).

Au terme de ce travail, je tiens à remercier les nombreuses personnes qui y ont contribué et sans lesquelles un tel aboutissement n'aurait pas été possible.

Les Professeurs Philippe Lejeune et Jan Bogaert, pour leur rôle de co-promoteurs. En alliant leurs deux disciplines et leurs connaissances, ils m'ont apporté chacun dans leur domaine de multiples conseils et m'ont permis de m'améliorer sans cesse tout au long de ces six derniers mois.

Marie André, pour avoir joué le rôle d'une « co-promotrice officieuse » et pour avoir supporté mon stress et mes idées un peu trop arrêtées parfois.

Quentin Ducenne, pour avoir accepté d'accueillir au sein de son domicile une parfaite étrangère et pour l'avoir guidée et encouragée sans relâche. Kisangani sans son aide n'aurait pas été possible. Merci pour tout.

Les Professeurs Grégory Mahy et Cédric Vermeulen, pour avoir accepté d'être membres du jury.

Cédric Ilunga, pour avoir joué le rôle de binôme sur le terrain et pour m'avoir fait découvrir Kisangani.

Toute l'équipe du Projet Reforco à Kisangani : Issa, Guillaume, Frank, mais aussi Gloria et Bijou ainsi que tous les autres.

Roger, pour avoir été un chauffeur patient durant ces deux mois à Kisangani et pour ses tentatives de m'apprendre le swahili.

Prudence, pour sa bienveillance discrète.

François Toromanoff, pour le temps passé à répondre à mes questions à propos de Definiens.

Gembloux Agro-Bio Tech, pour ces années passées et les connaissances transmises tout au long de la formation.

Les équipes des deux unités, pour l'ambiance et la convivialité qui règne dans chacune d'elles.

Marie, pour tous nos fous rires et notre complicité de ces dernières années. Thierry, Marie et tous les autres qui ont ponctué chacun à leur manière ces années à Gembloux.

Mes sœurs Noémie et Laura, pour leur soutien, parce qu'elles seront toujours là pour moi, et parce que sans elles la vie n'aurait pas la même saveur.

Enfin, je tiens à remercier mes parents, car au-delà de m'avoir permis d'arriver au bout de ces études enrichissantes, vous êtes avant tout ma source d'inspiration et d'encouragements principale depuis toujours.

Résumé

L'évolution démographique des pays du sud sans cesse croissante et les nombreux changements qu'elle provoque sont à la source d'un grand nombre de questions d'étude. Ce sont en particulier les changements d'occupation du sol résultant de l'extension d'une ville du sud qui nous ont intéressés dans ce travail de fin d'études, dont l'objectif était de quantifier l'urbanisation et la déforestation à Kisangani (R. D. Congo) entre 2002 et 2010. Des cartes d'occupation du sol ont été réalisées sur la base de deux images SPOT 5 et grâce à une sortie terrain en mars-avril 2012. Les classifications ont été effectuées sur base de l'approche orientée-objet et les méthodes non supervisée et supervisée ont été comparées. Les résultats montrent une meilleure précision des classifications supervisées ($K = 0,42$ et $K = 0,71$) par rapport aux classifications non supervisées ($K = 0,32$ et $K = 0,53$). Un taux d'extension urbaine de 16 % et une déforestation de 7 % ont pu être mis en évidence suite aux classifications supervisées. Le calcul d'indices de structure spatiale du paysage a permis de segmenter le gradient urbain-périurbain-rural-forêt associé à Kisangani que ce soit en classification non supervisée ou supervisée. Les milieux périurbain et rural sont ainsi caractérisés par une hétérogénéité forte, contrairement aux milieux forestier et urbain qui sont caractérisés par une homogénéité du milieu. La supériorité de la méthode supervisée sur la méthode non supervisée a été démontrée dans la caractérisation de plusieurs aspects de l'étude.

Mots-clés : Déforestation, Gradient urbain-forêt, Kisangani (République Démocratique du Congo), Occupation du sol, SPOT 5, Urbanisation.

Abstract

Growing demography in southern countries and alteration caused by it raise a large number of research questions. In particular, land cover changes resulting from the growth of a city in the South were central in this research. This thesis aimed at quantifying urban urbanization and deforestation in Kisangani (D R of Congo) between 2002 and 2010. Land cover maps were prepared using two SPOT 5 images and a field survey in March and April 2012. Classifications were performed using an object-oriented approach while supervised and unsupervised classification methods were contrasted. Supervised classification delivered more accurate results ($K = 0,42$ et $K = 0,71$) as compared with unsupervised classification ($K = 0,32$ et $K = 0,53$). A 16% urban growth rate and a 7% deforestation growth rate could be revealed from supervised classifications. Indices quantifying landscape structure were computed and they allowed identifying an urban-periurban-rural-forest area continuum associated to Kisangani in both unsupervised and supervised methods. Periurban and rural areas are characterized by a high heterogeneity as opposed to urban and forested areas which show homogeneous patterns. The superiority of the supervised method on the unsupervised method was demonstrated in the characterization of several aspects of the study.

Key words : Deforestation, Urban-forest continuum, Kisangani (Democratic Republic of Congo), land-cover, SPOT 5, urbanization

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
2. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	2
2.1. EVOLUTION ET CROISSANCE DES VILLES AFRICAINES.....	2
2.1.1. <i>Notions de démographie et d'urbanisation</i>	2
2.1.2. <i>Causes de la croissance des villes africaines</i>	3
2.1.3. <i>Problèmes liés à la croissance des villes africaines</i>	4
2.2. APPORT DE LA TELEDETECTION	5
2.2.1. <i>Historique de la télédétection</i>	5
2.2.2. <i>Technique d'acquisition des images</i>	6
2.2.3. <i>Classifications des images satellitaires</i>	7
2.2.3.1. Principe de la classification.....	7
2.2.3.2. Types d'apprentissage	9
2.2.3.3. Entités spatiales.....	10
2.3. APPLICATION AU MILIEU URBAIN.....	11
2.3.1. <i>Pourquoi utiliser la télédétection en milieu urbain ?</i>	11
2.3.2. <i>Limites de la télédétection dans l'étude des milieux urbains</i>	11
2.3.3. <i>Cartographie de l'occupation/utilisation du sol en zone urbaine</i>	12
2.4. ECOLOGIE DU PAYSAGE	13
2.4.1. <i>Grands principes</i>	13
2.4.2. <i>Notion d'indices de structure spatiale du paysage</i>	15
2.4.3. <i>Lien entre télédétection et écologie du paysage</i>	15
3. HYPOTHESES ET OBJECTIFS.....	16
3.1. HYPOTHESES.....	16
3.2. OBJECTIFS	17
4. MATERIEL ET METHODE	18
4.1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	18
4.1.1. <i>Généralités</i>	18
4.1.2. <i>Historique</i>	19
4.1.3. <i>Climat</i>	20
4.1.4. <i>Aspects topographiques, géologiques et pédologiques</i>	21
4.1.5. <i>Hydrographie</i>	22
4.1.6. <i>Flore et faune</i>	22
4.1.7. <i>Cultures vivrières</i>	23
4.1.8. <i>Elevage</i>	23
4.1.9. <i>Croissance démographique et ses impacts</i>	23
4.1.10. <i>Potentialités de développement</i>	24
4.2. CHOIX DES DONNÉES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE	25
4.2.1. <i>Choix du capteur</i>	25
4.2.2. <i>Corrections de prétraitement</i>	25
4.2.3. <i>Opérations de prétraitement des images</i>	26
4.2.3.1. Sélection de la zone d'étude.....	26
4.2.3.2. Choix des canaux et choix d'une composition colorée	26
4.2.3.3. Calcul de néocanaux	27
4.2.3.4. Création d'un masque	28
4.3. ACTIVITÉS DE TERRAIN	29
4.3.1. <i>Méthode d'échantillonnage</i>	29
4.3.2. <i>Matériel utilisé et données récoltées</i>	30
4.3.3. <i>Classes d'occupation du sol</i>	31
4.4. CLASSIFICATION DES IMAGES.....	32
4.4.1. <i>Segmentation des images</i>	32
4.4.2. <i>Classifications non supervisées</i>	33

4.4.3. <i>Classifications supervisées</i>	34
4.5. PRÉCISION DES CLASSIFICATIONS	34
4.5.1. <i>Matrice de confusion</i>	34
4.5.2. <i>Coefficient Kappa</i>	35
4.6. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE PAYSAGÈRE	36
4.6.1. <i>Matrice de transition</i>	36
4.6.2. <i>Indices de structure spatiale</i>	36
5. RESULTATS	39
5.1. METHODE DE CLASSIFICATION NON SUPERVISEE	39
5.1.1. <i>Classification 2002</i>	39
5.1.2. <i>Classification 2010</i>	40
5.2. METHODE DE CLASSIFICATION SUPERVISEE	41
5.2.1. <i>Classification 2002</i>	41
5.2.2. <i>Classification 2010</i>	43
5.3. PRECISION DES CLASSIFICATIONS : MATRICE DE CONFUSION ET COEFFICIENT KAPPA	44
5.3.1. <i>Classification non supervisée 2002</i>	44
5.3.2. <i>Classification non supervisée 2010</i>	44
5.3.3. <i>Classification supervisée 2002</i>	45
5.3.4. <i>Classification supervisée 2010</i>	45
5.4. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE PAYSAGERE	48
5.4.1. <i>Matrice de transition</i>	48
5.4.1.1. <i>Matrice de transition pour les classifications non supervisées</i>	48
5.4.1.2. <i>Matrice de transition pour les classifications supervisées</i>	49
5.4.2. <i>Indices de structure spatiale</i>	54
5.4.3. <i>Directions d'extension de la ville</i>	57
6. DISCUSSION	59
6.1. INTERPRETATION DES RESULTATS	59
6.1.1. <i>Classifications</i>	59
6.1.2. <i>Précision des classifications : matrice de confusion et coefficient Kappa</i>	59
6.1.3. <i>Analyse de la dynamique paysagère</i>	61
6.1.3.1. <i>Matrices de transition</i>	61
6.1.3.2. <i>Indices de structure spatiale</i>	65
6.1.3.3. <i>Directions d'extension de la ville</i>	66
6.1.3.4. <i>Projets d'extension de la ville de Kisangani</i>	68
6.2. DISCUSSION SUR LES METHODES UTILISEES	69
7. CONCLUSION	71
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72
9. ANNEXES	I
9.1. CLASSIFICATION DE KÖPPEN	I
9.2. FICHE DE TERRAIN	III
9.3. PHOTOS DES DIFFERENTES OCCUPATIONS DU SOL PRISES SUR LE TERRAIN	IV
9.4. TABLEAUX STATISTIQUES DES CLASSIFICATIONS	VI
<i>Classification non supervisée 2000</i>	VI
<i>Classification non supervisée 2010</i>	IX

Liste des figures

FIGURE 1 – ÉVOLUTION DES POPULATIONS RURALES ET URBAINES AU NIVEAU MONDIAL PAR GRANDES ZONES DE DÉVELOPPEMENT (NORD/SUD) DE 1950 A 2030, EXPRIMÉE EN MILLIONS (UNITED NATIONS POPULATION DIVISION, 2007).	2
FIGURE 2 – SCHEMATISATION DES QUATRE PRINCIPAUX MODELES SPATIAUX DE L'EXPANSION DE L'URBANISATION, ADAPTE DE FORMAN (2010).	3
FIGURE 3 – SCHEMATISATION DES RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES COMPOSANTES PRINCIPALES DE LA TELEDETECTION (GIRARD ET GIRARD, 1989).	5
FIGURE 4 - COURBES DE SIGNATURES SPECTRALES TYPIQUES POUR LA VEGETATION, LE SOL ET L'EAU (SWAIN ET DAVIS, 1978), IN LILLESAND ET AL. (2004).	6
FIGURE 5 - ILLUSTRATION D'UNE SEGMENTATION D'IMAGE SPOT 5 (02/03/2010) DE LA REGION DE KISANGANI.....	10
FIGURE 6 - SCHEMA DUCTIF DES DIFFERENTES OCCUPATIONS DU SOL NECESSAIRES A UNE CLASSIFICATION D'OCCUPATION/UTILISATION DU SOL EN MILIEU URBAIN, ADAPTE DE ANDERSON ET AL. (1976).	12
FIGURE 7 - ÉLÉMENTS CLÉS QUI CARACTÉRISENT TOUS LES SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES, ADAPTE DE NOON ET DALE (2002). CES TROIS ÉLÉMENTS SONT REPRÉSENTÉS PAR UN TRIANGLE ÉQUILATÉRAL POUR ILLUSTRER LEUR INTERDÉPENDANCE ET SONT ACCOMPAGNÉS D'EXEMPLES DE PARAMÈTRES MESURABLES.....	13
FIGURE 8 – EFFETS DE L'ÉCHELLE SPATIALE SUR LES ÉLÉMENTS À ANALYSER : LA VARIATION DU GRAIN (RÉSOLUTION SPATIALE) (A A C) ET DE L'ÉTENDUE (D ET E) INFLUENCE LES POTENTIALITÉS DE DISCERNEMENT DES OBJETS PRÉSENTS (BUREL ET BAUDRY, 1999)..	14
FIGURE 9 - SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE KISANGANI EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO (DIVISION GÉOGRAPHIQUE DE LA DIRECTION DES ARCHIVES DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES, 2004).	18
FIGURE 10 - LIMITES APPROXIMATIVES DES SIX COMMUNES DE KISANGANI A L'ANNÉE 2012, RECONSTITUÉES D'APRÈS DES COMMUNICATIONS ORALES ANONYMES.....	19
FIGURE 11 – PHOTO DU SCHÉMA DIRECTEUR DE LA VILLE DE KISANGANI (1976), TOUJOURS D'ACTUALITÉ.	20
FIGURE 12 - CLASSIFICATION DE KÖPPEN POUR LE CONTINENT AFRICAÏN. LES DÉTAILS DE CETTE CLASSIFICATION SE RETROUVENT DANS L'ANNEXE 9.1.....	20
FIGURE 13 – SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM) POUR LA VILLE DE KISANGANI ET SES ALENTOURS.	21
FIGURE 14 – RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE PRINCIPAL DE KISANGANI, AVEC L'IMAGE SPOT 5 DU 02/03/2010 EN FOND.	22
FIGURE 15 – ÉVOLUTION DE LA POPULATION DE KISANGANI ENTRE 1995 ET 2011, EXPRIMÉE EN MILLIERS, D'APRÈS L'INS (INSTITUT NATIONAL DES STATISTIQUES) DE LA RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO.	24
FIGURE 16 – COMPOSITION COLORÉE DE LA ZONE D'ÉTUDE, SUR BASE DE L'IMAGE SPOT 5 DE 2010.....	27
FIGURE 17 - REPARTITION SPATIALE DES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LA COLLECTE DES DONNÉES DE TERRAIN (IMAGE SPOT 5 DU 02/03/2010). DES COULEURS DIFFÉRENTES DE POINTS REPRÉSENTENT LES ZONES DANS LESQUELLES CES POINTS ONT ÉTÉ PRIS : BLEU POUR LA ZONE URBAINE, ROUGE POUR LA ZONE RURALE ET JAUNE POUR LA ZONE FORESTIÈRE.	30
FIGURE 18 - VISUALISATION DES DIFFÉRENTES DENSITÉS DANS LES ZONES DE VEGETATION DE L'IMAGE SPOT 5 DU 02/03/2010....	33
FIGURE 19 – COMPARAISON ENTRE LA TRANSITION D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2002 ET 2010 DES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISÉES (AU-DESSUS) ET LA TRANSITION D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2002 ET 2010 DES CLASSIFICATIONS SUPERVISÉES (EN-DESSOUS) : FOCUS SUR LA VILLE DE KISANGANI ET LA FORÊT AVOISINANTE.....	53
FIGURE 20 - VALEURS MOYENNES D'ÉCART-TYPE POUR L'INDICE DE PROPORTION DE SURFACE BÂTIE POUR LES QUATRE CLASSIFICATIONS.....	55
FIGURE 21 - COMPARAISON DES ZONES PÉRIURBAINES IDENTIFIÉES D'APRÈS L'INDICE DE PROPORTION DE SURFACE BÂTIE DES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISÉES 2002 ET 2010.....	55
FIGURE 22 - VALEURS MOYENNES D'ÉCART-TYPE POUR L'INDICE DE PROPORTION DE SURFACE ANTHROPISÉE POUR LES QUATRE CLASSIFICATIONS.....	56
FIGURE 23 - DIFFÉRENCE DE NDVI ENTRE 2002 ET 2010. LES ZONES ENTOURÉES EN NOIR SONT LES ZONES OU LA DIFFÉRENCE DE NDVI EST TRÈS FORTE, C'EST-À-DIRE LES ZONES OU LA VEGETATION A FAIT PLACE À DU BÂTI. CES QUARTIERS SONT LE QUARTIER SIMI-SIMI (À GAUCHE), LE QUARTIER DU ZOO (AU CENTRE) ET LE QUARTIER DU CENTENAIRE (À DROITE).....	58
FIGURE 24 - QUARTIER SIMI-SIMI À KISANGANI (2012), À L'HABITAT DISCONTINU MARQUÉ.....	58
FIGURE 25 - COMPARAISON ENTRE LES CLASSIFICATIONS SUPERVISÉE ET NON SUPERVISÉE DE 2010 POUR UNE ZONE DE TRANSITION FORÊT-RURAL, ET COMPARAISON AVEC L'IMAGE SPOT 5 DE DÉPART.....	63
FIGURE 26 - DIRECTIONS PRÉFÉRENTIELLES D'EXTENSION DE LA VILLE DE KISANGANI ENTRE 2002 ET 2010 D'APRÈS LE NDVI.....	67
FIGURE 27 - ÉVOLUTION DU DÉVELOPPEMENT DU QUARTIER DU ZOO À KISANGANI ENTRE 2007 (GAUCHE) ET 2011 (DROITE), D'APRÈS DES IMAGES GOOGLE EARTH.....	67
FIGURE 28 - ÉVOLUTION DU DÉVELOPPEMENT DU QUARTIER SIMI-SIMI À KISANGANI ENTRE 2007 (GAUCHE) ET 2011 (DROITE), D'APRÈS DES IMAGES GOOGLE EARTH.	67
FIGURE 29 - ÉVOLUTION DU DÉVELOPPEMENT DU QUARTIER DU CENTENAIRE À KISANGANI ENTRE 2007 (GAUCHE) ET 2011 (DROITE), D'APRÈS DES IMAGES GOOGLE EARTH.	68

FIGURE 30 - LOCALISATIONS APPROXIMATIVES DES NOUVEAUX PROJETS DE LOTISSEMENTS DE LA VILLE DE KISANGANI, SITUEES SUR L'IMAGE SPOT 5 DE 2010 D'APRES DES COMMUNICATIONS ORALES ANONYMES.	68
FIGURE 31 - ZONES MARECAGEUSES (ENTOUREES EN NOIR) AU-DESSUS DE L'AEROPORT SIMI-SIMI . CES MARECAGES SONT PRESENTS EN 2002 (GAUCHE) MAIS PLUS EN 2010 (DROITE) SUR LES IMAGES SPOT 5 DE 2002 ET 2010.	69

Liste des tableaux

TABLEAU 1 - SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX CAPTEURS ET SATELLITES D'OBSERVATION DE LA TERRE A HAUTE ET TRÈS HAUTE RÉOLUTION AVEC LEUR PAYS, LEUR ANNÉE DE LANCEMENT ET LEURS CARACTÉRISTIQUES D'ENREGISTREMENT D'IMAGES (BAMBA, 2010)...	7
TABLEAU 2 – APPLICATION(S) PRATIQUE(S) PROPRE(S) A CHAQUE APPROCHE DE CLASSIFICATION, D'APRÈS DES EXEMPLES RENCONTRES DANS LES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE CE TRAVAIL. CE TABLEAU N'EST PAS EXHAUSTIF.	8
TABLEAU 3 - CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES CANAUX DU CAPTEUR SPOT 5 (GIRARD ET GIRARD, 2010).	25
TABLEAU 4 - NIVEAUX DE PRÉTRAITEMENT DES IMAGES SPOT AVEC LES DIFFÉRENTES CORRECTIONS EFFECTUÉES ET LES MOYENS DE CONTRÔLE.	26
TABLEAU 5 - MATRICE DE CORRELATION DES DIFFÉRENTS CANAUX POUR L'IMAGE SPOT 5 2010.	26
TABLEAU 6 - COMPOSITION COLOREE CHOISIE POUR LA VISUALISATION DES IMAGES SPOT 5 DE L'ÉTUDE.	27
TABLEAU 7 - CLE DE TERRAIN POUR LA ZONE URBAINE AVEC LES DIFFÉRENTS CRITÈRES CORRESPONDANT AUX CLASSES D'OCCUPATION DU SOL.	31
TABLEAU 8 - CLE DE TERRAIN POUR LA ZONE RURALE AVEC LES DIFFÉRENTS CRITÈRES CORRESPONDANT AUX CLASSES D'OCCUPATION DU SOL.	31
TABLEAU 9 - CLE DE TERRAIN POUR LA ZONE FORESTIÈRE AVEC LES DIFFÉRENTS CRITÈRES CORRESPONDANT AUX CLASSES D'OCCUPATION DU SOL.	31
TABLEAU 10 - LÉGENDE COMMUNE DE CLASSES D'OCCUPATION DU SOL POUR LES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISEES.	33
TABLEAU 11 - CORRESPONDANCES ENTRE LES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL DE TERRAIN ET LES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL DES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISEES POUR LA CONSTRUCTION DES MATRICES DE CONFUSION DE CES DERNIÈRES.	35
TABLEAU 12 - ÉCHELLE QUALITATIVE CARACTÉRISANT UNE PRÉCISION DE CLASSIFICATION EN FONCTION DE LA VALEUR DU COEFFICIENT KAPPA (LANDIS ET KOCH, 1977).	36
TABLEAU 13 - REGROUPEMENTS DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL DE TERRAIN POUR LE CALCUL DES INDICES DE STRUCTURE SPATIALE.	38
TABLEAU 14 - CORRESPONDANCES ENTRE LES CLASSES SPECTRALES ET LES CLASSES THÉMATIQUES POUR LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE 2002.	39
TABLEAU 15 - REGROUPEMENT DES CLASSES SPECTRALES D'APRÈS LEUR CORRESPONDANCE AVEC LES CLASSES THÉMATIQUES POUR LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE 2002.	39
TABLEAU 16 - CLASSES D'OCCUPATION DU SOL ISSUES DE LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE POUR LA ZONE D'ÉTUDE : RESULTATS POUR L'ANNÉE 2002.	40
TABLEAU 17 - CORRESPONDANCES ENTRE LES CLASSES SPECTRALES ET LES CLASSES THÉMATIQUES POUR LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE 2010.	40
TABLEAU 18 - REGROUPEMENT DES CLASSES SPECTRALES D'APRÈS LEUR CORRESPONDANCE AVEC LES CLASSES THÉMATIQUES POUR LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE 2010.	41
TABLEAU 19 - CLASSES D'OCCUPATION DU SOL ISSUES DE LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE POUR LA ZONE D'ÉTUDE : RESULTATS POUR L'ANNÉE 2010.	41
TABLEAU 20 - PROPORTION DES DIFFÉRENTES OCCUPATIONS DU SOL POUR LE PREMIER NIVEAU DE CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2002.	41
TABLEAU 21 - NOMBRE D'ÉCHANTILLONS DÉFINIS DANS CHAQUE CLASSE D'OCCUPATION DU SOL POUR LA PROCÉDURE « NEAREST NEIGHBOR CLASSIFICATION » DE LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2002.	42
TABLEAU 22 - SURFACE ET PROPORTION REPRÉSENTÉE PAR CHAQUE CLASSE D'OCCUPATION DU SOL DANS LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2002.	42
TABLEAU 23 - PROPORTION DES DIFFÉRENTES OCCUPATIONS DU SOL POUR LE PREMIER NIVEAU DE CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2010.	43
TABLEAU 24 - NOMBRE D'ÉCHANTILLONS DÉFINIS DANS CHAQUE CLASSE D'OCCUPATION DU SOL POUR LA PROCÉDURE « NEAREST NEIGHBOR CLASSIFICATION » DE LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2010.	43
TABLEAU 25 - SURFACE ET PROPORTION REPRÉSENTÉE PAR CHAQUE CLASSE D'OCCUPATION DU SOL DANS LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2010.	43
TABLEAU 26 - MATRICE DE CONFUSION POUR LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE 2002.	44
TABLEAU 27 - MATRICE DE CONFUSION POUR LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE 2010.	45
TABLEAU 28 - MATRICE DE CONFUSION POUR LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2002.	46
TABLEAU 29 - MATRICE DE CONFUSION POUR LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2010.	47
TABLEAU 30 – MATRICE DE TRANSITION ENTRE 2002 ET 2010 SUR BASE DES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISEES : SURFACE EN HECTARES.	48
TABLEAU 31 - MATRICE DE TRANSITION ENTRE 2002 ET 2010 SUR BASE DES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISEES : SURFACE EN POURCENTAGES PAR LIGNE.	48

TABLEAU 32 - ECHELLE DE NATURALITE IDENTIFIANT POUR LA MATRICE DE TRANSITION NON SUPERVISEE LE POIDS DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2002 ET 2010.....	49
TABLEAU 33 - MATRICE DE TRANSITION ENTRE 2002 ET 2010 SUR BASE DES CLASSIFICATIONS SUPERVISEES : SURFACE EN HECTARES	50
TABLEAU 34 - MATRICE DE TRANSITION ENTRE 2002 ET 2010 SUR BASE DES CLASSIFICATIONS SUPERVISEES : SURFACE EN POURCENTAGES DE LIGNE	51
TABLEAU 35 - ECHELLE DE NATURALITE IDENTIFIANT POUR LA MATRICE DE TRANSITION SUPERVISEE LE POIDS DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2002 ET 2010. LES CLASSES ONT ETE REGROUPEES EN FONCTION DE LEUR ETAT D'ANTHROPISATION PLUS OU MOINS AVANCE ET AU NIVEAU DE LEUR COUVERT POUR LES CLASSES PRESENTANT DE LA VEGETATION.	52
TABLEAU 36 – SURFACE (EN HECTARES ET EN %) TRANSFORMEES ENTRE 2002 ET 2010 POUR LES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISEES (A GAUCHE) ET LES CLASSIFICATIONS SUPERVISEES (A DROITE) D'APRES LES ECHELLES DE NATURALITE DEFINIES.	54
TABLEAU 37 - PRECISIONS DU PRODUCTEUR ET DE L'UTILISATEUR POUR LES DEUX CLASSES LES MOINS PRECISES DES CLASSIFICATIONS NON SUPERVISEES DE 2002 ET DE 2010.	60
TABLEAU 38 - PRECISIONS DU PRODUCTEUR ET DE L'UTILISATEUR POUR LES QUATRE CLASSES LES MOINS PRECISES DE LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE 2002.	60
TABLEAU 39 - COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DE CLASSIFICATION SUPERVISEE ET NON SUPERVISEE D'OCCUPATION DU SOL DE 2010 : SURFACE EN HECTARES.	62
TABLEAU 40 - COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DE CLASSIFICATION SUPERVISEE ET NON SUPERVISEE D'OCCUPATION DU SOL DE 2010 : SURFACE EN POURCENTAGES DE LIGNE.....	63
TABLEAU 41 – SYNTHESE COMPARATIVE DES METHODES NON SUPERVISEE ET SUPERVISEE VIS-A-VIS DES DIFFERENTS ASPECTS ETUDIES DANS CE TRAVAIL. TOUS LES ASPECTS REPRIS DANS CE TABLEAU CONCERNENT LA VILLE DE KISANGANI ET SA PERIPHERIE POUR LES ANNEES 2002 ET 2010.	71

1. Introduction

L'évolution démographique mondiale est considérée comme une problématique centrale de ce siècle. Cette évolution n'est pas la même partout, les pays du sud sont en effet beaucoup plus touchés par cette explosion démographique que les pays du Nord (Benckroun, 1995). Une des principales conséquences de cette évolution est le phénomène d'urbanisation : la croissance urbaine engendre la présence d'agglomérations sans cesse plus grandes, plus peuplées et aussi plus nombreuses. Cette urbanisation est donc devenue bien présente dans les pays du sud dans lesquels on retrouve la majorité de ces mégalo-poles nouvellement créées (Grimm et al., 2008). Une de ses caractéristiques est le développement des zones périurbaines qui, anarchique ou contrôlé, détermine l'extension des villes.

Cette extension ne peut se faire sans conséquences. Lorsqu'une ville se développe, elle transforme l'occupation du sol. Cette urbanisation est donc essentiellement préjudiciable au milieu naturel qui l'accueille (Burel et Baudry, 1999). Les changements d'occupation du sol consistent la plupart du temps en une déforestation : les forêts primaires sont abattues au profit de plantations ou d'activités agricoles qui accompagnent l'évolution d'une ville avec une population croissante toujours plus demandeuse en ressources (dont l'espace). D'après la FAO (2010), ce sont ainsi chaque année plus de 13 millions d'hectares de forêt qui partent en fumée.

La télédétection est un outil très performant qui, bien qu'existant depuis plusieurs décennies, continue de progresser et connaît de nos jours de nouvelles perspectives de recherche en s'appliquant aux nombreuses problématiques actuelles. Son utilité dans le cadre d'études de dynamique d'occupation du sol est donc évidente. En effet, les trois types de résolutions – spatiale, spectrale et temporelle – ouvrent de nombreuses potentialités d'analyse. Dans les pays du sud où il est difficile d'obtenir des informations géoréférencées de base et où les modes de développement des villes sont très divers, la télédétection apporte un avantage certain, comparé aux instruments traditionnels d'observation (Benckroun, 1995).

L'écologie du paysage étudie les processus écologiques et l'organisation de l'espace. La théorie du « pattern/process paradigm » suppose que l'analyse des structures du paysage et de leur dynamique permet des déductions sur les processus écologiques fondamentaux. L'anthropisation est l'un des thèmes d'actualité de l'écologie du paysage, car elle place l'homme comme partie intégrante de la dynamique des écosystèmes. Elle permet l'interprétation des conséquences (écologiques) des dynamiques observées. Dans le cas d'études sur l'évolution et la pression anthropique sur le paysage, l'écologie du paysage apporte des réponses à une échelle parfaitement combinable avec celle de la télédétection.

2. Synthèse bibliographique

2.1. Evolution et croissance des villes africaines

2.1.1. Notions de démographie et d'urbanisation

Alors que la population mondiale comptait 5,3 milliards d'habitants en 1950, les projections démographiques estiment que cette population atteindra les 9 milliards en 2050 (United Nations Population Division, 2007). Cet accroissement de la population, bien que mondial, est particulièrement marqué dans les pays en développement, où l'explosion démographique se traduit par une croissance urbaine très forte (Benchekroun, 1995).

De nos jours, l'humanité connaît en effet une spectaculaire transition à la vie urbaine. Si en 1900, à peine 10% de la population mondiale était citadine, ce pourcentage dépasse maintenant les 50% et cette augmentation sera encore plus marquée dans les cinquante ans à venir. En outre, les villes sont de plus en plus nombreuses, de plus en plus peuplées et de plus en plus grandes. La quasi-totalité de ces nouvelles mégapoles (> 10 millions d'habitants, par convention) est située dans les pays en développement (Grimm et al., 2008). Malgré cela, une grande majorité des Africains sont encore des ruraux. La Figure 1 montre l'évolution des populations rurales et urbaines par grandes zones de développement (Nord/Sud) entre 1950 et 2030.

Ce phénomène urbain ne s'est pourtant généralisé en Afrique subsaharienne que depuis les années cinquante. Il est certain que des villes importantes y préexistaient, mais c'est la colonisation qui a vraiment développé l'« urbain », avec la création des administrations coloniales et l'établissement des comptoirs (Gendreau, 1996).

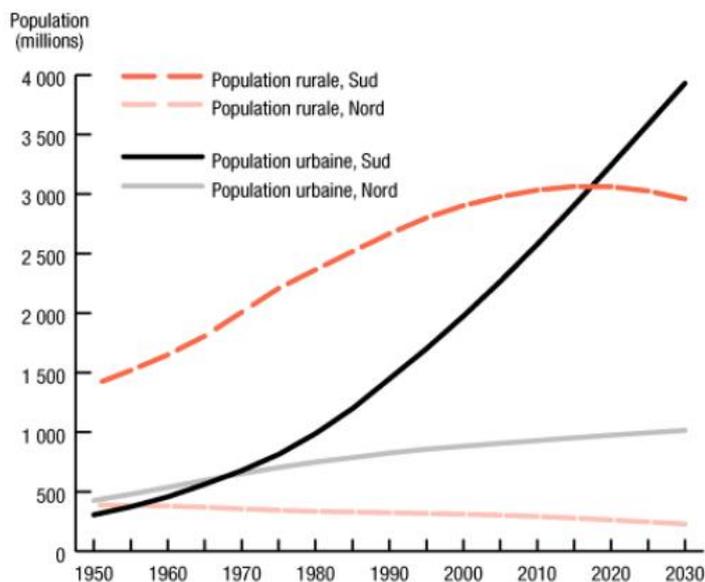


Figure 1 – Evolution des populations rurales et urbaines au niveau mondial par grandes zones de développement (Nord/Sud) de 1950 à 2030, exprimée en millions (United Nations Population Division, 2007).

Forman (2010) a défini l'urbanisation comme la combinaison de la densification et de la propagation vers l'extérieur de la population et des zones construites. La densification implique que la densité de population et les unités construites augmentent, par exemple, en remplissant les espaces verts ou en passant d'immeubles de faible hauteur à des immeubles de grande hauteur. En addition ou alternativement, la ville grossit par expansion extérieure. L'expansion urbaine vers l'extérieur ou propagation peut se présenter sous différentes formes spatiales, suivant que la ville s'étend à partir d'une zone concentrique ou à partir de corridors par exemple. Ainsi, Forman (2010) a pu identifier quatre modèles d'expansion : les anneaux concentriques, les villes satellites, les corridors de transport et les sites dispersés (Figure 2). Ces quatre modèles sont tout à fait différents, et permettent de représenter presque toutes les grandes tendances mondiales.

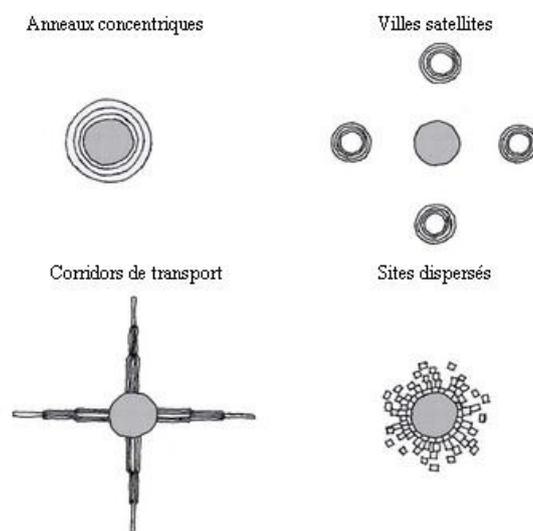


Figure 2 – Schématisation des quatre principaux modèles spatiaux de l'expansion de l'urbanisation, adapté de Forman (2010).

2.1.2. Causes de la croissance des villes africaines

La croissance urbaine des pays en développement est portée par la vague démographique. En effet, le principal facteur de l'explosion urbaine réside aujourd'hui dans le taux d'accroissement naturel des citadins, qui demeure élevé en raison d'une fécondité encore forte et d'une chute de la mortalité. Mais en Afrique ou en Amérique latine, l'urbanisation est d'abord consécutive à la surpopulation des campagnes : on retrouve en effet dans ces pays une population rurale sans cesse croissante, ayant des revenus insuffisants et ne disposant pas de l'environnement social nécessaire (écoles, centres de soins, etc.). Cette population se déplace donc vers les villes en quête de meilleures conditions de vie. Cependant, l'exode rural qui alimente la croissance urbaine ne participe pas forcément au dépeuplement des campagnes à l'heure actuelle. En effet, la croissance rapide de la population totale et le niveau encore modéré de l'urbanisation n'empêchent pas la population rurale de croître. Malheureusement, cette population rurale ne connaît pas un véritable développement car dans beaucoup de pays africains, la production agricole stagne, voire recule de même que l'écosystème se dégrade. La productivité agricole n'augmente pas et les conditions de vie en milieu rural ne s'améliorent pas non plus. Ce contexte de « non-développement » du milieu rural conduit inévitablement les villageois à l'exode (Gendreau, 1996).

2.1.3. Problèmes liés à la croissance des villes africaines

Dans les pays en développement, de nombreux problèmes apparaissent en raison de l'ampleur et de la rapidité de la croissance urbaine.

En Afrique subsaharienne, on a souvent l'impression que le phénomène de croissance urbaine est mal contrôlé ou mal géré. En effet, l'augmentation trop rapide du nombre de citadins ne permet pas l'extension des infrastructures essentielles à l'environnement urbain dans le même temps. La ville africaine étant généralement pauvre, avec des moyens d'investissements très limités, elle ne peut offrir à tous les ruraux qui affluent emplois, équipements et logements sociaux. C'est pourquoi, dans la plupart des agglomérations qui ont une croissance rapide, une grande part de la population vit sur des sites d'habitation non adaptés. Les centres urbains anciens, qu'ils soient ou non d'origine coloniale, se dégradent progressivement tant dans leurs conditions d'habitat que dans leurs infrastructures. Quant à la croissance de la zone périphérique urbaine, elle est souvent désordonnée et s'effectue sous forme de quartiers d'autoconstruction, qui sont des habitations définitives ou provisoires. Ce squatting ou « habitat spontané » se fait sans prise en considération des conditions du site et progresse à un tel rythme qu'il est pratiquement impossible aux administrations publiques de le gérer et de tenter d'endiguer le phénomène. Ces zones d'autoconstruction étant dépourvues d'infrastructures les plus élémentaires, elles entraînent également des problèmes d'assainissement et d'équipements (hôpitaux, écoles, etc.) assez considérables (Wilmet, 1996).

Tous les problèmes liés à la gestion de l'environnement et des ressources naturelles constituent des défis majeurs qui se posent à l'homme aujourd'hui. Or, les exigences matérielles de production et de consommation humaine conjuguées à la croissance de la population modifient, à l'échelle aussi bien locale que régionale, l'utilisation des terres, l'occupation du sol et la biodiversité. De multiples conséquences surviennent suite à ces transformations de la nature et de la structure des paysages. En effet, la transformation de l'occupation/utilisation des terres est considérée aujourd'hui comme une des causes de la dégradation de l'environnement et de la perte de biodiversité, au même titre que les changements climatiques (Burel et Baudry, 1999, Grimm et al., 2008).

De même, un des principaux éléments de transformation du site par la croissance urbaine est la modification de la couverture végétale périphérique notamment due aux besoins en bois de feu des populations, entraînant une dégradation des écosystèmes forestiers. L'extension de la déforestation est souvent spectaculaire : l'auréole déforestée peut s'étendre sur un rayon de plusieurs dizaines de kilomètres à partir du centre-ville. Les surfaces recouvertes par les forêts tropicales ont ainsi fortement diminué sous diverses pressions anthropiques au cours des décennies écoulées (FAO, 2010).

2.2. Apport de la télédétection

2.2.1. Historique de la télédétection

La télédétection est définie (Journal Officiel, 11 décembre 1980) comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ». A cette définition très large, on peut ajouter la définition du Larousse Encyclopédie (2009), selon laquelle la télédétection est la technique d'acquisition à distance d'informations de la surface terrestre par analyse d'images provenant d'avions ou de satellites. La télédétection est donc l'ensemble des connaissances et techniques nécessaires pour interpréter divers objets par leurs comportements spectraux et leurs distributions spatiales à l'aide de mesures de caractéristiques spécifiques effectuées à distance (Girard et Girard, 1989).

La télédétection satellitaire constitue en ce sens l'une des techniques les plus importantes associées à la cartographie. Bien qu'elle n'ait réellement démarré qu'au début des années 70 avec le lancement du premier satellite Landsat, elle est en constante évolution, contrairement à la photo aérienne qui semble désormais atteindre ses limites, et elle devrait donner à la cartographie des performances inédites à ce jour (Steinberg, 2000). La Figure 3 rappelle les principes de base de la télédétection.

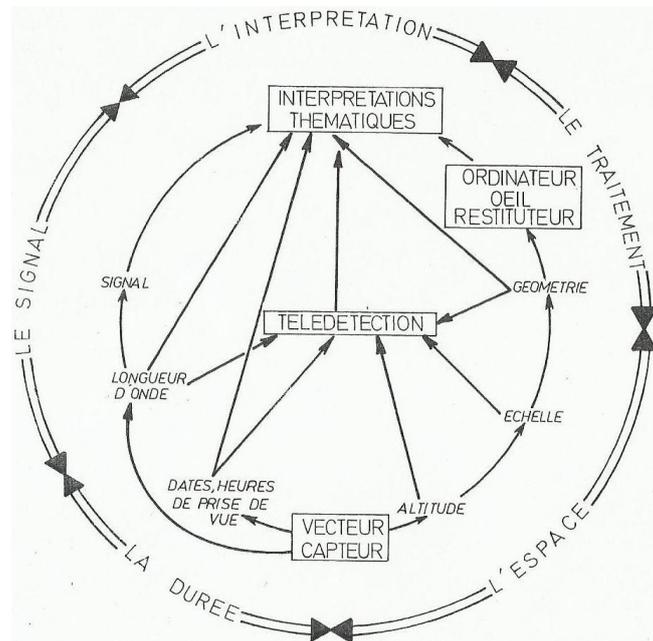


Figure 3 – Schématisation des relations entre les différentes composantes principales de la télédétection (Girard et Girard, 1989).

2.2.2. Technique d'acquisition des images

L'imagerie satellitaire n'a rien à voir avec la photographie « classique » dans la mesure où la lumière n'impressionne pas une émulsion, mais est enregistrée par des instruments d'optique à balayage : il faut donc parler d'image et non de photographie. Les flux lumineux captés sont ensuite retransmis au sol vers une station de réception où ils sont numérisés et enregistrés informatiquement. Pour obtenir une image cartographique proprement dite, il faut ensuite traiter ces données à plusieurs niveaux : radiométrique, géométrique, graphique et statistique (Steinberg, 2000). Alors que les corrections radiométriques relèvent de l'étalonnage et sont spécifiques aux détecteurs, les corrections géométriques tiennent compte des conditions de prise de vue (Girard et Girard, 2010).

En télédétection, le capteur n'est donc plus un avion mais bien un satellite circulant en orbite quasi-polaire et héliosynchrone, ce qui signifie qu'il passe au-dessus des pôles et se déplace en même temps que le mouvement apparent du soleil, de manière à couvrir au mieux la surface terrestre. L'altitude du satellite peut varier entre 800 et 900 km, citons en exemple le satellite français SPOT qui a une altitude de 822 km (Steinberg, 2000). Les capteurs satellitaires permettent de mesurer la réflectance des objets étudiés dans une gamme donnée de longueur d'onde (bande spectrale). La Figure 4 illustre plusieurs exemples de courbes de réflectance propres à certains types d'objets.

Par ailleurs, si l'on considère la source du rayonnement électromagnétique, il convient de distinguer deux types de capteurs : les capteurs actifs et les capteurs passifs. Les premiers envoient une énergie qui leur est propre et recueillent la fraction que les objets en renvoient : RADAR (« Radio Detection And Ranging »), LIDAR (« Light Detection And Ranging »), LASER (« Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation »), etc. Les seconds utilisent un émetteur principal extérieur qui est bien souvent le Soleil, et s'en servent pour recevoir l'énergie que les objets émettent ou réfléchissent (radiomètres, caméras, etc.). Les divers types de capteur sont tous construits sur un même schéma. Ainsi, on retrouve, en allant de la réception du signal vers son stockage : un système recevant le rayonnement de l'objet terrestre et un télescope (objectif), une source de calibration et un spectromètre avec des détecteurs, un amplificateur et un système d'enregistrement (Girard et Girard, 2010). Le Tableau 1 propose une synthèse des principaux capteurs et satellites d'observation de la terre à haute et très haute résolution.

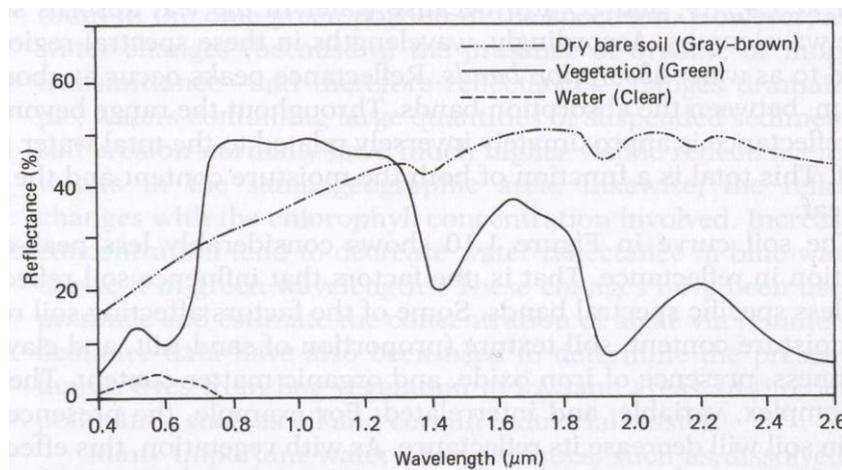


Figure 4 - Courbes de signatures spectrales typiques pour la végétation, le sol et l'eau (Swain et Davis, 1978), in Lillesand et al. (2004).

Trois paramètres principaux caractérisent les images provenant des capteurs de télédétection :

- la *résolution spatiale* : la capacité de distinction de deux points rapprochés, autrement dit la surface couverte par un pixel ;
- la *résolution spectrale* : la capacité de discrimination des objets entre eux, à résolution spatiale identique, influencée par la largeur de la (des) gamme(s) de longueurs d'ondes captées pour produire l'image (Girard et Girard, 1989) ;
- le *champ global* ou scène : la surface totale constituant une image.

Tableau 1 - Synthèse des principaux capteurs et satellites d'observation de la terre à haute et très haute résolution avec leur pays, leur année de lancement et leurs caractéristiques d'enregistrement d'images (Bamba, 2010).

Satellites	Pays	Début	Panchromatique Multibande	Résolution spatiale (m)	Fauchée (taille de la scène, km)
LANDSAT 1-3 (MSS)	USA	1972	Multibande	79	185
LANDSAT 4-5 (TM)	USA	1982	Multibande	30	185
LANDSAT 7 (ETM+)	USA	1999	Panchromatique Multibande	15 30	185
SPOT 1-2-4	FR+(B+DK)	1986	Panchromatique Multibande	10 20	60
SPOT 5	FR+(B+DK)	2002	Panchromatique Multibande	2,5 et 5 10	60
IRS 1A	Inde	1988	Multibande	72,5	148
IRS 1B	Inde	1991	Multibande	36,25	74
IRS 1C et D	Inde	1995	Panchromatique Multibande	5,8 23,5	70 140
KOSMOS	Russie	1987	Panchromatique	2-3	40
IKONOS 2	USA	1999	Panchromatique Multibande	1 4	11
QUICKBIRD	USA	2001	Panchromatique Multibande	0,60-0,7 2,4-2,88	16,5
ROCSAT 2	Taiwan	2004	Panchromatique Multibande	2-5 8-20	24
TERRA (ASTER)	USA	1999	Multibande	10-90	60
RADARSAT 2	Canada	2007	radar	3-100	20-500

2.2.3. Classifications des images satellitaires

2.2.3.1. Principe de la classification

La classification est une opération employée pour réduire le nombre de classes d'objets à une valeur compatible avec une représentation sous forme de carte thématique. Il s'agit de l'une des applications principales de la télédétection, et l'objectif d'une telle classification est la constitution d'une correspondance entre des classes spectrales et des classes thématiques. Les classes spectrales correspondent à des groupes de pixels de mêmes caractéristiques sur le plan spatial et/ou spectral. Ces classes sont définies à l'aide de paramètres statistiques tels que la moyenne et l'écart-type. Les classes thématiques quant à elles correspondent à des catégories d'éléments semblables identifiées par l'utilisateur en fonction des objectifs de l'étude. Dans notre cas, il s'agira de catégories d'occupation/utilisation du sol. Il existe trois grands types d'apprentissage : non supervisé, supervisé et hybride. Le choix d'un de ces types constitue la base de la classification. Le type d'apprentissage choisi peut alors être couplé à différentes entités spatiales : les pixels de l'image, des ensembles cohérents de pixels appelés objets, ou une entité mixte résultant de la combinaison des deux premières. Le Tableau 2 donne quelques exemples de(s) application(s) pratique(s) propre(s) à chaque approche de classification.

Tableau 2 – Application(s) pratique(s) propre(s) à chaque approche de classification, d’après des exemples rencontrés dans les références bibliographiques de ce travail. Ce tableau n’est pas exhaustif.

Entité spatiale Type d'apprentissage	Pixel	Objet	Mixte
Non supervisé	<ul style="list-style-type: none"> Description de l'extension urbaine à l'échelle du bassin versant (Clapham, 2003) Cartographie de la couverture végétale du Parc de la Marahoué et évaluation de sa dynamique forestière de 1986 à 2003 (Dibi N'Da et al., 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> Classification d'occupation du sol de la ville de Lianyungang city (Chine) (Xinliang et al., 2007) 	<ul style="list-style-type: none"> Cartographie des surfaces touchées par les feux de forêt (Ruescas et al., 2010)
Supervisé	<ul style="list-style-type: none"> Cartographie de l'occupation du sol urbaine (Van de Voorde et al., 2007) Classification d'occupation du sol de la frange urbain-rural (Gong et Howarth, 1992) 	<ul style="list-style-type: none"> Cartographie d'habitats de végétation à différentes échelles (Bock et al., 2005) Cartographie de l'occupation du sol de savanes (Whiteside et al., 2011) Cartographie de l'occupation des sol en zones côtière (Sparfel et al., 2008) Cartographie de la mangrove du delta de la Mahajamba (Nord-Ouest de Madagascar) (Robin et al., 2010) Cartographie des zones périurbaines (Cleve et al., 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> Cartographie de l'occupation du sol urbaine (Bolorani et al.) Classification d'occupation du sol en milieu naturel (Kumar et Sagar, 2008) Cartographie de l'occupation du sol urbaine (Hung et Ridd, 2002) Classification de l'occupation du sol suburbaine (Zhang et Foody, 2001)
Hybride	<ul style="list-style-type: none"> Cartographie du changement d'occupation du sol dans le "seven-county Twin Cities Metropolitan Area" du Minnesota pour 1986, 1991, 1998 et 2002 (Yuan et al., 2005) Classification et cartographie d'occupation du sol en milieu forestier (Enderle et Weih, 2005) 	<ul style="list-style-type: none"> Cartographie de l'extension urbaine au niveau périurbain (Jacquin et al., 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> Cartographie urbaine (Guindon et al., 2004) Cartographie d'occupation du sol (arbres, végétation herbacée et asphalte) d'une zone test du campus universitaire de la ville de Swansea (Royaume-Uni) (Foody, 2000) Caractérisation et quantification du paysage urbain de Jimeta, Nigeria (Zemba, 2010)

On constate qu’actuellement, la tendance à utiliser l’approche objet se renforce lors d’études sur l’occupation du sol, bien qu’il existe encore de nombreux exemples d’utilisation de l’approche pixel. Ce ne fut pas toujours le cas : en effet, la majorité des classifications d’occupation/utilisation du sol avaient lieu dans le passé par des approches basées sur les pixels. Ces classifications pouvaient être soit supervisées, soit non supervisées, voire même hybrides. Cependant, le gros défaut des classifications par pixel est l’effet « poivre et sel » qui est inhérent à leur mode de fonctionnement et qui ne contribue pas à améliorer leur précision. D’où l’utilisation de l’approche objet, qui colle mieux à la réalité de terrain et n’a pas cet effet « poivre et sel ». Une classification par objet a donc une performance supérieure à celle d’une classification par pixel, que celle-ci soit supervisée ou non supervisée (Weih et Riggan, 2010).

2.2.3.2. Types d'apprentissage

- *Méthodes non supervisées*

Les méthodes de classification non supervisées consistent à effectuer une partition des données en fonction de leur structure propre. Il est important de signaler que le terme « non supervisé » fait uniquement référence au fait qu'aucune information relative au terrain n'est directement introduite dans le calcul. Cela ne signifie aucunement que la classification est sans intervention humaine (Girard et Girard, 1989).

Ce type de classification est plus souvent utilisé dans une approche par pixel. Rien n'interdit cependant son utilisation dans le cadre d'une approche par objet. Ce type de classification est utilisé lorsqu'on n'a aucune connaissance du terrain et qu'aucune information sur les comportements spectraux des objets composant l'image n'est disponible à priori.

- *Méthodes supervisées*

Le principe des méthodes de classification supervisées reste identique, que l'on effectue une classification par pixel ou par objet. Elles consistent à identifier sur l'image des pixels ou des objets appartenant aux différentes classes thématiques que l'on souhaite cartographier. Ces éléments correspondent à des zones d'entraînement qui vont permettre à l'algorithme de classification de créer des signatures spectrales contenant des informations statistiques sur les valeurs numériques des pixels/objets à l'intérieur de chaque classe. Dans un second temps, l'algorithme compare chaque pixel/objet avec les signatures de référence, et les verse dans la classe dont il est le plus proche sur le plan statistique.

- *Méthodes hybrides*

Les procédures de classification hybride comprennent des caractéristiques de classification supervisée et non supervisée. Elles sont utilisées pour améliorer la précision et/ou l'efficacité du processus de classification. De nombreuses formes de classifications hybrides ont été développées. Elles sont particulièrement valorisables dans des analyses pour lesquelles il y a une forte variabilité dans les réponses spectrales des types d'occupation présents, comme par exemple lors d'une étude de cartographie de végétation (Lillesand et al., 2004).

2.2.3.3. Entités spatiales

- *Pixel*

L'approche par pixel a été la première mise au point et est appliquée depuis plus de trente ans. Dans une classification par pixel, l'établissement de classes est basé sur l'information spectrale fournie par chaque pixel individuel : les pixels sont donc triés automatiquement suivant leurs propriétés spectrales.

- *Objet*

L'approche par objet est une méthode plus récente que l'approche par pixel. Ce type de classification est basé non plus sur des pixels individuels mais sur des éléments correspondant à des groupes de pixels. Ces éléments sont créés par un processus appelé segmentation, qui consiste à regrouper des pixels contigus et homogènes en régions appelées objets (Figure 5). Ainsi, l'information nécessaire à la classification est représentée dans des images-objets significatifs et dans leurs relations mutuelles. L'intérêt de cette méthode réside donc dans le fait qu'on utilise à la fois des informations basées sur les caractéristiques spectrales des pixels composant les objets, mais aussi d'autres informations liées à la géométrie des objets (taille, structure, périmètre, forme, orientation), à la texture (arrangement et fréquence des variations de teintes à l'intérieur de l'objet) ou encore la topologie (relations de voisinage) (Bonn et Rochon, 1992). En règle générale, ce type de classification est utilisé dans une approche supervisée.

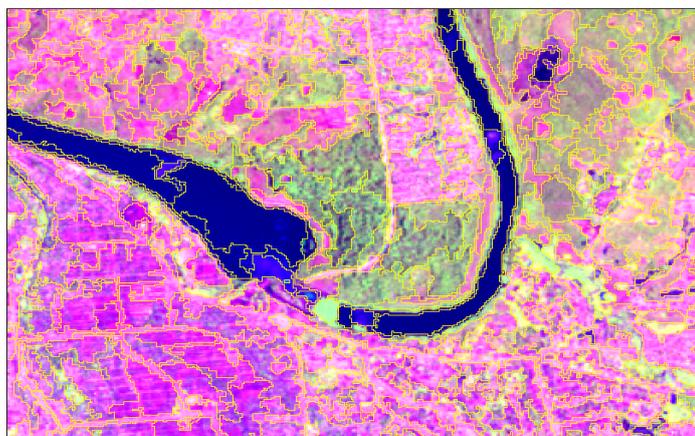


Figure 5 - Illustration d'une segmentation d'image SPOT 5 (02/03/2010) de la région de Kisangani

- *Pixels mixtes*

Les pixels mixtes sont les pixels au sein desquels on retrouve plus d'un type d'occupation du sol. Ces pixels mixtes présentent donc des problèmes de classification, car leurs caractéristiques spectrales ne sont pas représentatives d'un seul type d'occupation du sol. Ce problème est d'autant plus aigu que la résolution spatiale diminue. La procédure la plus connue pour gérer le cas de pixels mixtes est la « spectral mixture analysis ». Elle implique la comparaison entre la signature spectrale des pixels mixtes avec un échantillon de références spectrales « pures » (endmembers). Le résultat est une estimation des proportions de chaque classe d'occupation du sol de référence retrouvées dans chaque pixel (Lillesand et al., 2004).

2.3. Application au milieu urbain

2.3.1. Pourquoi utiliser la télédétection en milieu urbain ?

Les images satellitaires comprennent deux composantes principales : d'une part la composante radiométrique, qui donne la valeur de réflectance de chaque canal, et d'autre part la composante morphologique, qui caractérise la forme des objets (Benckroun, 1995). Cette dernière composante est particulièrement intéressante en imagerie urbaine car elle permet de dégager les différentes structures présentes, pour autant que la résolution spatiale soit comparable. En effet, lors d'une analyse urbaine, il peut parfois être plus intéressant d'analyser les structures plutôt que les couleurs (Rimbert, 1992).

Dans les pays en développement, deux facteurs rendent les agglomérations difficiles à observer : il s'agit d'une part de l'insuffisance de l'information géographique de base, et d'autre part des modes d'urbanisation, qui peuvent être divers et suivre un développement anarchique. De plus, les opérations aéroportées coûtent cher, sont difficiles à organiser et ne peuvent donc pas être répétées trop fréquemment. En conséquence, l'utilisation d'instruments traditionnels d'observation et de collecte d'information ne se justifie pas, car ceux-ci ne savent pas suivre correctement l'évolution des phénomènes liés à l'urbanisation (Wilmet, 1996).

Dans ce contexte, l'imagerie satellitaire a donc une direction de recherche toute trouvée. La télédétection intervient à travers plusieurs aspects, et particulièrement pour l'étude des changements et mutations urbaines ainsi que pour l'analyse de l'occupation du sol en milieu urbain (Benckroun, 1995). En effet, la télédétection est amenée à jouer un double rôle dans la gestion des espaces urbains : premièrement celui d'un système d'aide à la décision, deuxièmement celui d'un système d'aide à la gestion (Wilmet, 1996).

2.3.2. Limites de la télédétection dans l'étude des milieux urbains

Les objets urbains sont de tailles différentes, et leur organisation diverge selon la position des quartiers (central ou périphérique), de même que la proportion urbain/végétal. En conséquence, tous ces éléments ne peuvent être identifiés avec la même résolution spatiale. C'est ainsi qu'à 20 m de résolution ou plus, aucun objet urbain n'est discriminable, les pixels sont tous mixtes (Robin, 1995). Le principal facteur limitant les applications en milieu urbain est donc la résolution spatiale. Cette résolution spatiale effective des capteurs utilisés déterminera directement les possibilités d'interprétation (Benckroun, 1995).

Dans les villes des pays en développement, la croissance urbaine se manifeste par des vagues d'autoconstruction périphérique, ce qui entraîne une complexité de la réflectance due notamment à l'hétérogénéité des matériaux de toiture, à la surface des maisons par rapport à celle de la parcelle, mais aussi à l'importance de la couverture arborée des parcelles et des rues (Wilmet et Soyer, 1982).

2.3.3. Cartographie de l'occupation/utilisation du sol en zone urbaine

L'occupation/utilisation du sol en milieu urbain possède une grande diversité, car elle comprend la présence de matériaux variés et de surfaces végétales diverses. Anderson et al. (1976) ont ainsi proposé un schéma déductif (Figure 6) permettant de classer ces différentes occupations/utilisations du sol en milieu urbain.

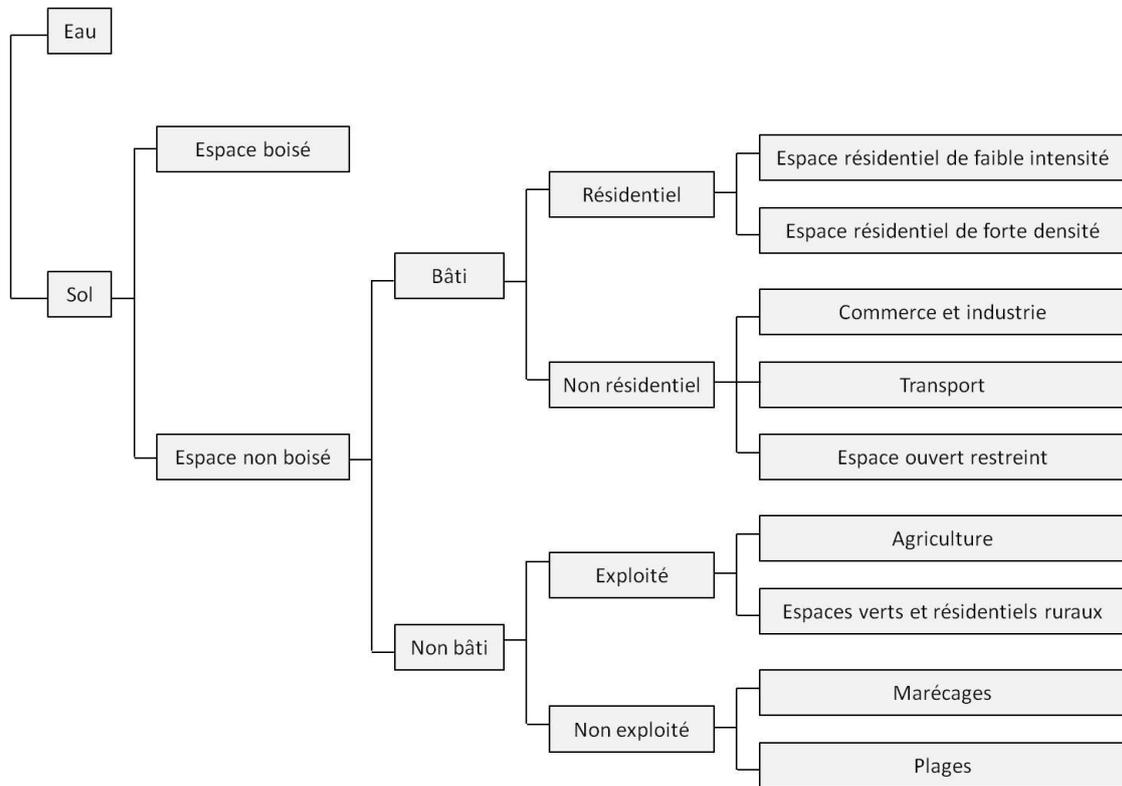


Figure 6 - Schéma déductif des différentes occupations du sol nécessaires à une classification d'occupation/utilisation du sol en milieu urbain, adapté de Anderson et al. (1976).

Historiquement, la cartographie de l'occupation du sol a débuté avec la photographie aérienne. Depuis la création de la télédétection spatiale, de nombreuses expériences ont été menées sur différentes agglomérations afin de démontrer l'intérêt de la télédétection dans ce domaine. De nos jours, les avancées dans les traitements ainsi que dans la résolution des images satellitaires permettent l'utilisation des cartes d'occupation du sol dans de nombreux domaines comme par exemple pour l'analyse du développement urbain ou encore pour des analyses de démographie (Benchekroun, 1995).

Dans l'étude des transformations et de l'organisation des paysages, il est important de distinguer « l'occupation du sol » de « l'utilisation du sol ». D'après Turner et Meyer (1994), l'occupation du sol décrit l'état physique des terres, de la surface du sol (type de végétation, présence d'eau, de roches). Un changement d'occupation du sol peut consister en une conversion (passage de la forêt à la culture) ou une modification (densité d'arbres d'une forêt). L'utilisation des terres décrit la façon dont les hommes utilisent la terre, les usages, les pratiques. L'occupation du sol peut donc changer alors que l'utilisation du sol reste la même, par exemple dans le cas de l'apparence d'un champ qui varie au fil des saisons (Wolff, 2005). Inversement, l'utilisation du sol peut changer alors que l'occupation reste la même, comme par exemple une même surface d'eau allouée à différentes utilisations (pêche, baignade, etc.).

2.4. Ecologie du paysage

L'écologie du paysage est l'une des disciplines les plus jeunes de l'écologie. Bien que possédant de multiples définitions, elle peut être définie comme une science traitant des influences entre l'organisation de l'espace et les processus écologiques (Turner, 1989). L'écologie du paysage cherche à comprendre les effets de cette organisation sur les processus composant la dynamique des populations, des communautés ou des écosystèmes (Décamps et Décamps, 2007).

2.4.1. Grands principes

En écologie du paysage, les paysages sont considérés comme des mosaïques d'unités fonctionnelles ou « taches » englobées dans une « matrice ». Une unité fonctionnelle constitue une zone aux conditions environnementales homogènes. L'ensemble des taches ayant des caractéristiques similaires pour la composante considérée est appelé « type » ou « classe ». Une telle classification ou typologie des paysages peut découler de l'étude du contraste entre différents paramètres, tels que par exemple les facteurs environnementaux, la végétation prédominante ou l'utilisation principale du sol (Iorgulescu et Schlaepfer, 2002). Dans notre étude, il s'agira de l'occupation du sol.

L'organisation de l'espace et la structure spatiale constituent des mesures principales de l'écologie du paysage. Trois éléments clés interdépendants caractérisent chaque système écologique : la configuration, la composition et le fonctionnement (Figure 7). Ces trois caractéristiques sont nécessaires pour identifier l'état d'un système écologique (Bogaert et Mahamane, 2005). L'analyse des structures du paysage et de leur dynamique permet également des déductions sur les processus écologiques fondamentaux. Cette hypothèse est connue sous le nom de « pattern/process paradigm » et constitue l'une des hypothèses principales de l'écologie du paysage.

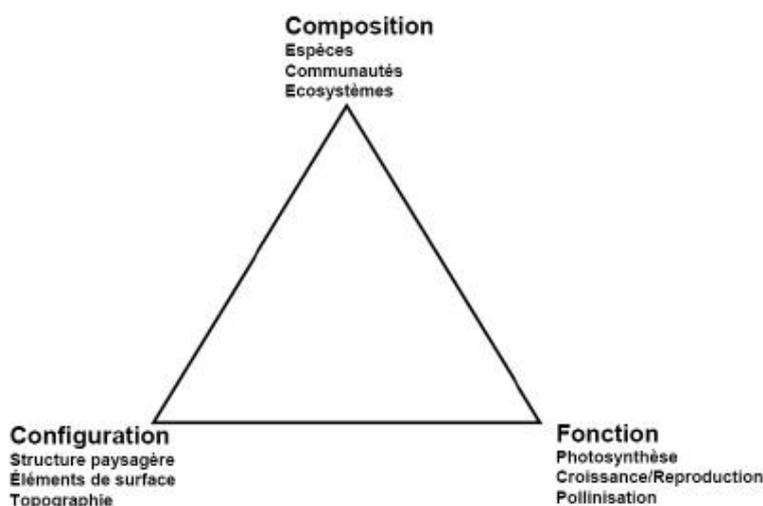


Figure 7 - Éléments clés qui caractérisent tous les systèmes écologiques, adapté de Noon et Dale (2002). Ces trois éléments sont représentés par un triangle équilatéral pour illustrer leur interdépendance et sont accompagnés d'exemples de paramètres mesurables.

L'écologie du paysage considère l'homme comme une partie intégrante de la dynamique des écosystèmes formant la biosphère. Elle a donc une justification toute trouvée dans l'étude de l'anthropisation. En effet, l'évolution démographique mondiale, et donc la pression anthropique sur les paysages naturels, n'a de cesse d'augmenter dramatiquement depuis le XX^{ème} siècle et va continuer à le faire dans le futur. Cette pression résulte en des modifications d'occupation/utilisation du sol, qui sont reconnues comme des composantes majeures du changement global de la planète Terre (Vitousek, 1994). L'étude des interactions entre l'homme et les ressources naturelles va donc nécessiter de nouvelles techniques et modèles adéquats (Bogaert et al., 2005).

La place de l'échelle spatiale est sans aucun doute essentielle en écologie du paysage (Wiens, 1989). Deux paramètres se combinent pour représenter cette échelle spatiale : le grain et l'étendue (Milne, 1991). Le grain représente la limite inférieure de la structure interne d'un paysage et de ses unités fonctionnelles. En pratique, le grain est la taille de la plus petite unité cartographique : dans le cas d'une image satellitaire, il s'agit de la résolution spatiale. L'effet direct du grain est la disparition des types rares d'occupation du sol lorsque la résolution spatiale diminue. Dans la même optique, les structures spatiales dispersées ont tendance à disparaître plus rapidement lorsque la résolution devient plus grossière (Turner et al., 1989). C'est pourquoi, il est impératif que la résolution spatiale de l'image satellitaire utilisée soit adéquate par rapport au phénomène étudié (Forman, 1997). L'étendue, quant à elle, peut varier de quelques hectares à quelques centaines de kilomètres carrés selon les études (Figure 8) (Burel et Baudry, 1999).

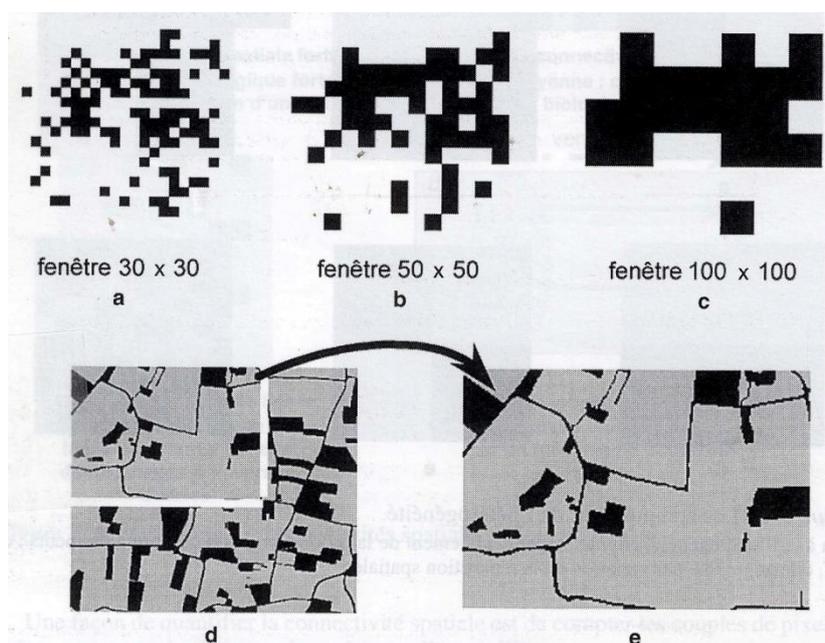


Figure 8 – Effets de l'échelle spatiale sur les éléments à analyser : la variation du grain (résolution spatiale) (a à c) et de l'étendue (d et e) influence les potentialités de discernement des objets présents (Burel et Baudry, 1999).

2.4.2. Notion d'indices de structure spatiale du paysage

Les rapports entre la structure du paysage et les processus écologiques peuvent être étudiés grâce à une série d'indices, qui permettent de quantifier ces structures. Ces différents indices permettent d'explicitier les diverses composantes des mosaïques paysagères. Il semble évident qu'un ensemble de mesures doit être effectué car une mesure seule ne peut résumer la complexité de l'arrangement spatial des taches (Bogaert et Mahamane, 2005). Cette théorie explique l'existence d'une grande diversité d'indices.

Il existe différents types de mesures, à savoir principalement les mesures de configuration et les mesures de composition du paysage. Les mesures de configuration analysent la géométrie des taches et leur répartition spatiale (Fortin, 1999). La composition du paysage est quant à elle déterminée premièrement par le nombre de classes d'occupation du sol, deuxièmement par les proportions prises par ces classes et troisièmement par la nature des classes. Trois types d'indices existent pour caractériser la composition spatiale : ceux qui quantifient le nombre de classes (richesse), ceux qui quantifient les (différences entre les) proportions (équitabilité ou dominance) et ceux qui combinent les deux notions (hétérogénéité, diversité).

2.4.3. Lien entre télédétection et écologie du paysage

La télédétection a permis d'ajouter une dimension supplémentaire à l'étude du paysage en proposant de nombreux avantages dont les principaux sont : premièrement, une grande distance sépare l'observateur de l'objet, ce qui réduit l'influence de l'observateur ; deuxièmement, il est possible d'effectuer et surtout de répéter des mesures à grande échelle ; troisièmement, la large gamme de bandes spectrales et de capteurs permet une grande variété de données. Les capteurs de télédétection spatiale procurent donc de nombreuses images utiles aux écologistes travaillant à des échelles globales (Benson et MacKenzie, 1995). La télédétection, en travaillant avec des images d'une résolution spatiale variant entre 10 et 100 m, permet l'acquisition de données à l'échelle spatiale. Ces résolutions permettent en effet de travailler au niveau du paysage, ainsi, les éléments paysagers peuvent être retrouvés dans les images de télédétection.

3. Hypothèses et objectifs

Les notions suivantes seront utilisées dans la suite de ce travail :

- *Gradient urbain-forêt* : gradient retrouvé lorsqu'on se déplace du centre de la ville jusqu'à la forêt primaire. On rencontre successivement les milieux urbain, périurbain, rural et forestier ;
- *Urbain* : milieu correspondant au centre de la ville, constitué de quartiers anciens où les constructions sont denses et continues ;
- *Périurbain ou front d'urbanisation* : milieu correspondant à la périphérie de la ville, constitué de quartiers nouveaux, d'autoconstruction ou non, où les constructions sont éparses et discontinues ;
- *Rural* : milieu correspondant aux alentours de la ville, après le milieu périurbain. Ce milieu est constitué de champs, de jachères et de plantations et constitue le complexe agricole qui alimente la ville ;
- *Forêt* : milieu successif au milieu rural, il correspond à la forêt naturelle non défrichée.
- *Front de déforestation* : limite entre le milieu rural et le milieu forestier, il correspond à la frange nouvelle de déforestation, là où la forêt est en train progressivement d'être abattue ;
- *Classe* : classe d'occupation du sol ;
- *Anthropisé* : milieu touché par les actions de l'homme, comprenant non seulement le milieu urbain mais aussi périurbain et rural ;
- *Non-anthropisé* : milieu non touché par les actions de l'homme, à savoir ici la forêt primaire et l'eau ;
- *Empreinte écologique* : impact de la ville sur son milieu naturel. On considère ici les milieux urbain, périurbain et rural comme faisant partie de l'empreinte de la ville car ce sont des milieux touchés par les actions de l'homme ;
- *Indice d'empreinte écologique* : rapport entre la surface de la zone anthropisée et la surface de la zone urbaine.

3.1. Hypothèses

Hypothèse 1 : La télédétection satellitaire est pertinente dans l'étude de la dynamique d'occupation du sol de Kisangani entre 2002 et 2010.

Sous-hypothèse 1 : Les images SPOT 5 sont pertinentes dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol de Kisangani entre 2002 et 2010.

Sous-hypothèse 2 : Les images SPOT 5 sont pertinentes pour segmenter le gradient urbain-forêt de Kisangani et pour identifier l'empreinte écologique de la ville entre 2002 et 2010.

Hypothèse 2 : La croissance démographique de Kisangani provoque un changement d'occupation du sol entre 2002 et 2010.

Sous-hypothèse 1 : La croissance démographique de Kisangani provoque une extension de la zone urbaine et/ou périurbaine entre 2002 et 2010.

Sous-hypothèse 2 : La croissance démographique de Kisangani provoque une avancée du front de déforestation entre 2002 et 2010.

Sous-hypothèse 3 : La quantification de la dynamique de l'occupation du sol de Kisangani entre 2002 et 2010 dépend du type de classification.

Hypothèse 3 : Les indices de structure spatiale permettent l'identification des zones urbaine, périurbaine et rurale de Kisangani entre 2002 et 2010 ainsi que pour l'analyse de la composition spatiale.

Sous-hypothèse 1 : La proportion de surface bâtie, la proportion de surface anthropisée, l'équitabilité des proportions surfaciques des classes, la classe dominante et la proportion surfacique de la classe dominante sont des indices qui permettent la segmentation du gradient urbain-forêt de Kisangani entre 2002 et 2010 à l'aide de valeurs seuils.

Sous-hypothèse 2 : La segmentation à l'aide d'indices de structure spatiale du gradient urbain-forêt de Kisangani entre 2002 et 2010 dépend du type de classification.

3.2. Objectifs

Les hypothèses ci-dessus mènent aux objectifs suivants :

- Analyser l'intérêt de la télédétection satellitaire dans l'étude de la dynamique d'occupation du sol de Kisangani entre 2002 et 2010, plus précisément en démontrant l'intérêt des images SPOT 5 dans l'étude de l'évolution de la dynamique de l'occupation du sol de Kisangani entre 2002 et 2010, mais aussi en démontrant l'intérêt des images SPOT 5 dans la segmentation du gradient urbain-forêt de Kisangani entre 2002 et 2010;
- Comprendre l'impact de la croissance démographique de Kisangani sur l'occupation du sol entre 2002 et 2010, en caractérisant l'extension de la zone urbaine et/ou périurbaine de Kisangani entre 2002 et 2010 due à la croissance démographique mais aussi en caractérisant l'avancée du front de déforestation autour de Kisangani entre 2002 et 2010 due à cette même croissance démographique et encore en analysant les différences de quantification de l'évolution de l'occupation du sol entre 2002 et 2010 à Kisangani en fonction du type de classification effectuée ;
- Montrer l'intérêt des indices de structure spatiale dans l'identification du gradient urbain-forêt de Kisangani entre 2002 et 2010 en analysant les indices de composition paysagère (la proportion de surface bâtie, la proportion de surface anthropisée, l'équitabilité des proportions surfaciques des classes, la classe dominante et la proportion surfacique de la classe dominante) et en identifiant pour ces indices des valeurs seuils, mais aussi en caractérisant l'influence du type de classification pour la segmentation à l'aide d'indices de structure spatiale du gradient urbain-forêt de Kisangani entre 2002 et 2010.

4. Matériel et méthode

4.1. Présentation de la zone d'étude

4.1.1. Généralités

Installée à l'arc nord-est du fleuve Congo, à environ 1700 km de Kinshasa, la ville de Kisangani est située à 00°31' latitude nord et 25°11' longitude est (Figure 9) (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2009). Elle est limitée au nord par le Territoire de Banalia ; au nord-est par le Territoire de Bafwasende ; à l'est par les Territoires de Bafwasende et Ubundu ; à l'ouest par le Territoire d'Opala ; au nord-ouest par le Territoire d'Isangi et au sud par le Territoire d'Ubundu (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2007).

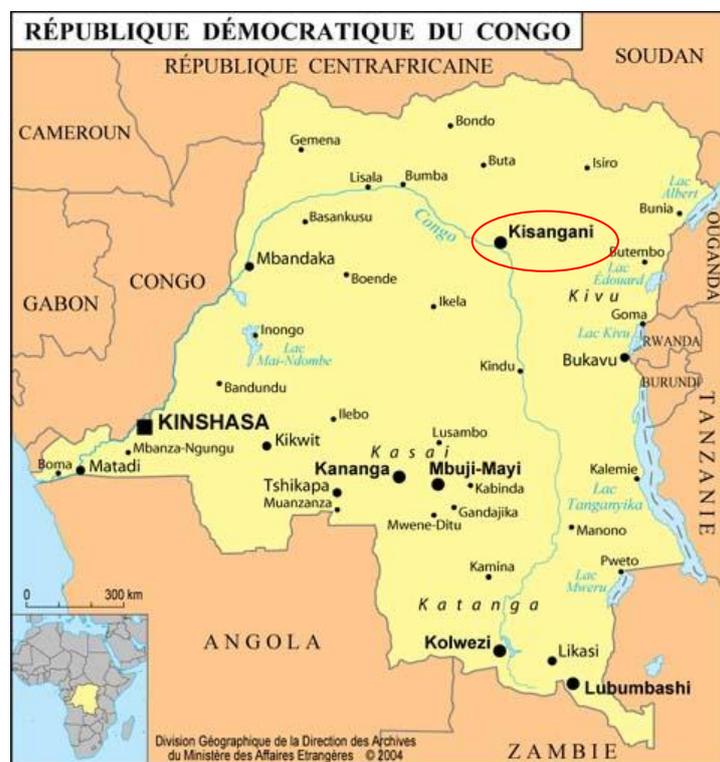


Figure 9 - Situation géographique de Kisangani en République Démocratique du Congo (Division Géographique de la Direction des Archives du Ministère des Affaires Etrangères, 2004).

Chef-lieu de la Province Orientale depuis 1913, Kisangani a une superficie de 1910 km² et occupe en République Démocratique du Congo la troisième place comme pôle économique, après Kinshasa et Lubumbashi. Cette place fait de la ville de Kisangani un site déterminant au nord-est du pays : la ville est en effet un carrefour commercial important reliant Kinshasa aux provinces de l'Est du pays.

Cependant, Kisangani est également connue sous le nom de « ville martyre ». En effet, suite aux nombreuses guerres successives, toutes les infrastructures de la ville se trouvent dans un état de délabrement très avancé et nécessitent une réhabilitation profonde (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2008).

4.1.2. Historique

Les prémices de l'actuelle ville de Kisangani remontent à l'année 1883, lorsqu'un poste colonial fut créé sur l'une des îles du fleuve Congo par l'explorateur Henry Morton Stanley. Cette île se situe à quelques mètres de la rive du site de la ville actuelle et a été le point de départ du développement de Kisangani.

Le 15 juillet 1898, la Province Orientale est créée avec pour chef-lieu Stanleyville, qui obtint soixante années plus tard le statut de ville grâce à l'ordonnance n°12/35 du 6 septembre 1958. A ce moment-là, la ville de Kisangani comprenait quatre communes : Belge I (Mangobo/Tshopo), Belge II (Lubunga), Bruxelles (Kabondo) et Stanley (Makiso).

C'est le 27 octobre 1977 que Stanleyville prit le nom de Kisangani, et que les communes furent baptisées de leur nom actuel. Ainsi, la ville est actuellement subdivisée en six communes urbaines (Makiso, Kabondo, Tshopo, Mangobo, Kisangani, Lubunga) (Figure 10) (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2008).

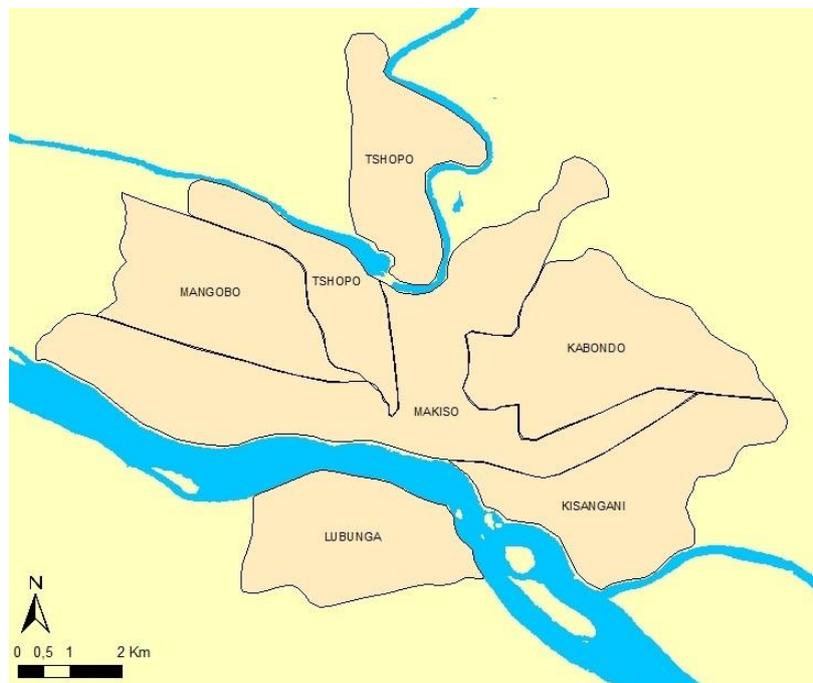


Figure 10 - Limites approximatives des six communes de Kisangani à l'année 2012, reconstituées d'après des communications orales anonymes.

Le schéma directeur de la ville de Kisangani, établi en 1976, est toujours d'actualité aujourd'hui (Figure 11).

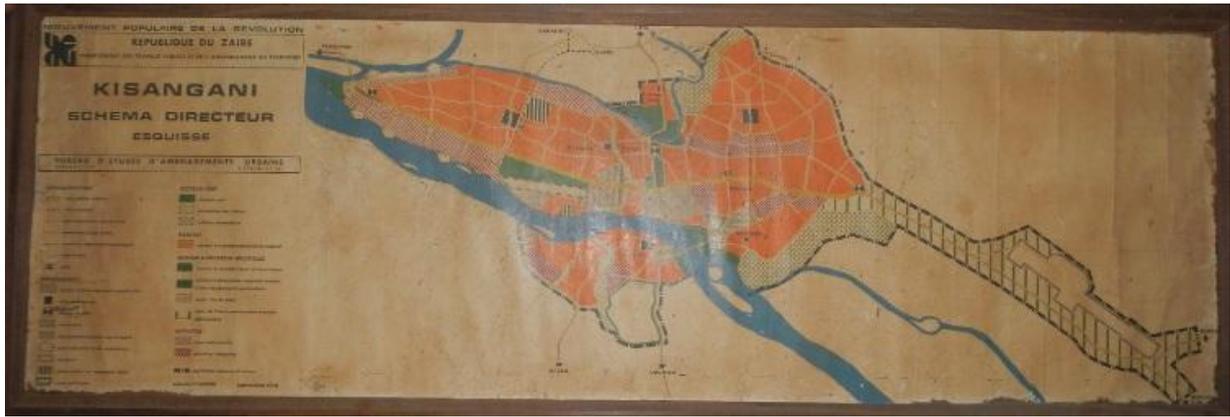


Figure 11 – Photo du schéma directeur de la ville de Kisangani (1976), toujours d'actualité.

4.1.3. Climat

Kisangani est une ville équatoriale par excellence. En effet, sa situation géographique la place pratiquement sur l'équateur, avec un climat de type Af selon la classification de Köppen (Figure 12).

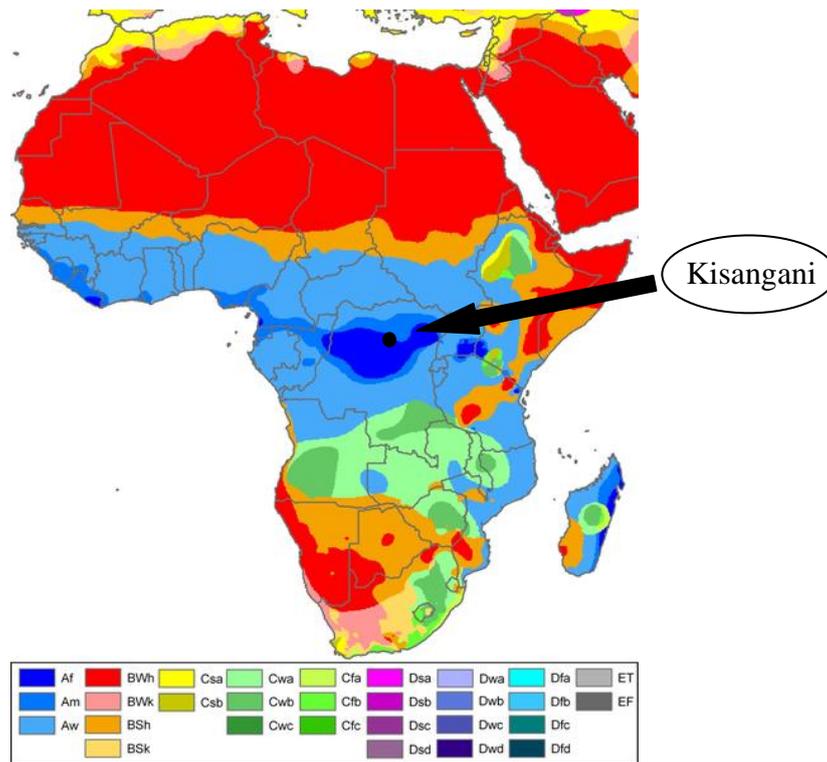


Figure 12 - Classification de Köppen pour le continent africain. Les détails de cette classification se retrouvent dans l'Annexe 9.1.

Les précipitations sont donc abondantes toute l'année mais irrégulièrement réparties. La hauteur moyenne annuelle de précipitation est estimée à 1750 mm (FAO, 1984). Le régime de pluies fait apparaître deux saisons humides, la plus importante allant de septembre à novembre, avec un maximum en octobre, et l'autre de mars à mai. De plus, deux saisons à faible pluviosité ressortent également, à savoir janvier ou grande saison subsèche et juillet-août ou petite saison subsèche (Kahindo Muhongya, 2011).

La moyenne annuelle des températures maximum est de 30,1°C, celle des températures minimum est de 20,8°C. La moyenne annuelle de température est de 24,6°C (FAO, 1984).

L'humidité relative moyenne est de 86 %, soit proche de la saturation.

Le vent résultant moyen est de sud-sud-ouest, faisant bénéficier la ville d'une brise de terre en provenance du fleuve. Les vents saisonniers soufflent généralement du sud-est au nord-ouest (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2008).

4.1.4. Aspects topographiques, géologiques et pédologiques

Les sols affleurant dans la ville de Kisangani sont en majorité argilo-sablonneux. L'altitude moyenne est de 396 mètres (Figure 13).

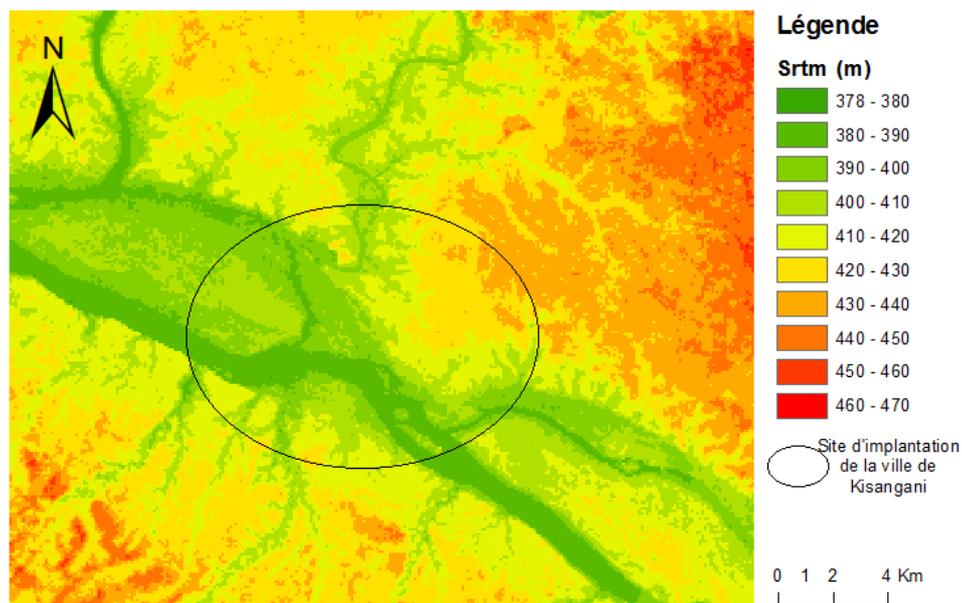


Figure 13 – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) pour la ville de Kisangani et ses alentours.

La ville présente un relief en gradin, avec une cuvette centrale entourée de plateaux. Le relief de la ville de Kisangani a été façonné au Tertiaire, et reste marqué par les formes suivantes :

- les interfluves qu'on appelle couramment à Kisangani « Plateau » : le plateau Boyoma au nord, le plateau Médical à l'ouest et le plateau de Kisangani au sud. Ces plateaux sont constitués des sables de recouvrement de teinte ocre jaune, chargés de gros grains quartzeux et siliceux.

- les basses terrasses occupent la partie centrale de la ville et comprennent plusieurs niveaux. Les sols développés sur ces terrasses sont constitués de sables moyens grossiers de couleur pâle, en relation avec la profondeur de la nappe phréatique (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2008).

4.1.5. Hydrographie

La ville de Kisangani est traversée par le fleuve Congo. Sa largeur moyenne y est d'environ 800 mètres. Il s'écoule depuis les chutes Wagenia jusqu'à son confluent avec la Lindi en aval, et isole la commune de Lubunga des cinq autres communes de la ville (Figure 14).

La rivière Tshopo est la deuxième qui traverse la ville au nord et se déverse dans la Lindi peu avant le confluent du fleuve Congo.

Plusieurs petites rivières rejoignent par ailleurs ces trois grands cours d'eau, et on note ainsi la présence de nombreux cours d'eau à l'intérieur de la ville (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2008).

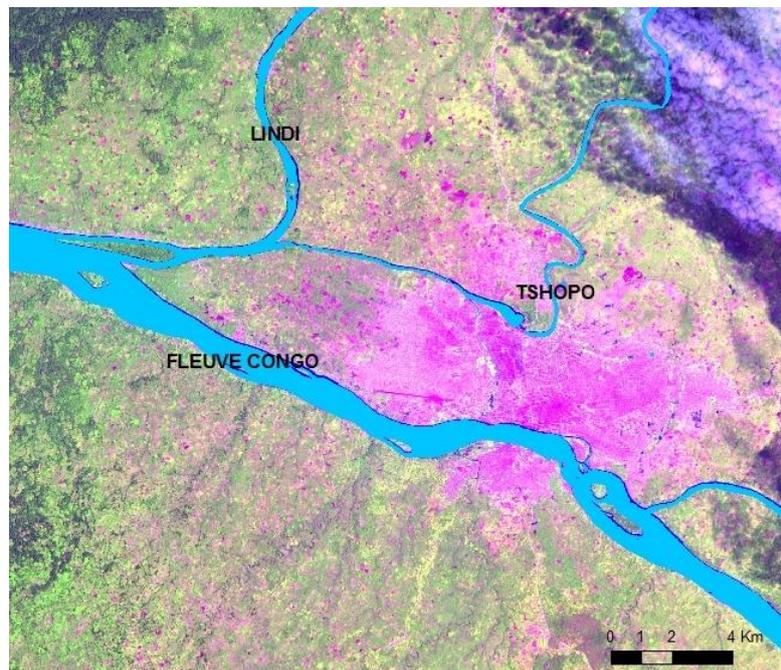


Figure 14 – Réseau hydrographique principal de Kisangani, avec l'image SPOT 5 du 02/03/2010 en fond.

4.1.6. Flore et faune

A l'origine, la végétation de Kisangani était la forêt ombrophile, profondément modifiée depuis par l'action anthropique. Cette forêt a laissé la place à une végétation essentiellement herbacée où subsistent quelques arbres à vocation religieuse ou culturelle. A la périphérie de la ville, on peut retrouver des formations forestières secondaires, et plus rarement quelques lambeaux de forêt primaire (Bola, 2002).

La diversité faunique de Kisangani est étroitement liée à l'évolution des facteurs abiotiques et biotiques de la région. C'est pourquoi à l'heure actuelle, les espèces des forêts (singes, antilopes, etc.) s'éloignent de plus en plus de la ville suite aux perturbations dues à l'action anthropique. Cependant, il existe toujours une activité intense de l'avifaune et des rongeurs de savane (Lubini, 1982).

4.1.7. Cultures vivrières

De toutes les cultures pratiquées, le manioc, la banane, le riz et le palmier à huile sont celles qui ont une importance économique réelle pour les paysans. Par ailleurs, suite à la carence et au coût élevé actuel des produits d'origine animale, le soja et le haricot sont progressivement introduits dans le système de production des paysans. Le manioc reste cependant la culture la plus importante avec plus de la moitié de l'aire cultivée : sa prédominance est observée toute l'année dans les champs, ce qui dénote le fait d'une agriculture de subsistance.

La rotation, ou succession des cultures sur un même sol, n'est plus tellement d'application. Les paysans mettent en place leurs cultures sur le terrain en une fois ou avec un léger décalage dans le temps. Après la rotation vient une période de jachère dont la durée est fonction de l'abondance de terres. Dans les collectivités où celles-ci se raréfient, le paysan revient sur la sole après 3 à 4 ans de repos. Ailleurs, la durée est plus longue (plus ou moins 10 ans). Toutefois, dans certaines collectivités où la densité démographique est forte, les agriculteurs reviennent généralement sur le terrain cultivé après 2 ou 3 ans de repos (Ministères de l'agriculture et de l'élevage ; du plan ; de l'éducation nationale et de l'environnement ; conservation de la nature / forêts et pêche, 1998).

4.1.8. Elevage

Les espèces animales les plus prisées à Kisangani sont les caprins, les porcins et la volaille. Les ovins sont rares et l'élevage des bovins se pratique essentiellement dans des missions confessionnelles pour subvenir aux besoins du personnel (Ministères de l'agriculture et de l'élevage ; du plan ; de l'éducation nationale et de l'environnement ; conservation de la nature / forêts et pêche, 1998).

4.1.9. Croissance démographique et ses impacts

Les chiffres de population pour la ville de Kisangani sont très variés et proviennent généralement de sources différentes, ce qui rend les calculs de croissance assez difficiles.

Cependant, selon la Direction Provinciale de l'INS/Kisangani (2010), la population de Kisangani dépasserait les 1.300.000 habitants en 2011.

Selon les mêmes sources, la population totale de la ville de Kisangani aurait triplé en l'espace de vingt ans. En effet, le nombre d'habitants était estimé à un peu plus de 430.000 en 1990 (Figure 15).

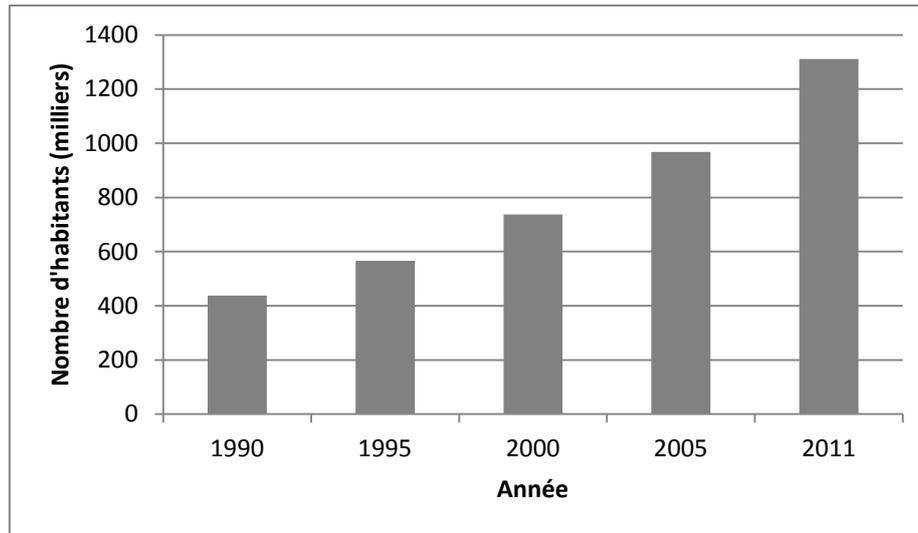


Figure 15 – Evolution de la population de Kisangani entre 1995 et 2011, exprimée en milliers, d’après l’INS (Institut National des Statistiques) de la République Démocratique du Congo.

Un taux de croissance de population si important n’est évidemment pas sans conséquence à de nombreux niveaux. L’accroissement de la population implique de nouvelles constructions, de nouveaux défrichements, et donc un impact toujours croissant sur l’environnement immédiat.

4.1.10. Potentialités de développement

L’action conjuguée de la pression démographique, de la déforestation, de l’absence ou de la saturation des infrastructures techniques de base font de Kisangani un écosystème en déséquilibre sérieux.

La population pauvre est soumise à de nombreux défis quotidiens, comme par exemple :

- l’insalubrité du milieu urbain par suite de la mauvaise gestion des déchets solides et liquides
- l’occupation spontanée des plaines inondables sans assainissement préalable du site
- la déforestation par suite de l’expansion urbaine et pour des besoins énergétiques
- la pollution de l’air par la circulation
- la pollution des cours d’eau par suite des divers rejets incontrôlés et sans traitement préalable

Le faible potentiel industriel, le manque d’industries de base et surtout l’isolement et l’enclavement de Kisangani réduisent considérablement ses potentialités de développement. Seul le secteur agricole traditionnel est bien représenté et constitue la principale activité économique de la ville. De plus, le développement urbain est limité par un certain nombre de contraintes comme la présence des marais et autres zones inondables, mais aussi les sites stratégiques (zones militaires) ainsi que les domaines et villages (Cabinet du Maire de la Ville de Kisangani, 2008).

4.2. Choix des données utilisées pour l'étude

4.2.1. Choix du capteur

Pour une étude d'occupation du sol dans un milieu urbain et périurbain, il était nécessaire d'acquérir des images de résolution spatiale relativement fine. Si Jensen (2005) a montré que pour une étude de classification d'occupation du sol, de nombreux satellites possèdent des potentialités d'exploitation, l'aspect urbain nous a conduits à utiliser les images produites par le satellite SPOT dans ce travail. Deux scènes SPOT 5 (3^{ème} génération des SPOT) ont ainsi été retenues, l'une datant du 28 décembre 2002 et l'autre du 02 mars 2010.

SPOT, Système Pour l'Observation de la Terre, est un satellite conçu par le Centre National des Etudes Spatiales. Le système SPOT, qui comprend le satellite et les stations de réception, a été lancé en 1986, le satellite SPOT 5 a quant à lui été lancé en 2002. Il enregistre des données dans quatre bandes (Tableau 3). Le rayonnement global de la surface terrestre, appelée réflectance, est capté grâce à des détecteurs qui enregistrent chacun une image élémentaire appelée pixel (picture element) dont la résolution est de 10 m x 10 m en couleur et 5 m x 5 m en panchromatique. Un traitement informatique spécifique permet de produire des images présentant une résolution spatiale de 5 m dans le mode multispectral et de 2,5 m dans le mode panchromatique (P : 0,49 μm – 0,69 μm) (Girard et Girard, 2010). Enfin, le satellite, à chacun de ses passages au-dessus d'un lieu, enregistre une « scène » de 60 km sur 60 km. SPOT passe au-dessus d'un même point de la surface terrestre tous les 26 jours. Malgré cela, toutes les images produites ne sont pas utilisables, notamment en raison des conditions atmosphériques, car les flux lumineux ne peuvent pas être captés si des nuages s'interposent (Steinberg, 2000).

Tableau 3 - Caractéristiques principales des canaux du capteur SPOT 5 (Girard et Girard, 2010).

<i>Canal</i>	<i>Couleur</i>	<i>Bande spectrale (μm)</i>	<i>Résolution spatiale (m)</i>
1	Vert	0,50 - 0,59	10
2	Rouge	0,61 - 0,68	10
3	Proche infrarouge	0,79 - 0,89	10
4	Moyen infrarouge	1,58 - 1,75	20

4.2.2. Corrections de prétraitement

Pour devenir un produit utilisable, il est nécessaire que les scènes SPOT brutes, telles qu'enregistrées par les stations de réception, soient prétraitées. Cette opération est effectuée par la compagnie SPOT Image et sert à corriger un certain nombre de paramètres influant sur la qualité des images. Ces corrections sont de deux types, radiométriques et géométriques, suivant plusieurs niveaux détaillés ci-après (Tableau 4).

Tableau 4 - Niveaux de prétraitement des images SPOT avec les différentes corrections effectuées et les moyens de contrôle.

Niveau	Corrections radiométriques	Corrections système	Corrections géométriques dans une projection cartographique	Utilisation de points de contrôle au sol	Utilisation d'un modèle numérique de terrain
1A	Oui				
1B	Oui	Oui			
2A	Oui	Oui	Oui		
2B	Oui	Oui	Oui	Oui	
Ortho	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

« **Niveau 1A:** Correction radiométrique des distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'instrument de prise de vue. Destiné aux utilisateurs désireux d'effectuer eux-mêmes les traitements géométriques de l'image.

Niveau 1B: Correction radiométrique identique à celle du niveau 1A. Correction géométrique des effets systématiques (effet panoramique, courbure et rotation de la Terre). Les distorsions internes de l'image sont corrigées, ce qui autorise les mesures de distances, d'angles et de surface. Produit privilégié pour la photo-interprétation et les études thématiques.

Niveau 2A: Correction radiométrique identique à celle du niveau 1A. Correction géométrique effectuée dans la projection cartographique standard (UTM WGS84 par défaut) sans prise de points d'appui. Permet, en tenant compte du décalage éventuel en localisation, de combiner l'image à des informations géographiques de types différents (vecteurs, cartes raster et autres images satellite) » (ASTRIUM, 2012).

Les images SPOT sélectionnées pour cette étude ont reçu un prétraitement de niveau 2A.

4.2.3. Opérations de prétraitement des images

4.2.3.1. Sélection de la zone d'étude

La zone d'étude correspond à l'intersection entre la scène SPOT du 28 décembre 2002 et celle du 02 mars 2010. Elle comprend la ville de Kisangani et sa périphérie, jusqu'au front de déforestation situé à une quinzaine de kilomètres de la ville. La surface d'étude est de 253 000 ha (Figure 16).

4.2.3.2. Choix des canaux et choix d'une composition colorée

Le choix des canaux s'est effectué grâce à une Analyse en Composantes Principales (ACP) à partir de l'image de base (Tableau 5). D'après cette ACP, les canaux retenus sont les canaux vert, rouge et moyen infrarouge.

Tableau 5 - Matrice de corrélation des différents canaux pour l'image SPOT 5 2010.

Canal de l'image	Vert	Rouge	Proche Infrarouge	Moyen Infrarouge
Vert	1,00000	0,83510	0,92485	0,96092
Rouge	0,83510	1,00000	0,97656	0,89392
Proche Infrarouge	0,92485	0,97656	1,00000	0,94449
Moyen Infrarouge	0,96092	0,89392	0,94449	1,00000

La composition colorée choisie pour la visualisation des images (Tableau 6) permet de faire ressortir les couleurs conventionnelles, c'est-à-dire l'eau en couleur bleue, le bâti en rouge et la végétation en vert. Girard et Girard (2010) ont indiqué que pour mettre en valeur une composante précise, il vaut mieux la mettre en rouge, car on verra davantage les nuances, par rapport à la couleur bleue pour laquelle on ne voit pas beaucoup de nuances.

Tableau 6 - Composition colorée choisie pour la visualisation des images SPOT 5 de l'étude.

<i>Canal</i>	<i>Couleur</i>
4 – Moyen Infrarouge (1,58 - 1,75 μm)	Rouge
1 – Vert (0,50 - 0,59 μm)	Vert
2 – Rouge (0,61 - 0,68 μm)	Bleu

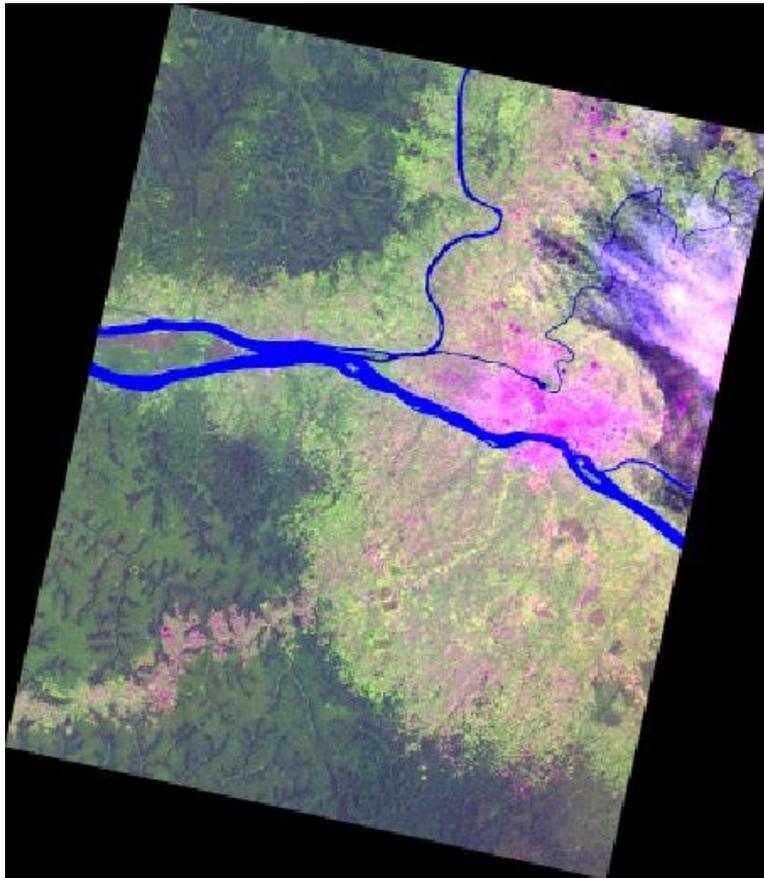


Figure 16 – Composition colorée de la zone d'étude, sur base de l'image SPOT 5 de 2010

4.2.3.3. Calcul de néocanaux

La création de néocanaux sert à synthétiser l'information présente dans les canaux bruts, en les combinant pour faire ressortir des paramètres utiles à l'étude. Cela évite ainsi d'avoir une information redondante, et permet donc de mettre en évidence des paramètres qui ne ressortent pas forcément dans les canaux bruts. Deux indices ont été choisis pour cette étude, il s'agit de l'Indice de Végétation de la Différence Normalisée (NDVI) et de l'Indice de Bâti de la Différence Normalisée (NDBI).

a) NDVI

L'Indice de Végétation de la Différence Normalisée est le rapport entre la différence des valeurs de réflectance de chaque pixel dans le canal 3 (PIR) et le canal 2 (R) et leur somme (Rouse et al., 1974) :

$$NDVI = \frac{3-2}{3+2} = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad (1)$$

Selon Soyer et Wilmet (1983), cet indice est particulièrement utile pour distinguer les espaces bâtis ou défrichés des espaces encore couverts par la végétation.

Le NDVI a été calculé pour les images 2002 et 2010. En outre, la différence entre le NDVI de 2002 et de 2010 a également été calculée. Cette dernière permet d'identifier visuellement les zones d'extension de la ville, qui correspondent aux zones par lesquels le NDVI a diminué de façon significative.

b) NDBI

L'Indice de Bâti de la Différence Normalisée est le rapport entre la différence des valeurs de réflectance de chaque pixel dans le canal 4 (MIR) et le canal 3 (PIR) et leur somme (Zha et al., 2003) :

$$NDBI = \frac{4-3}{4+3} = \frac{MIR-PIR}{MIR+PIR} \quad (2)$$

Selon Zha et al. (2003), cet indice permet de cartographier automatiquement les zones bâties. Cette méthode utilise le fait que les zones bâties ont une réponse spectrale unique.

Le NDBI a été calculé pour les images 2002 et 2010, de même que la différence entre le NDBI 2002 et le NDBI 2010.

4.2.3.4. Création d'un masque

Le masquage est une opération qui consiste à cacher une partie de l'image et à conserver intacte l'autre partie. Lors de la sélection de la zone d'étude (section 4.2.3.1.), nous avons en effet réalisé un masque en sélectionnant la zone d'intérêt et en supprimant le reste de l'image. De plus, pour l'image SPOT 5 de 2010, il a été nécessaire de créer un autre masque correspondant à la présence de nuages sur la zone d'étude. Ce masque a été créé manuellement et a une surface d'un peu moins de 28000 ha. Les comparaisons et les matrices de transition entre 2002 et 2010 se feront sur la zone d'étude 2010.

4.3. Activités de terrain

La reconnaissance de terrain est indispensable lorsque l'on envisage une classification supervisée des images. Elle permet la collecte des informations permettant de définir les zones d'entraînement. Une reconnaissance de l'aire d'étude a eu lieu durant les mois de mars et avril 2012.

L'objectif premier des relevés d'occupation du sol est de caractériser les différents types d'occupation du sol présents dans la zone d'étude. Dès lors, les procédures usuelles d'échantillonnage statistique (échantillonnage aléatoire ou systématique) ne sont pas adaptées. En effet, un échantillonnage aléatoire n'est pas indispensable dans notre cas, dès lors que l'on a la garantie que les différentes classes que l'on souhaite cartographier sont représentées correctement dans l'échantillon final. De plus, la zone d'étude faisant plus de 250 000 ha, un échantillonnage aléatoire de base n'était pas envisageable au vu des contraintes logistiques et temporelles imposées à la récolte des données. Afin d'optimiser le temps et l'énergie consacrés à chaque région de la zone d'étude, les relevés de terrain ont été répartis le long de transects localisés préférentiellement à proximité de pistes ou de voies navigables.

4.3.1. Méthode d'échantillonnage

Pour la zone d'étude considérée, la procédure d'échantillonnage a été divisée en trois parties détaillées ci-dessous (Figure 17). De plus, des relevés concernant trois zones périurbaines avec une différence de NDVI significative entre 2002 et 2010 ont également été compris dans l'échantillonnage afin de mieux analyser l'extension de la ville. Un traitement sommaire des images a donc aidé à organiser la collecte de terrain : identification des zones urbaine et rurale ainsi que des nouveaux quartiers d'après les calculs de NDVI.

Pour la zone urbaine, la méthode d'échantillonnage a été ciblée. Dispersés dans toute la zone d'étude, des waypoints (point GPS) propres aux occupations du sol urbaines ont été choisis selon deux aspects. Premièrement, grâce à la connaissance du terrain de personnes locales qui ont aidé à la mise en place d'une liste d'occupations du sol présentes dans la zone d'étude et plus précisément à la localisation de ces différentes occupations du sol sur le terrain. Deuxièmement, grâce à l'analyse visuelle des images, d'autres waypoints ont été sélectionnés en vue d'être visités. Ainsi, un total de 344 waypoints a été identifié dans la zone urbaine.

Pour la zone rurale, la méthode d'échantillonnage s'est appuyée sur une série de 10 transects orientés perpendiculairement aux routes/pistes ou voies navigables. Une longueur totale de 4 km avait été fixée sous forme de « triangle ». Un waypoint était pris à chaque changement d'occupation du sol. Un total de 578 waypoints, correspondant à autant d'occupation du sol a ainsi été collecté en zone rurale.

Pour la zone forestière, la méthode d'échantillonnage a également consisté en des transects. Orientés perpendiculairement aux routes/pistes, trois transects ont été installés pour caractériser la zone de transition rural – forêt. Une longueur de 4 km avait été fixée. Cette fois, les transects n'ont pas été fait « en triangle » mais suivant une seule ligne directrice principale. A nouveau, un waypoint était pris systématiquement lors d'un changement d'occupation du sol. Un total de 182 waypoints a été pris lors des transects en zone de transition rural – forêt.

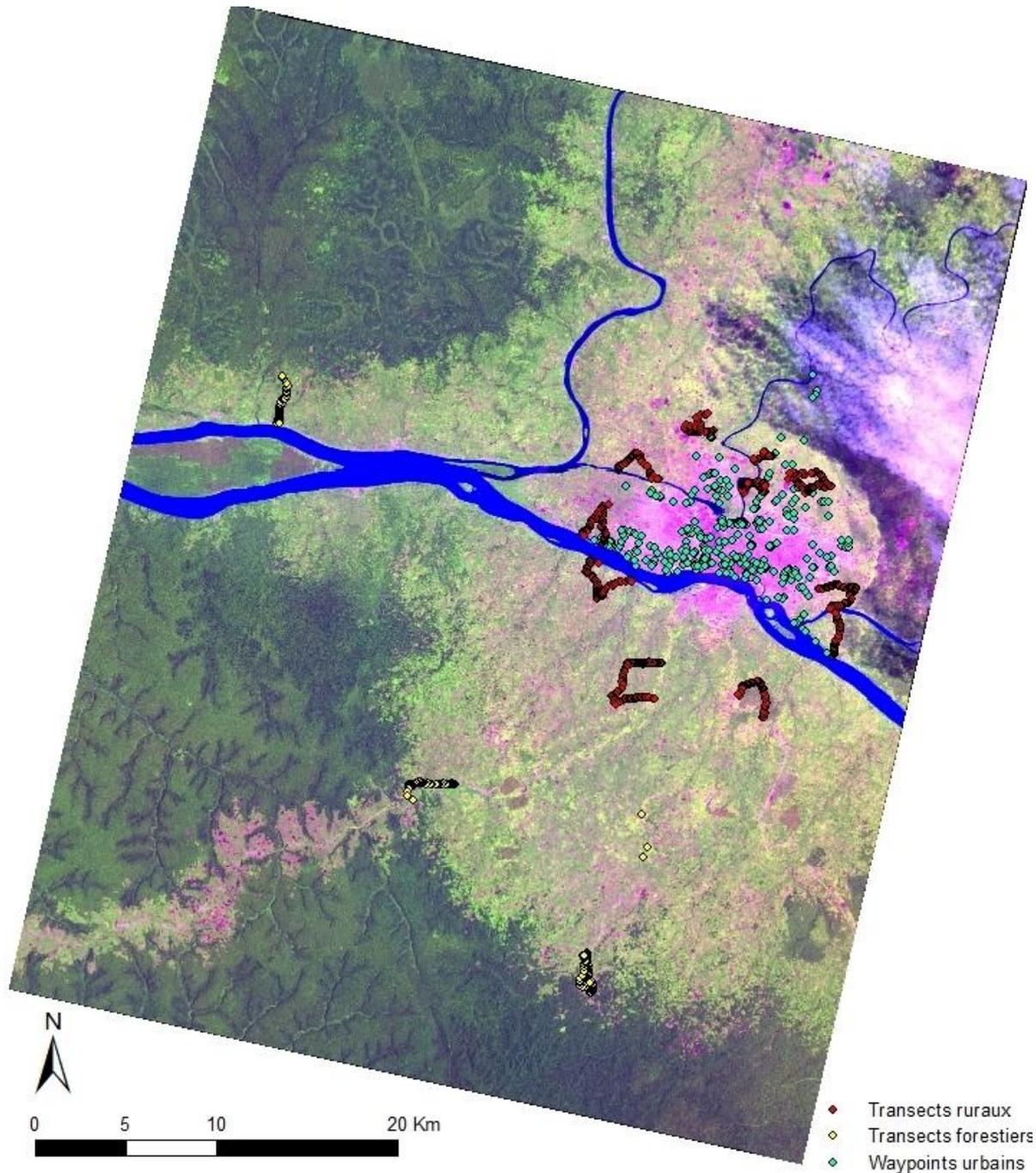


Figure 17 - Répartition spatiale des points d'échantillonnage pour la collecte des données de terrain (image SPOT 5 du 02/03/2010). Des couleurs différentes de points représentent les zones dans lesquelles ces points ont été pris : bleu pour la zone urbaine, rouge pour la zone rurale et jaune pour la zone forestière.

4.3.2. Matériel utilisé et données récoltées

Les relevés de terrain n'ont demandé que peu de matériel : un GPS Garmin 62stc, un appareil photo et une boussole sont les seuls instruments qui ont été utilisés sur le terrain. Tous les waypoints récoltés ont été associés aux données suivantes : coordonnées UTM ; altitude ; caractérisation de l'occupation du sol ; photo(s). Une fiche de terrain type se trouve en Annexe 9.2.

4.3.3. Classes d'occupation du sol

En fonction des zones étudiées, différentes clés d'occupation du sol ont été créées pour le travail de terrain (Tableaux 7, 8 et 9). Les forêts dites « secondaires » ont été incluses dans la classe d'occupation du sol « vieille jachère » au vu de la différence pouvant se révéler parfois subtile sur le terrain. Des photos illustratives des différentes occupations du sol rencontrées sur le terrain se trouvent en Annexe 9.3.

Tableau 7 - Clé de terrain pour la zone urbaine avec les différents critères correspondant aux classes d'occupation du sol.

<i>Occupation du sol</i>	<i>Critère(s)</i>
Bâti continu	Présence de tissu urbain continu (distance entre habitations < 10 m)
Bâti discontinu	Présence de tissu urbain discontinu (distance entre habitations > 10 m)
Etang et zone marécageuse	Présence d'étang ou de zones marécageuses
Pâturage	Surface herbacée < 20 cm, présence d'arbres épars
Plantation	Présence de grands arbres plantés (palmiers, wengués)
Zone de végétation mixte	Présence de végétation diverse, surface souvent non entretenue

Tableau 8 - Clé de terrain pour la zone rurale avec les différents critères correspondant aux classes d'occupation du sol.

<i>Occupation du sol</i>	<i>Critère(s)</i>
Bambous	Présence de bosquets de bambous
Brûlis – Sol nu	Surface brûlée ou sol nu, village
Jeune jachère - Champ	Présence d'agriculture ou de végétation arbustive avec densité de couverture < 40 %
Forêt primaire	Végétation arborée non anthropisée
Plantation rurale	Présence de grands arbres plantés (palmiers, hévéas)
Végétation flottante	Présence de végétation flottante entravant le cours d'eau
Vieille jachère	Végétation arborée avec densité de couverture > 40 %

Tableau 9 - Clé de terrain pour la zone forestière avec les différents critères correspondant aux classes d'occupation du sol.

<i>Occupation du sol</i>	<i>Critère(s)</i>
Brûlis – Sol nu	Surface brûlée ou sol nu, village
Jeune jachère - Champ	Présence d'agriculture ou de végétation arbustive avec densité de couverture < 40 %
Forêt primaire	Végétation arborée non anthropisée

4.4. Classification des images

Les images de 2002 et 2010 ont été traitées selon une approche par objet, à la fois de manière supervisée et non supervisée.

4.4.1. Segmentation des images

Pour classer une image de télédétection, il est intéressant de pouvoir choisir les données de télédétection les mieux adaptées à l'étude, pour ainsi avoir la meilleure adéquation possible entre les dimensions des pixels et les dimensions des phénomènes étudiés. Or, dans la majorité des cas, la taille des pixels se situe entre deux niveaux d'organisation plutôt qu'en correspondance avec l'un d'eux (Girard et Girard, 2010).

Les zones d'étude de 2002 et 2010 ont été segmentées grâce au logiciel Definiens Professional v.5. Les couches correspondant aux différents canaux choisis par l'ACP ont été utilisées pour la segmentation, de même que les néocanaux NDVI et NDBI.

Blaschke et Strobl (2001) ainsi que Schiewe et al. (2001), cités dans Sparfel et al. (2008) ont démontré les nombreux avantages de la segmentation « Multiresolution » par rapport aux autres méthodes de segmentation. La méthode de segmentation utilisée a donc été la segmentation « Multiresolution », qui donne des objets de type « fractal » et non carrés. Elle est la plus adaptée pour différencier les occupations du sol et convient à l'utilisation d'images multi-spectrales. L'opération de segmentation repose sur la définition de 3 paramètres principaux : l'échelle, la couleur et la forme.

Le paramètre d'échelle est adimensionnel, il contrôle le nombre et la taille des objets créés. C'est l'échelle 30 qui a été retenue, de manière à avoir des objets (polygones) les plus petits possibles dans le but de mettre en évidence les différentes occupations du sol, tout en veillant à garder un nombre de polygones raisonnables pour éviter des temps de traitements des images trop longs.

Pour les deux autres paramètres, les valeurs par défaut ont été conservées : 90 % pour la couleur et 10 % pour la forme. Cela signifie que des pixels voisins ayant 90 % de réponse spectrale similaire sont groupés dans le même objet à condition qu'ils puissent former une surface homogène. Le critère de forme comprend deux sous-critères, « smoothness » (bordures lisses) et « compactness » (compacité globale). La même importance (50% et 50%) a été accordée à ces deux composantes.

Pour les classifications supervisées, un niveau de segmentation supplémentaire a été créé pour permettre de différencier grossièrement les quatre types d'occupations/utilisations principales du sol (urbaine, rurale, forestière et eau). Pour cela, les objets créés l'ont été à une échelle de 100. Les quatre zones ont ensuite été séparées grâce à des paramètres spectraux et spatiaux tels que les moyennes des différents canaux utilisés pour la segmentation, les distances aux bords de l'image ou les frontières relatives entre objets de différentes classes.

4.4.2. Classifications non supervisées

Les classifications non supervisées des images 2002 et 2010 ont été effectuées grâce au logiciel de statistiques Minitab v.16. Premièrement, une analyse des corrélations entre variables a été effectuée (moyennes et écart-types des canaux rouge, vert, moyen infrarouge, NDVI et NDBI). Toutes les variables ont été utilisées par la suite dans la procédure Cluster K-Means. Cette procédure procède en un regroupement d'observations dans le but de classifier ces observations en groupes initialement inconnus. Elle utilise le regroupement non-hiérarchique des observations, basé sur l'algorithme de MacQueen. Le but est d'avoir des groupes aussi homogènes que possible, avec des distances entre groupes aussi grandes que possible. Le nombre de clusters a été fixé arbitrairement à 20. De nombreux articles traitent du choix de cette valeur k (nombre de clusters) (Ray et Turi, 1999, Tibshirani et al., 2000, Mirkin, 2011) en proposant des méthodes aussi nombreuses que diverses. Toutefois, cette valeur est difficile à calculer, nous avons donc fixé le nombre de clusters arbitrairement. Une fois la procédure terminée, ces différents groupes ou classes spectrales ont pu être associés à une classe thématique par la connaissance globale que nous avons du terrain. Les classes spectrales ont ainsi été nommées en fonction de la prédominance d'une occupation du sol d'après analyse visuelle (Figure 18), puis regroupées en une légende commune déterminée d'après les résultats obtenus (Tableau 10).

Tableau 10 - Légende commune de classes d'occupation du sol pour les classifications non supervisées

<i>Occupation du sol</i>	<i>Critère(s)</i>
Bâti	Identification visuelle de zones bâties ou de brûlis – sol nu
Jeune jachère – Champ	Identification visuelle de zones de végétation peu denses
Vieille jachère	Identification visuelle de zones de végétation moyennement denses
Forêt primaire	Identification visuelle de zones de végétation très denses
Eau	Identification de surfaces d'eau
Végétation flottante	Identification de zones de végétation peu dense le long des cours d'eau

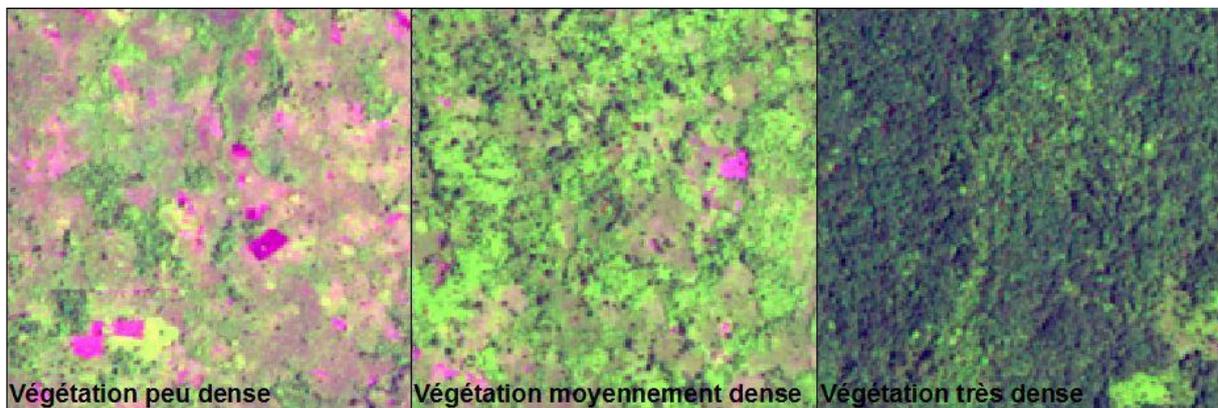


Figure 18 - Visualisation des différentes densités dans les zones de végétation de l'image SPOT 5 du 02/03/2010

4.4.3. Classifications supervisées

Les classifications supervisées des images 2002 et 2010 ont été effectuées grâce au logiciel Definiens Professional v.5. Si la base de la classification de l'image 2010 était constituée des mesures de terrain, la classification 2002 a quant à elle été effectuée d'une façon rétrospective.

La classification s'est effectuée sur la segmentation d'échelle 30 créée précédemment et les occupations du sol ont été associées à un grand type d'occupation/utilisation du sol du niveau de segmentation supérieur (échelle 100). Une liste de classes d'occupation du sol a donc été créée, qui correspond aux occupations du sol relevées sur le terrain. Nous avons ensuite défini pour chacune de ces classes un certain nombre d'échantillons représentatifs, ce qui a permis par la suite d'effectuer la classification par la méthode du « plus proche voisin », qui se base sur un algorithme de maximum de vraisemblance. Une partie des données de terrain a donc été utilisée comme échantillons, l'autre partie étant conservée pour la précision des classifications. Les échantillons ont été choisis parmi les plus homogènes pour représenter au mieux l'occupation du sol correspondante. Les paramètres de classification choisis ont été les moyennes et les écarts-types des canaux vert, rouge, moyen infrarouge, NDVI et NDBI.

La classification supervisée de l'année 2002, comme mentionné précédemment, s'est effectuée de manière rétrospective et déductive. En effet, nous ne disposons pas de données terrain pour cette année. Les échantillons qui ont été définis pour chaque classe correspondent donc à des zones qui sont supposées ne pas avoir changé d'occupation du sol entre 2002 et 2010. Le reste du processus de classification est le même que pour 2010.

4.5. Précision des classifications

4.5.1. Matrice de confusion

Aucune classification n'a de signification si elle n'est pas accompagnée d'une estimation numérique de sa qualité. Cette estimation passe par la construction d'une matrice de confusion. Le principe en est simple : on compare l'occupation du sol prédite (celle de la classification, en colonnes) à l'occupation du sol observée (celle du terrain, en lignes) (Girard et Girard, 2010).

La *précision totale* désigne le nombre d'individus (ou de pixels) bien classés, divisé par le nombre total d'individus (ou de pixels). La *précision pour l'utilisateur* est le pourcentage d'individus (ou de pixels) d'une classe d'occupation prédite, correctement classés vis-à-vis de l'occupation du sol observée. Elle se lit selon les colonnes. La *précision pour le producteur* est le pourcentage d'individus (ou de pixels) d'une classe d'occupation observée, correctement identifiés dans la classification. Elle se lit selon les lignes (Girard et Girard, 2010).

Ainsi, 120 points aléatoires ont été disposés sur les résultats de classification de 2002 et 2010, et la comparaison des occupations du sol prédites et observées ont permis la mise en place des matrices de confusion. La précision globale d'une classification peut alors être exprimée par la somme des points dont l'occupation du sol est correcte divisée par le nombre de points total.

Ces 120 points aléatoires correspondent à des points de terrain, nous avons pris de manière arbitraire dix points par classe d'occupation du sol (sauf la classe eau qui n'a pas été vérifiée), ce qui permet de vérifier si les occupations du sol moins représentées sont aussi bien classées que les occupations du sol plus fréquentes.

Pour la construction des matrices de confusion des classifications non supervisées, les classes d'occupation du sol de terrain ont été regroupées pour correspondre à la légende commune de ces classifications (Tableau 11).

Tableau 11 - Correspondances entre les classes d'occupation du sol de terrain et les classes d'occupation du sol des classifications non supervisées pour la construction des matrices de confusion de ces dernières.

<i>Classes de terrain</i>	<i>Classes des classifications non supervisées</i>
Bambous	Jeune jachère - Champ
Bâti continu	Bâti - Sol nu
Bâti discontinu	Bâti - Sol nu
Brûlis - Sol nu	Bâti - Sol nu
Etang - Zone marécageuse	Végétation flottante
Forêt primaire	Forêt primaire
Jeune jachère - Champ	Jeune jachère - Champ
Pâturage	Jeune jachère - Champ
Plantation	Vieille jachère
Végétation flottante	Végétation flottante
Vieille jachère	Vieille jachère
Zone de végétation mixte	Jeune jachère - Champ

4.5.2. Coefficient Kappa

Le coefficient Kappa est un estimateur de la précision qui varie entre 0 et 1 :

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^l x_{ii} - \sum_{i=1}^l (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^l (x_{i+} * x_{+i})}, \quad (3)$$

où N est le nombre total d'observations, l est le nombre de lignes et de colonnes de la matrice de confusion, x_{ii} est le nombre d'observations dans la ligne et colonne i, x_{i+} est la somme marginale de la ligne i, x_{+i} est la somme marginale de la colonne i. Le coefficient tient donc compte dans son calcul des erreurs de classification en lignes et en colonnes, contrairement à la précision globale qui ne tient compte que de la diagonale de la matrice de confusion (Congalton et Green, 1999). Il a été calculé pour chacune des classifications.

Landis et Koch (1977) ont établi une échelle qualitative de classification en fonction des valeurs du coefficient Kappa (Tableau 12).

Tableau 12 - Echelle qualitative caractérisant une précision de classification en fonction de la valeur du coefficient Kappa (Landis et Koch, 1977).

K	Précision de la classification
< 0,00	Faible
0,00 - 0,20	Légère
0,21 - 0,40	Acceptable
0,41 - 0,60	Modérée
0,61 - 0,80	Bonne
0,81 - 1,00	Très bonne

4.6. Analyse de la dynamique paysagère

4.6.1. Matrice de transition

La matrice de transition est une méthode permettant de décrire de manière condensée, sous forme de matrice carrée, les changements d'état des éléments d'un système pendant une période donnée. Cette matrice ne contient pas d'informations sur la distribution spatiale des changements ni sur leurs causes mais tient uniquement compte des états des éléments aux temps initial et final (Schlaepfer, 2002).

Deux matrices de confusion ont été ainsi construites, elles comparent respectivement les classifications non supervisées 2002 et 2010 et les classifications supervisées 2002 et 2010. Ces matrices de transition ont permis de caractériser la diminution de la forêt ainsi que l'augmentation de la ville.

4.6.2. Indices de structure spatiale

Le calcul des indices de structure spatiale a suivi l'approche « maille ». Pour cela, une grille de mailles de 250 x 250 m a été superposée à la zone d'étude. La taille de la maille a été choisie pour que le plus petit des trois principaux cours d'eau (la Tshopo) soit toujours visible sur les cartes finales. Les indices choisis sont des indices qui caractérisent la composition paysagère et non pas la configuration paysagère. En effet, pour pouvoir caractériser cette dernière, il aurait fallu calculer des indices en rapport avec les taches du paysage. Or, plus de 20% des taches ont une taille supérieure à la taille de la maille choisie, de tels indices donneraient donc une fausse interprétation de la structure spatiale. Pour les quatre classifications, cinq indices de composition spatiale ont été retenus.

a) Indice de proportion de surface bâtie

Cet indice calcule par maille la surface recouverte par du bâti et la divise par la surface exploitable de la maille. Il varie entre 0 et 1. La surface exploitable est définie ici comme étant la surface potentiellement utilisable par l'homme, autrement dit les surfaces d'eau ne sont pas considérées dans ce terme.

b) Indice de proportion de surface anthropisée

Cet indice calcule par maille la surface anthropisée et la divise par la surface exploitable de la maille. Il varie entre 0 et 1. Pour cet indice, le terme « anthropisé » renvoie à toute occupation du sol impactée par l'homme, c'est-à-dire non seulement le bâti mais aussi les champs ainsi que les jachères et les plantations par exemple.

c) Indice d'équitabilité des proportions surfaciques des classes

Cet indice calcule par maille la proportion représentée par chaque classe d'occupation du sol et détermine si ces proportions sont équitables ou si une classe d'occupation du sol domine. Il est également compris entre 0 et 1, une valeur proche de 0 indique une dominance d'une classe sur les autres, une valeur proche de 1 indique une équitabilité entre les différentes classes composant la maille (Pielou, 1966) :

$$E = \frac{H}{H_{max}} = \frac{-\sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i)}{\ln(S)} \quad (4)$$

où H est l'indice de biodiversité de Shannon, i est une classe du milieu, pi est la proportion d'une classe i par rapport au nombre total de classes (S) dans la maille.

d) Indice de classe dominante

Cet indice calcule par maille la proportion représentée par chaque classe d'occupation du sol et détermine quelle est la classe d'occupation du sol dominante. Il s'agit donc un indice qualitatif et non pas quantitatif.

e) Indice de proportion de classe dominante

Cet indice se base sur l'indice de classe dominante et calcule par maille la proportion de la classe dominante par rapport à la surface exploitable de la maille. Cet indice est compris en 0 et 100 %.

Etant donné l'absence de seuils dans la littérature André (2012) (*communication personnelle*), l'objectif des indices calculés dans cette étude est l'identification de valeurs seuils pour caractériser certains aspects du gradient urbain-forêt. Les données brutes des indices ont donc permis l'identification de ces valeurs seuils. Pour cela, dix classes équitables ont été prédéfinies pour chaque indice, et l'analyse s'est faite par regroupement visuel de classes. Le nombre de dix classes se justifie car nous cherchons à identifier des seuils pour quatre zones distinctes : la zone urbaine, la zone périurbaine, la zone rurale et la zone forestière. Nous pouvons donc raisonnablement penser qu'un nombre de dix classes est suffisant pour permettre de faire ressortir ces quatre ensembles.

Un lissage a été effectué pour les indices de proportion de surface bâtie et de proportion de surface anthropisée afin de permettre une visualisation plus aisée de certaines zones. Ce lissage a été effectué par l'outil « Neighborhood Statistics » de la barre d'outils « Spatial Analyst » de ArcGIS 9.3 (ESRI ArcMap 9.3.). La technique de lissage utilisée ici consiste à représenter non pas la valeur observée en un point mais une valeur moyenne d'écart-type entre les valeurs observées au voisinage de ce point dans un rayon prédéfini.

Pour le calcul de ces indices de structure spatiale, les classes d'occupation du sol relevées sur le terrain ont été regroupées pour faciliter les représentations (Tableau 13).

Tableau 13 - Regroupements des classes d'occupation du sol de terrain pour le calcul des indices de structure spatiale

<i>Classes de terrain</i>	<i>Regroupements de classes</i>
Non classifié	12
Bambous	7
Brûlis - Sol nu	2
Bâti continu	1
Bâti discontinu	1
Jeune jachère - Champ	3
Eau	11
Etang - Zone marécageuse	10
Forêt primaire	9
Forêt primaire forestière	9
Plantation	8
Plantation rurale	8
Pâturage	4
Vieille jachère	6
Végétation flottante	11
Zone de végétation mixte	5

5. Résultats

Une annexe cartographique est jointe à ce travail, qui reprend les différentes cartes produites dans cette étude. Les cartes contenues dans cette annexe sont référencées dans le texte selon une numérotation séquentielle (Carte 1, Carte 2, ...).

5.1. Méthode de classification non supervisée

5.1.1. Classification 2002

Les tableaux statistiques, à savoir le tableau de l'ACP et le tableau de constitution des clusters, se trouvent dans l'Annexe 4.

Le Tableau 14 présente les correspondances entre les classes spectrales créées par les clusters et les classes thématiques associées par l'utilisateur. Le Tableau 15 montre les regroupements effectués pour cette même classification.

Tableau 14 - Correspondances entre les classes spectrales et les classes thématiques pour la classification non supervisée de 2002

<i>Classes spectrales</i>	<i>Classes thématiques</i>	<i>Classes spectrales</i>	<i>Classes thématiques</i>
1	Bâti - Sol nu	11	Bâti - Sol nu
2	Eau	12	Végétation flottante
3	Bâti - Sol nu	13	Jeune jachère - Champ
4	Bâti - Sol nu	14	Vieille jachère
5	Bâti - Sol nu	15	Forêt primaire
6	Vieille jachère	16	Forêt primaire
7	Vieille jachère	17	Jeune jachère – Champ
8	Jeune jachère – Champs	18	Bâti - Sol nu
9	Forêt primaire	19	Forêt primaire
10	Forêt primaire	20	Forêt primaire

Tableau 15 - Regroupement des classes spectrales d'après leur correspondance avec les classes thématiques pour la classification non supervisée de 2002

<i>Classes spectrales</i>	<i>Classes thématiques</i>
1, 3, 4, 5, 11, 18	Bâti - Sol nu
8, 13, 17	Jeune jachère – Champ
6, 7, 14	Vieille jachère
9, 10, 15, 16, 19, 20	Forêt primaire
2	Eau
12	Végétation flottante

Ces regroupements permettent de calculer une proportion recouverte par chaque classe d'occupation du sol sur la zone d'étude totale (Tableau 16).

Tableau 16 - Classes d'occupation du sol issues de la classification non supervisée pour la zone d'étude : résultats pour l'année 2002

<i>Classes thématiques</i>	<i>Nombre de polygones</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>
Bâti - Sol nu	9576	13526	5,35
Jeune jachère - Champ	9161	22542	8,91
Vieille jachère	13374	60701	24,00
Forêt primaire	29037	147437	58,28
Eau	406	7885	3,12
Végétation flottante	836	867	0,34

Le résultat final de la classification non supervisée de 2002 est présenté à la Carte 1.

Si l'étendue de la ville de Kisangani ne représente pas une part importante de la zone d'étude ($\pm 5\%$), l'impact de la ville sur le milieu naturel et plus précisément l'auréole déforestée autour de la ville (jeunes/vieilles jachères) représente une proportion très importante ($\pm 33\%$).

La ville est donc bien différenciée, de même que la forêt primaire qui constitue l'occupation du sol dominante de la zone d'étude. Les cours d'eau sont également bien différenciés, même le plus étroit (le Tshopo). De plus, la végétation flottante a également pu être mise en évidence et se distingue assez bien malgré sa surface très réduite.

Il y a une dominance de vieilles jachères dans les surfaces déforestées, avec une proportion assez importante de jeunes jachères et de champs également.

5.1.2. Classification 2010

De même que pour la classification non supervisée de 2002, les tableaux statistiques, à savoir le tableau de l'ACP et le tableau des clusters, se trouvent dans l'Annexe 4.

Le Tableau 17 présente les correspondances entre les classes spectrales créées par les clusters et les classes thématiques associées par l'utilisateur. Le Tableau 18 montre les regroupements effectués pour cette même classification.

Tableau 17 - Correspondances entre les classes spectrales et les classes thématiques pour la classification non supervisée de 2010

<i>Classes spectrales</i>	<i>Classes thématiques</i>	<i>Classes spectrales</i>	<i>Classes thématiques</i>
1	Eau	11	Vieille jachère
2	Bâti - Sol nu	12	Forêt primaire
3	Bâti - Sol nu	13	Végétation flottante
4	Vieille jachère	14	Végétation flottante
5	Forêt primaire	15	Jeune jachère - Champs
6	Forêt primaire	16	Eau
7	Forêt primaire	17	Bâti - Sol nu
8	Vieille jachère	18	Bâti - Sol nu
9	Forêt primaire	19	Vieille jachère
10	Bâti - Sol nu	20	Bâti - Sol nu

Tableau 18 - Regroupement des classes spectrales d'après leur correspondance avec les classes thématiques pour la classification non supervisée de 2010

<i>Classes spectrales</i>	<i>Classes thématiques</i>
2, 3, 10, 17, 18, 20	Bâti - Sol nu
15	Jeune jachère – Champs
4, 8, 11, 19	Vieille jachère
5, 6, 7, 9, 12	Forêt primaire
1, 16	Eau
13, 14	Végétation flottante

Ces regroupements permettent de déterminer l'importance respective des différentes classes d'occupation du sol sur la zone d'étude (Tableau 19).

Tableau 19 - Classes d'occupation du sol issues de la classification non supervisée pour la zone d'étude : résultats pour l'année 2010

<i>Classes thématiques</i>	<i>Nombre de polygones</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>
Bâti - Sol nu	12760	16968	7,54
Jeune jachère - Champ	4245	14102	6,26
Vieille jachère	17956	78448	34,85
Forêt primaire	15035	107864	47,92
Eau	392	6927	3,08
Végétation flottante	843	787	0,35

Le résultat final de la classification non supervisée de 2010 est présenté à la Carte 2.

L'étendue de la ville de Kisangani ne représente à nouveau pas une part importante de la zone d'étude ($\pm 8\%$), alors que l'impact de la ville sur le milieu naturel et plus précisément l'auréole déforestée autour de la ville représente une proportion très importante ($\pm 41\%$).

Les mêmes observations concernant la différenciation des classes peuvent être effectuées dans cette classification.

La proportion de vieilles jachères est également très importante, tout comme dans la classification non supervisée 2002. De plus, la forêt primaire occupe toujours la première place en termes de superficie occupée sur la zone d'étude.

5.2. Méthode de classification supervisée

5.2.1. Classification 2002

Le Tableau 20 donne la répartition des principales occupations du sol pour le premier niveau de classification. Le Tableau 21 quant à lui donne le nombre d'échantillons définis dans chaque classe d'occupation du sol à partir des données terrain. Dans le Tableau 22, on retrouve les surfaces occupées par chacune des occupations du sol ainsi que leur proportion dans la zone d'étude totale.

Tableau 20 - Proportion des différentes occupations du sol pour le premier niveau de classification supervisée de 2002

<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>
Urbain	6046,4	2,39
Rural	121144,1	47,88
Forêt	117954,7	46,62
Eau	7854,8	3,10

Résultats

Tableau 21 - Nombre d'échantillons définis dans chaque classe d'occupation du sol pour la procédure « Nearest Neighbor Classification » de la classification supervisée de 2002

<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Nombre d'échantillons</i>	<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Nombre d'échantillons</i>
Bâti continu	26	Jeune jachère - Champ	52
Bâti discontinu	17	Forêt primaire	29
Etang et zone marécageuse	9	Plantation rurale	14
Pâturage	2	Végétation flottante	23
Plantation	2	Vieille jachère	45
Zone de végétation mixte	11	Brûlis – Sol nu forestier	7
Bambous	12	Jeune jachère - Champ forestier	4
Brûlis – Sol nu	35	Forêt primaire forestière	37

Tableau 22 - Surface et proportion représentée par chaque classe d'occupation du sol dans la classification supervisée de 2002

<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Nombre de polygones</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>
Bâti continu	789	3446,8	1,36
Bâti discontinu	338	1021,3	0,40
Etang et zone marécageuse	258	454,1	0,18
Pâturage	16	55,5	0,02
Plantation	31	126,9	0,05
Zone de végétation mixte	293	867,0	0,34
Bambous	4024	10642,0	4,21
Brûlis – Sol nu	6747	6797,5	2,69
Jeune jachère - Champ	13616	40326,9	15,94
Forêt primaire	5306	19770,0	7,81
Plantation rurale	160	763,9	0,30
Végétation flottante	525	533,0	0,21
Vieille jachère	9035	42196,4	16,68
Brûlis – Sol nu forestier	362	428,0	0,17
Jeune jachère - Champ forestier	333	622,1	0,25
Forêt primaire forestière	19740	116659,1	46,11
Eau	326	7852,3	3,10
Non classifié	481	436,9	0,17

Le résultat final de la classification supervisée de 2002 est présenté à la Carte 3.

La classification supervisée apporte des informations différentes par rapport à la classification non supervisée. Nous remarquons ici que c'est toujours la classe forêt qui occupe la première place en terme de surface occupée (forêt primaire et forêt primaire forestière dans le tableau), suivie par les vieilles et les jeunes jachères – champs qui ont une proportion semblable.

Le bâti occupe une superficie très réduite sur la zone d'étude, mais on remarque à nouveau que la superficie de la zone d'étude impactée par l'action anthropique dépasse de beaucoup la surface de la ville en elle-même.

Les zones de brûlis et de sol nu sont réparties dans toute la zone d'étude (sauf en milieu forestier). Nous retrouvons également un certain nombre de bosquets de bambous répartis principalement le long des routes.

5.2.2. Classification 2010

Le Tableau 23 donne la répartition des principales occupations du sol pour le premier niveau de classification. Le Tableau 24 quant à lui donne le nombre d'échantillons définis dans chaque classe d'occupation du sol à partir des données terrain. Dans le Tableau 25, on retrouve les surfaces occupées par chacune des occupations du sol ainsi que leur proportion dans la zone d'étude totale.

Tableau 23 - Proportion des différentes occupations du sol pour le premier niveau de classification supervisée de 2010

<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>
Urbain	8775,3	3,90
Rural	111133,7	49,35
Forêt	98059,6	43,54
Eau	7246,6	3,22

Tableau 24 - Nombre d'échantillons définis dans chaque classe d'occupation du sol pour la procédure « Nearest Neighbor Classification » de la classification supervisée de 2010

<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Nombre d'échantillons</i>	<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Nombre d'échantillons</i>
Bâti continu	24	Jeune jachère - Champ	45
Bâti discontinu	15	Forêt primaire	31
Etang et zone marécageuse	3	Plantation rurale	24
Pâturage	8	Végétation flottante	17
Plantation	4	Vieille jachère	18
Zone de végétation mixte	34	Brûlis – Sol nu forestier	20
Bambous	18	Jeune jachère - Champ forestier	11
Brûlis – Sol nu	97	Forêt primaire forestière	33

Tableau 25 - Surface et proportion représentée par chaque classe d'occupation du sol dans la classification supervisée de 2010

<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>Nombre de polygones</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>
Bâti continu	714	3533,2	1,57
Bâti discontinu	618	1653,9	0,73
Etang et zone marécageuse	100	103,1	0,05
Pâturage	167	361,6	0,16
Plantation	44	214,6	0,09
Zone de végétation mixte	990	2862,9	1,27
Bambous	2045	4491,9	1,99
Brûlis – Sol nu	11640	13684,2	6,08
Jeune jachère - Champ	10456	43771,7	19,44
Forêt primaire	5908	26852,2	11,92
Plantation rurale	449	1902,7	0,84
Végétation flottante	113	194,5	0,09
Vieille jachère	3762	20110,6	8,93
Brûlis – Sol nu forestier	315	275,2	0,12
Jeune jachère - Champ forestier	1311	5060,3	2,25
Forêt primaire forestière	11863	92695,8	41,16
Eau	871	7245,5	3,22
Non classifié	857	201,1	0,09

Le résultat final de la classification supervisée de 2010 est présenté à la Carte 4.

La classe forêt (forêt primaire et forêt primaire forestière) est toujours la classe d'occupation du sol dominante de la zone d'étude. Il semble par contre y avoir beaucoup plus de jeunes jachères – champs que de vieilles jachères cette fois. Le reste des informations fournies par cette classification est identique à celles fournies par la classification supervisée de 2002.

5.3. Précision des classifications : matrice de confusion et coefficient Kappa

5.3.1. Classification non supervisée 2002

La matrice de confusion réalisée pour la classification non supervisée 2002 est présentée au Tableau 26.

Tableau 26 - Matrice de confusion pour la classification non supervisée de 2002

Matrice de confusion		Occupation du sol prédite						Précision du producteur (%)	
		Bâti - Sol nu	Eau	Forêt primaire	Jeune jachère - Champ	Végétation flottante	Vieille jachère		Total
Occupation du sol observée	Bâti - Sol nu	13		1	7	1	8	30	43,3
	Eau		0					0	/
	Forêt primaire			10				10	100,0
	Jeune jachère - Champ	10			13		17	40	32,5
	Végétation flottante	7	5	1		7		20	35,0
	Vieille jachère	1		4	3		12	20	60,0
	Total	31	5	16	23	8	37	120	
Précision de l'utilisateur (%)		41,9	0,0	62,5	56,5	87,5	32,4		

La précision globale est de 45,8%, le coefficient Kappa est quant à lui de 0,32.

Deux classes sont sources de confusion : la classe jeune jachère – champs et la classe vieille jachère. Pour ces classes, les précisions producteur et utilisateur dépassent rarement les 50%.

La classe bâti – sol nu a également de nombreuses erreurs de classification. Quant à la classe forêt primaire, c'est la classe qui possède la meilleure précision de classification.

5.3.2. Classification non supervisée 2010

La matrice de confusion réalisée pour la classification non supervisée 2010 est présentée au Tableau 27.

Résultats

Tableau 27 - Matrice de confusion pour la classification non supervisée de 2010

<i>Matrice de confusion</i>		<i>Occupation du sol prédite</i>						<i>Précision de producteur (%)</i>	
		Bâti - Sol nu	Eau	Forêt primaire	Jeune jachère - Champ	Végétation flottante	Vieille jachère		Total
<i>Occupation du sol observée</i>	Bâti - Sol nu	30						30	100,0
	Eau		0					0	/
	Forêt primaire			7			3	10	70,0
	Jeune jachère - Champ	14			13		13	40	32,5
	Végétation flottante	1			1	11	7	20	55,0
	Vieille jachère	1		3	1		15	20	5,0
	Total	46	0	10	15	11	38	120	
<i>Précision de l'utilisateur (%)</i>		65,2	/	70,0	86,7	100,0	39,5		

La précision globale est de 63,3%, le coefficient Kappa est quant à lui de 0,53.

A nouveau, deux classes sont sources de confusion : la classe jeune jachère – champs et la classe vieille jachère. Pour ces classes, les précisions producteur et utilisateur dépassent rarement les 50%.

La classe bâti – sol nu est possède ici une bonne précision, de même que la classe forêt primaire.

5.3.3. Classification supervisée 2002

La matrice de confusion réalisée pour la classification supervisée 2002 est présentée au Tableau 28.

La précision globale est de 46,7%, le coefficient Kappa est quant à lui de 0,42.

Quatre classes sont sources de confusion : la classe bâti discontinu, la classe brûlis – sol nu, la classe jeune jachère – champ et la classe vieille jachère. Pour ces classes, les précisions producteur et utilisateur ne dépassent pas 50%.

Les classes bâti continu et forêt primaire possèdent des précisions très élevées.

5.3.4. Classification supervisée 2010

La matrice de confusion réalisée pour la classification supervisée 2010 est présentée au Tableau 29.

La précision globale est de 73,3%, le coefficient Kappa est quant à lui de 0,71.

Les précisions producteur et utilisateur sont $\geq 50\%$ pour la majorité des classes.

Résultats

Tableau 28 - Matrice de confusion pour la classification supervisée de 2002

<i>Matrice de confusion</i>		<i>Occupation du sol observée</i>														<i>Précision du producteur (%)</i>	
		Non classifié	Bambous	Bâti continu	Bâti discontinu	Brûlis - Sol nu	Eau	Etang - Zone marécageuse	Forêt primaire	Jeune jachère - Champ	Pâturage	Plantation	Végétation flottante	Vieille jachère	Zone de végétation mixte		Total
<i>Occupation du sol prédite</i>	Non classifié	0													0	/	
	Bambous		6						1				3		10	60	
	Bâti continu			9				1							10	90	
	Bâti discontinu			1	1	2			1				3	2	10	10	
	Brûlis - Sol nu		1			0			1	5			3		10	0	
	Eau						0								0	/	
	Etang - Zone marécageuse	1						7							2	10	70
	Forêt primaire								10							10	100
	Jeune jachère - Champ		1							4				5		10	40
	Pâturage									2	5			2	1	10	50
	Plantation									1		3		4	2	10	30
	Végétation flottante	2					4	2					2			10	20
	Vieille jachère								2	5				3		10	30
	Zone de végétation mixte				2					1		1			6	10	60
Total	3	8	10	3	2	4	10	13	20	5	4	2	23	13	120		
<i>Précision de l'utilisateur (%)</i>	/	75,0	90,0	33,3	0,0	/	70,0	76,9	20,0	100,0	75,0	100,0	13,0	46,2			

Résultats

Tableau 29 - Matrice de confusion pour la classification supervisée de 2010

<i>Matrice de confusion</i>		<i>Occupation du sol observée</i>														<i>Précision du producteur (%)</i>	
		Non classifié	Bambous	Bâti continu	Bâti discontinu	Brûlis - Sol nu	Eau	Etang - Zone marécageuse	Forêt primaire	Jeune jachère - Champ	Pâturage	Plantation	Végétation flottante	Vieille jachère	Zone de végétation mixte		Total
<i>Occupation du sol prédite</i>	Non classifié	0													0	/	
	Bambous		7						3						10	70	
	Bâti continu			8	1										1	10	80
	Bâti discontinu			1	9											10	90
	Brûlis - Sol nu					9			1							10	90
	Eau						0									0	/
	Etang - Zone marécageuse						1	8							1	10	80
	Forêt primaire								10							10	100
	Jeune jachère - Champ		1			1				8						10	80
	Pâturage										8				2	10	80
	Plantation									1		3		5	1	10	30
	Végétation flottante	2								1			2		5	10	20
	Vieille jachère								2	2				6		10	60
	Zone de végétation mixte														10	10	100
Total	2	8	9	10	10	1	8	12	16	8	3	2	11	20	120		
<i>Précision de l'utilisateur (%)</i>	/	87,5	88,9	90,0	90,0	/	100,0	83,3	50,0	100,0	100,0	100,0	54,5	50,0			

5.4. Analyse de la dynamique paysagère

5.4.1. Matrice de transition

5.4.1.1. Matrice de transition pour les classifications non supervisées

Les surfaces et les pourcentages représentés par chaque occupation du sol de la matrice de transition des classifications non supervisées 2002 et 2010 sont repris dans les Tableaux 30 et 31.

Tableau 30 – Matrice de transition entre 2002 et 2010 sur base des classifications non supervisées : surface en hectares

Surface (ha)		2010						Total
		Bâti - Sol nu	Jeune jachère - Champ	Vieille jachère	Forêt primaire	Eau	Végétation flottante	
2002	Bâti - Sol nu	7182,83	985,85	3728,79	120,88	39,24	142,76	12200,35
	Jeune jachère - Champ	2857,71	3764,57	11766,27	215,63	12,39	60,49	18677,06
	Vieille jachère	4816,36	7053,6	34625,4	2840,8	9,73	67,82	49413,71
	Forêt primaire	1989,13	2271,15	28003,83	104373,65	39,84	138,11	136815,71
	Eau	21,31	3,85	128,58	257,03	6646,85	246,75	7304,37
	Végétation flottante	100,27	21,8	188,7	28,16	178,2	130,31	647,44
	Total	16967,61	14100,82	78441,57	107836,15	6926,25	786,24	225058,64

Tableau 31 - Matrice de transition entre 2002 et 2010 sur base des classifications non supervisées : surface en pourcentages par ligne

Surface (% par ligne)		2010						Total
		Bâti - Sol nu	Jeune jachère - Champ	Vieille jachère	Forêt primaire	Eau	Végétation flottante	
2002	Bâti - Sol nu	58,87	8,08	30,56	0,99	0,32	1,17	100,00
	Jeune jachère - Champ	15,30	20,16	63,00	1,15	0,07	0,32	100,00
	Vieille jachère	9,75	14,27	70,07	5,75	0,02	0,14	100,00
	Forêt primaire	1,45	1,66	20,47	76,29	0,03	0,10	100,00
	Eau	0,29	0,05	1,76	3,52	91,00	3,38	100,00
	Végétation flottante	15,49	3,37	29,15	4,35	27,52	20,13	100,00
	Total	7,54	6,27	34,85	47,91	3,08	0,35	100,00

Le résultat final de la transition entre 2002 et 2010 pour les classifications non supervisées est présenté à la Carte 5. Pour cette carte, une échelle de naturalité a été définie, de façon à représenter les changements d'occupation du sol par des couleurs en fonction de l'importance de la dégradation ou du retour à l'état « naturel ». Cette échelle est présentée dans le Tableau 32.

Tableau 32 - Echelle de naturalité identifiant pour la matrice de transition non supervisée le poids des changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010

<i>Occupation du sol</i>	<i>Echelle de naturalité</i>
Forêt primaire, Eau, Végétation flottante	++
Vieille jachère	+
Champ et jeune jachère	-
Bâti	--

Suivant le changement d'occupation du sol, un chiffre est donc attribué. Par exemple, si l'occupation du sol est passée d'une forêt primaire en 2002 à un champ en 2010, le chiffre attribué sera donc -2. Ceci permet un aspect plus visuel de la carte en identifiant directement les zones qui ont subi un fort impact de l'anthropisation entre 2002 et 2010.

Kisangani a vu sa surface bâtie augmenter de $\pm 39\%$, et son impact sur le milieu naturel a augmenté de $\pm 36\%$ entre 2002 et 2010, la forêt quant à elle a subi une diminution de $\pm 21\%$ de sa surface. Cette forêt représente la matrice paysagère car c'est elle qui domine dans le paysage, on peut remarquer une codominance des vieilles jachères qui se renforce entre 2002 et 2010.

L'empreinte écologique de Kisangani sur le milieu naturel est passée de $\pm 36\%$ de la zone d'étude à $\pm 49\%$. En termes d'indice d'empreinte écologique, l'empreinte de Kisangani sur son milieu naturel n'a pas évolué de manière significative, puisque l'indice est constant entre 2002 et 2010 et \pm égal à 6.

Le pourcentage de stabilité du paysage est de $\pm 70\%$. Au niveau de chaque classe d'occupation du sol, la matrice de transition montre une stabilité de $\pm 59\%$ de la classe bâti-sol nu, $\pm 20\%$ de la classe jeune jachère – champ, $\pm 70\%$ de la classe vieille jachère, $\pm 76\%$ de la classe forêt primaire, $\pm 91\%$ de la classe eau et $\pm 20\%$ de classe végétation flottante.

Concernant les changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010 au sein de la zone rurale et forestière, trois éléments peuvent être observés. Pour les jeunes jachères – champs, $\pm 63\%$ sont devenus des vieilles jachères et $\pm 1\%$ est redevenu de la forêt primaire. Les vieilles jachères se sont transformées à $\pm 14\%$ en jeunes jachères – champs et à $\pm 6\%$ en forêt primaire. Quant à la forêt, elle a été dégradée à $\pm 2\%$ en jeunes jachères – champs et à $\pm 20\%$ en vieilles jachères. Ce dernier chiffre est le pourcentage de conversion le plus élevé relevé.

Les valeurs improbables de cette matrice de transition sont les valeurs de changement d'occupation du sol qui a priori ne sont pas possibles sur le terrain. Nous retrouvons ainsi principalement les changements passant d'une surface bâtie – sol nu à un autre type d'occupation du sol, de même que les surfaces d'eau ou de végétation flottante se transformant en une autre occupation du sol. Les surfaces concernant ces changements sont toutefois peu significatives, allant majoritairement de 0 à 2% de la surface de la classe concernée. Cependant, on retrouve un pourcentage assez important de surface bâtie – sol nu se transformant en vieille jachère ($\pm 31\%$) ou en jeune jachère – champ ($\pm 8\%$).

5.4.1.2. Matrice de transition pour les classifications supervisées

Les surfaces et les pourcentages représentés par chaque occupation du sol de la matrice de transition des classifications non supervisées 2002 et 2010 sont repris dans les Tableaux 33 et 34.

Résultats

Tableau 33 - Matrice de transition entre 2002 et 2010 sur base des classifications supervisées : surface en hectares

<i>Surface (ha)</i>		<i>2010</i>												
		Bambous	Bâti	Brûlis - Sol nu	Jeune jachère - Champ	Eau - Végétation flottante	Etang - Zone marécageuse	Forêt primaire	Non classifié	Pâturage	Plantation	Vieille jachère	Zone de végétation mixte	Total
2002	Bambous	869,74	25,49	1239,44	4248,84	9,48		502,78	2,47	0,44	43,42	1460,14	12,35	8414,59
	Bâti	3,41	3327,21	56,79	14,96	11,78	15,11		6,06	79,88	37,58	8,01	907,3	4468,09
	Brûlis - Sol nu	237,48	471,13	1761,72	2025,59	42,23	1,8	479,36	10,76	67,14	82,96	714,49	237,17	6131,83
	Jeune jachère - Champ	1732,48	385,45	5056,1	16925,27	95,71	1,45	2234,84	18,89	79,16	244,69	6250,41	424,23	33448,68
	Eau - Végétation flottante	5,48	8,33	91,39	88,74	6890,74	12,52	388,11	92,67	1,04	48,3	21,83	34,25	7683,4
	Etang - Zone marécageuse	0,08	172,65	8,88	0,52	33,1	42,54	0,19	8,28	10,55	0,65	0,17	175,44	453,05
	Forêt primaire	441,8	14,98	1921,21	11070,6	117,87	0,81	110261,06	26,08	1,56	820,99	3570,83	38,18	128285,97
	Non classifié	3,66	16,61	28,78	19,19	119,49	10,04	69,32	13,15	1,37	17,23	12,02	33,43	344,29
	Pâturage	1,98	26,13	1,29	5,03	0,16				3,1	0,1		17,69	55,48
	Plantation	19,21	28,19	69,16	103,77	21,75	2,02	82,85	3,75	7,51	462,33	43,22	52,52	896,28
	Vieille jachère	1177,16	345,96	3689,81	14317,56	91,84	4,66	5529,49	17,16	81,22	331,11	8008,67	571,77	34166,41
	Zone de végétation mixte	0,76	365	34,84	11,9	7,01	12,2		1,84	28,59	27,98	18,38	358,54	867,04
Total	4493,24	5187,13	13959,41	48831,97	7441,16	103,15	119548	201,11	361,56	2117,34	20108,17	2862,87	225215,11	

Résultats

Tableau 34 - Matrice de transition entre 2002 et 2010 sur base des classifications supervisées : surface en pourcentages de ligne

<i>Surface (% de ligne)</i>		2010												
		Bambous	Bâti	Brûlis - Sol nu	Jeune jachère - Champ	Eau - Végétation flottante	Etang - Zone marécageuse	Forêt primaire	Non classifié	Pâturage	Plantation	Vieille jachère	Zone de végétation mixte	Total
2002	Bambous	10,34	0,30	14,73	50,49	0,11	0,00	5,98	0,03	0,01	0,52	17,35	0,15	100,00
	Bâti	0,08	74,47	1,27	0,33	0,26	0,34	0,00	0,14	1,79	0,84	0,18	20,31	100,00
	Brûlis - Sol nu	3,87	7,68	28,73	33,03	0,69	0,03	7,82	0,18	1,09	1,35	11,65	3,87	100,00
	Jeune jachère - Champ	5,18	1,15	15,12	50,60	0,29	0,00	6,68	0,06	0,24	0,73	18,69	1,27	100,00
	Eau - Végétation flottante	0,07	0,11	1,19	1,15	89,68	0,16	5,05	1,21	0,01	0,63	0,28	0,45	100,00
	Etang - Zone marécageuse	0,02	38,11	1,96	0,11	7,31	9,39	0,04	1,83	2,33	0,14	0,04	38,72	100,00
	Forêt primaire	0,34	0,01	1,50	8,63	0,09	0,00	85,95	0,02	0,00	0,64	2,78	0,03	100,00
	Non classifié	1,06	4,82	8,36	5,57	34,71	2,92	20,13	3,82	0,40	5,00	3,49	9,71	100,00
	Pâturage	3,57	47,10	2,33	9,07	0,29	0,00	0,00	0,00	5,59	0,18	0,00	31,89	100,00
	Plantation	2,14	3,15	7,72	11,58	2,43	0,23	9,24	0,42	0,84	51,58	4,82	5,86	100,00
	Vieille jachère	3,45	1,01	10,80	41,91	0,27	0,01	16,18	0,05	0,24	0,97	23,44	1,67	100,00
	Zone de végétation mixte	0,09	42,10	4,02	1,37	0,81	1,41	0,00	0,21	3,30	3,23	2,12	41,35	100,00
Total	2,00	2,30	6,20	21,68	3,30	0,05	53,08	0,09	0,16	0,94	8,93	1,27	100,00	

Le résultat final de la transition entre 2002 et 2010 pour les classifications supervisées est présenté à la Carte 6.

L'échelle de naturalité définie pour les classifications supervisées est présentée dans le Tableau 35.

Tableau 35 - Echelle de naturalité identifiant pour la matrice de transition supervisée le poids des changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010. Les classes ont été regroupées en fonction de leur état d'anthropisation plus ou moins avancé et au niveau de leur couvert pour les classes présentant de la végétation.

<i>Occupation du sol</i>	<i>Echelle de naturalité</i>
Forêt primaire, Eau, Végétation flottante, Etang et zone marécageuse	++
Vieille jachère, Plantation, Bambous	+
Champs et jeune jachères, Zone de végétation mixte, Pâturage	-
Bâti continu, Bâti discontinu, Brûlis et sol nu	--

La surface bâtie de Kisangani a augmenté de $\pm 16\%$, et son impact sur le milieu naturel a augmenté de $\pm 9\%$ entre 2002 et 2010. Quant à la forêt, elle a subi une diminution de $\pm 7\%$ de sa surface. Cette forêt représente la matrice paysagère car c'est elle qui domine dans le paysage, on peut remarquer une codominance des vieilles jachères et des jeunes jachères. La codominance des vieilles jachères s'estompe entre 2002 et 2010, tandis que celle des jeunes jachères se renforce sur cette même période.

L'empreinte écologique de Kisangani sur le milieu naturel est passée de $\pm 43\%$ de la zone d'étude à $\pm 47\%$. En termes d'indice d'empreinte écologique, l'empreinte de Kisangani sur son milieu naturel n'a pas évolué de manière significative, puisque l'indice est constant entre 2002 et 2010 et \pm égal à 19.

Le pourcentage de stabilité du paysage est de $\pm 66\%$. Au niveau de chaque classe d'occupation du sol, la matrice de transition montre une stabilité de $\pm 75\%$ de la classe bâti-sol nu, $\pm 29\%$ de la classe brûlis – sol nu, $\pm 51\%$ de la classe jeune jachère – champ, $\pm 86\%$ de la classe forêt primaire, $\pm 23\%$ de la classe vieille jachère .

Concernant les changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010 au sein de la zone rurale et forestière, quatre éléments peuvent être observés. Pour les brûlis – sol nu, $\pm 33\%$ sont devenus des jeunes jachères – champs, $\pm 8\%$ sont devenus des vieilles jachères et $\pm 12\%$ sont redevenus de la forêt primaire. Les jeunes jachères – champs sont devenus à $\pm 15\%$ des brûlis – sol nu, à $\pm 7\%$ de la forêt et à $\pm 19\%$ des vieilles jachères. Les vieilles jachères se sont transformées à $\pm 11\%$ en brûlis – sol nu, à $\pm 42\%$ en jeunes jachères – champs et à $\pm 16\%$ en forêt primaire. Quant à la forêt, elle a été dégradée à $\pm 1\%$ en brûlis – sol nu, à $\pm 9\%$ en jeunes jachères – champs et à $\pm 3\%$ en vieilles jachères.

La comparaison entre les changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010 pour les classifications non supervisées et supervisées est montrée à la Figure 19.

La Tableau 36 montre les surfaces converties en termes d'occupation du sol entre 2002 et 2010 d'après les échelles de naturalité définies, pour les classifications non supervisées et les classifications supervisées. Ce tableau confirme les valeurs de stabilité du paysage ($\pm 70\%$) et montre que plus le changement d'occupation du sol est marqué, moins les surfaces concernées sont importantes.

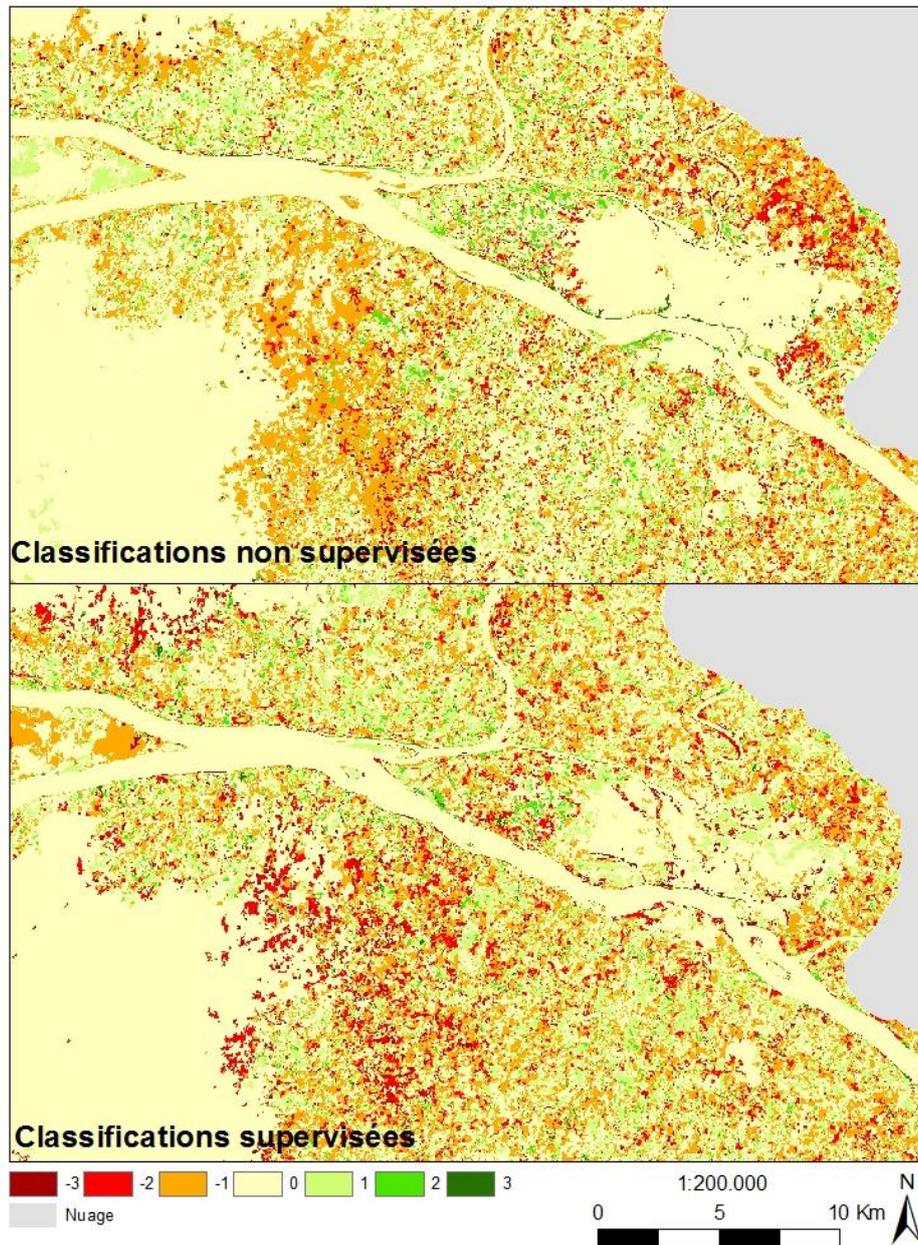


Figure 19 – Comparaison entre la transition d'occupation du sol entre 2002 et 2010 des classifications non supervisées (au-dessus) et la transition d'occupation du sol entre 2002 et 2010 des classifications supervisées (en-dessous) : focus sur la ville de Kisangani et la forêt avoisinante.

Le noyau de la ville de Kisangani a une occupation du sol constante entre 2002 et 2010, de même que la forêt. Au niveau des alentours de la ville, on peut remarquer une petite concentration de zones plus colorées, signe d'une dégradation du milieu naturel vers un milieu avec une anthropisation de plus en plus forte (extension de la ville). Cet aspect est plus marqué sur la carte des classifications non supervisées que sur la carte des classifications supervisées. Quant à la forêt, son recul est beaucoup plus marqué et beaucoup plus important sur la carte des classifications supervisées que sur la carte des classifications non supervisées.

Tableau 36 – Surface (en hectares et en %) transformées entre 2002 et 2010 pour les classifications non supervisées (à gauche) et les classifications supervisées (à droite) d’après les échelles de naturalité définies.

<i>Transition d'occupation du sol (non supervisées)</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>	<i>Transition d'occupation du sol (supervisées)</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Surface (%)</i>
-3	2110,71	0,94	-3	2217,44	0,99
-2	7113,16	3,16	-2	16818,93	7,47
-1	38232,42	16,99	-1	30174,92	13,41
0	157611,7	70,03	0	154008,08	68,43
1	15670,47	6,96	1	17853,69	7,93
2	4017,3	1,79	2	3435,3	1,53
3	302,88	0,13	3	550,28	0,24

5.4.2. Indices de structure spatiale

Les résultats des indices de structure spatiale pour les classifications non supervisées et supervisées 2002 et 2010 sont présentés aux Cartes 7 à 26.

a) Indice de proportion de surface bâtie

Cet indice a permis d’analyser la zone urbaine de Kisangani en termes de surface bâtie, et plus précisément la transition lorsqu’on passe de la zone urbaine à la zone périurbaine puis à la zone rurale. L’indice de proportion de surface bâtie calculé pour chacune des classifications est présenté aux Cartes 7 à 10.

Sur chacune de ces cartes, nous pouvons remarquer que la ville se démarque très bien par un noyau avec un indice de surface bâtie très élevé et par l’absence de mailles avec des valeurs d’indice faibles. Quant à la zone rurale, elle est également bien mise en évidence. La zone périurbaine est par contre caractérisée par des valeurs d’indice de surface bâtie très diverses et ne formant pas une continuité, c’est-à-dire qu’une maille ayant un indice de surface bâtie élevé peut se retrouver à côté d’une maille présentant un indice de surface bâtie faible.

D’après les classifications non supervisées de 2002 et 2010, nous pouvons caractériser la zone urbaine par un indice de surface bâtie $\geq 0,9$, et la zone rurale par un indice de surface bâtie $\leq 0,3$. Les classifications supervisées font état d’un noyau urbain moins dense, où l’indice de surface bâtie est $\geq 0,8$. La zone rurale est caractérisée par un indice de surface bâtie $\leq 0,1$.

Le lissage réalisé sur les quatre classifications pour cet indice de structure spatiale permet de mettre en évidence la zone périurbaine en calculant une moyenne d’écart-type entre les valeurs de l’indice dans un cercle de rayon 5. L’écart-type entre les valeurs est en effet plus élevé dans la zone périurbaine que dans les zones urbaines ou rurales. Nous pouvons remarquer que ce filtre permet une meilleure visualisation de la zone périurbaine pour les classifications non supervisées que pour les classifications supervisées (Figure 20).

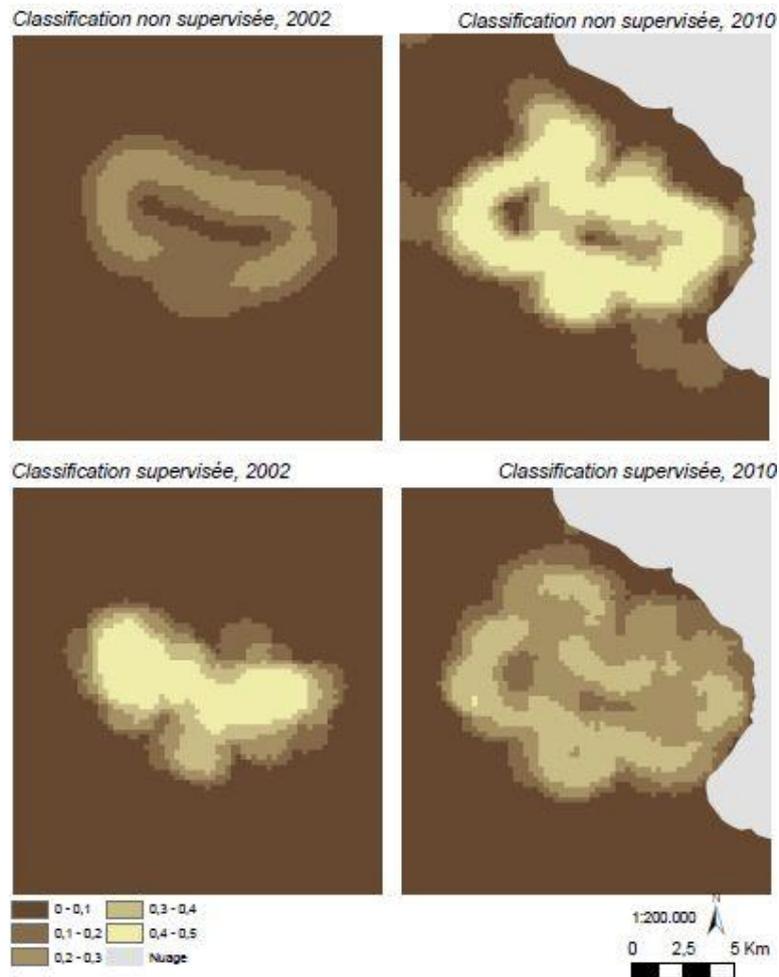


Figure 20 - Valeurs moyennes d'écart-type pour l'indice de proportion de surface bâtie pour les quatre classifications.

Les classifications non supervisées ont permis d'effectuer une approximation de la surface de la zone périurbaine : 4400 ha pour la classification de 2002 et 4100 ha pour la classification de 2010 (Figure 21). On remarque que la bande de zone périurbaine semble s'être rétrécie à certains endroits et qu'elle semble avoir augmenté à d'autres.

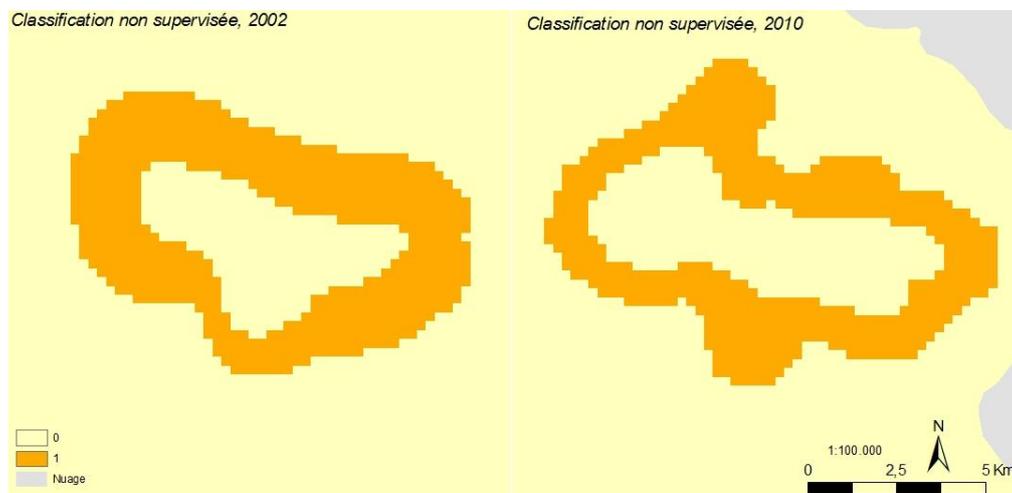


Figure 21 - Comparaison des zones périurbaines identifiées d'après l'indice de proportion de surface bâtie des classifications non supervisées 2002 et 2010

b) Indice de proportion de surface anthropisée

Cet indice a permis d'analyser la zone de transition rural-forêt, autrement dit le front d'anthropisation ou de déforestation autour de Kisangani. L'indice de proportion de surface anthropisée calculé pour chacune des classifications est présenté aux Cartes 11 à 14.

Concernant cet indice, les quatre classifications s'accordent assez bien. En effet, la zone forestière est caractérisée par un indice de surface anthropisée $\leq 0,1$, et les zones anthropisées ont un indice de surface anthropisé $\geq 0,9$. La zone de transition est quant à elle caractérisée par des valeurs d'indice de surface anthropisée très variables, comme la zone périurbaine l'a été pour l'indice de surface bâtie.

Le lissage réalisé sur les quatre classifications pour cet indice de structure spatiale permet de mettre en évidence cette zone de transition en calculant une moyenne d'écart-type entre les valeurs de l'indice dans un cercle de rayon 5. Ainsi, cette zone de transition est représentée par des valeurs d'écart-type plus élevées que la zone forestière ou la zone anthropisée (Figure 22).

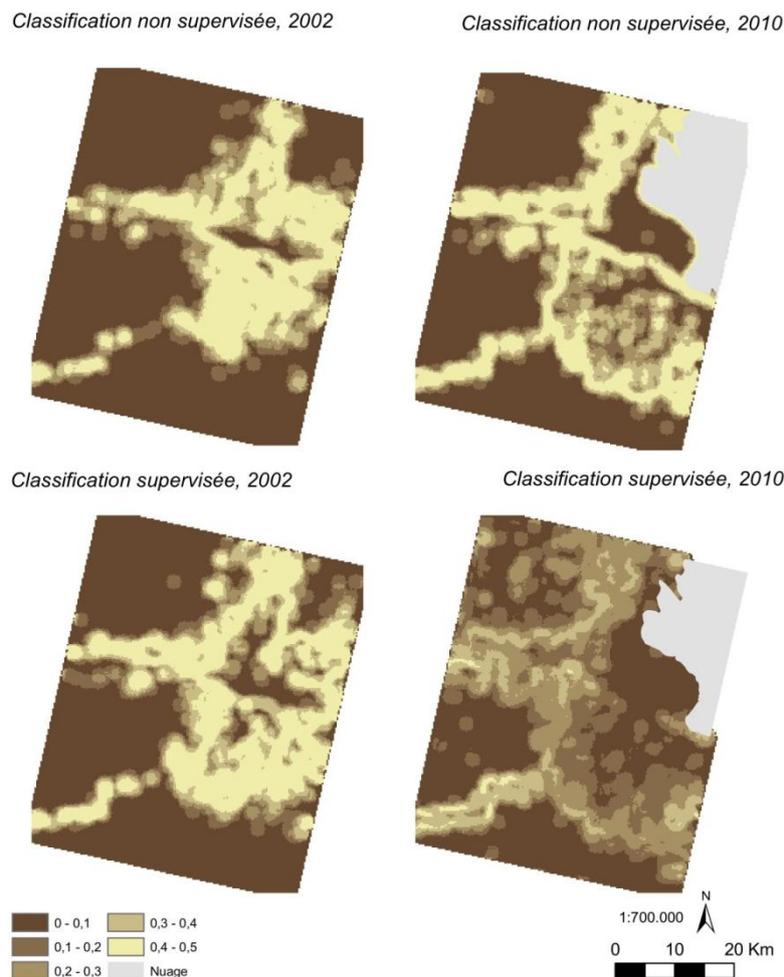


Figure 22 - Valeurs moyennes d'écart-type pour l'indice de proportion de surface anthropisée pour les quatre classifications.

c) Indice d'équitabilité des proportions surfaciques des classes

Cet indice a permis d'analyser si une classe d'occupation du sol domine ou si plusieurs classes sont présentes en rapport plus ou moins équitable. L'indice d'équitabilité des proportions surfaciques des classes calculé pour chacune des classifications est présenté aux Cartes 15 à 18.

Les quatre classifications montrent que la zone urbaine et la zone forestière ont un indice d'équitabilité des proportions surfaciques des classes $\leq 0,1$, alors que les zones périurbaine, rurale et de transition rural-forêt sont caractérisées par un indice d'équitabilité des proportions surfaciques des classes très variable.

d) Indice de classe dominante

Cet indice a permis d'analyser la répartition des classes dominantes par rapport aux différentes zones du gradient. L'indice de classe dominante calculé pour chacune des classifications est présenté aux Cartes 19 à 22.

Dans les quatre classifications, la zone urbaine est dominée par la classe bâti, et la zone forestière est dominée par la classe forêt. Les zones périurbaines, rurales et de transition rural-forêt sont quant à elles constituées d'un mélange de classes dominantes en fonction des mailles. En effet, l'occupation dominante d'une maille peut être très différente de celle de la maille adjacente.

e) Indice de proportion de classe dominante

Cet indice a permis d'analyser la proportion de la classe dominante sur la maille, c'est-à-dire le pourcentage avec lequel la classe dominante domine la maille. L'indice de proportion de classe dominante calculé pour chacune des classifications est présenté aux Cartes 23 à 26.

Les quatre classifications s'accordent sur cet indice pour montrer la différence entre les zones urbaine et forestière et les zones périurbaine, rurale et de transition rural-forêt. Les premières ont un indice de proportion de classe dominante $\geq 90 \%$, alors que les secondes ont des valeurs d'indice de proportion de classe dominante qui peuvent varier sensiblement entre mailles adjacentes.

5.4.3. Directions d'extension de la ville

La différence de NDVI entre 2002 et 2010 permet de mettre en évidence les zones avec une diminution significative de cet indice, et qui correspondent à l'extension de la ville. La Figure 23 illustre cette différence de NDVI entre les deux époques. Nous pouvons donc remarquer que trois zones semblent se distinguer comme étant les zones d'extension de la ville.

Ces zones ont été vérifiées sur le terrain, il s'agit bien de quartiers où le bâti est discontinu et dont l'histoire ne remonte pas avant 2002 (Figure 24). Ces quartiers sont les quartiers du Zoo, Simi-Simi et du Centenaire. Cette extension urbaine semble montrer que la ville de Kisangani s'étend de façon nucléaire ou d'après des sites dispersés.

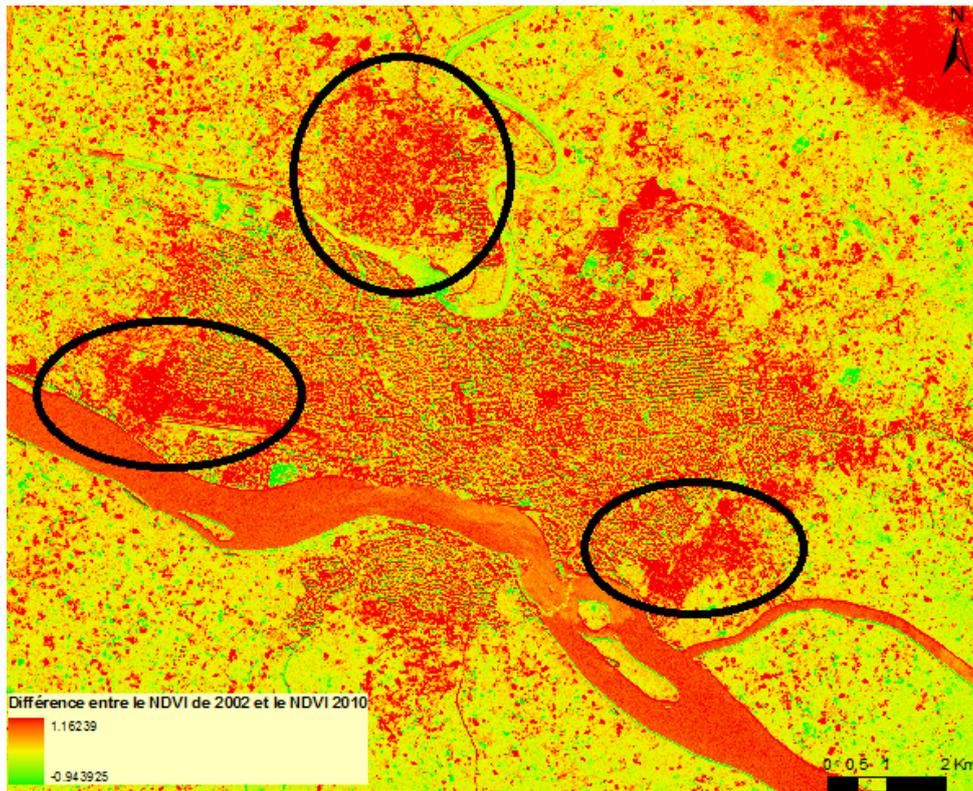


Figure 23 - Différence de NDVI entre 2002 et 2010. Les zones entourées en noir sont les zones où la différence de NDVI est très forte, c'est-à-dire les zones où la végétation a fait place à du bâti. Ces quartiers sont le quartier Simi-Simi (à gauche), le quartier du Zoo (au centre) et le quartier du Centenaire (à droite).



Figure 24 - Quartier Simi-Simi à Kisangani (2012), à l'habitat discontinu marqué

6. Discussion

6.1. Interprétation des résultats

6.1.1. Classifications

Les classifications non supervisées de 2002 et de 2010 ont permis de distinguer six grandes classes d'occupation du sol. Ce potentiel de distinction est fortement influencé par le nombre de clusters choisi pour l'analyse statistique. Il est donc raisonnable de penser que si le nombre de clusters avait été différent, les résultats auraient mené à une classification différente.

Un autre aspect concerne la traduction des classes spectrales (clusters) en classes thématiques. Cette traduction a été faite de manière subjective, sur base d'une interprétation visuelle des images et de la connaissance globale que nous avons du terrain. En effet, il faut rappeler que la classification non supervisée s'effectue sans vérité terrain à proprement parler. Dans le cas présent, nous avons rencontré quelques difficultés à dissocier au sein de la zone rurale les différentes occupations du sol, à savoir les champs, les jeunes jachères et les vieilles jachères. Les deux premiers ont donc été regroupés pour plus de facilité.

La distinction entre champs, jeunes jachères et vieilles jachères constitue donc un point important de notre travail de cartographie. Même avec des points de vérité terrain, il existe une grande incertitude lors de leur identification sur l'image SPOT 5, et cela pour deux raisons. Premièrement, parce qu'il y a un décalage temporel entre la collecte des données qui s'est faite en 2012 et l'image satellitaire associée à ces visites de terrain qui date de 2010. Deuxièmement, parce qu'en milieu tropical, la dynamique temporelle est très élevée. En effet, l'agriculture sur brûlis domine, et une période de huit ans est suffisante pour que des champs soient devenus jachères, et inversement. Il faut donc faire attention à l'interprétation des résultats concernant les champs et les jachères, les chiffres de surface occupée doivent être pris avec prudence.

Les classifications supervisées font apparaître des zones de brûlis – sol nu répartis dans toute la zone d'étude. Cet élément traduit la présence d'une activité d'agriculture sur brûlis intense tout autour de la ville.

La présence de nombreux bosquets de bambous est bien marquée le long des routes sur les classifications supervisées. Nous pouvons donc supposer que ces bambous sont spontanés et assurent leur dispersion par les nombreux passages qui s'effectuent sur ces routes.

6.1.2. Précision des classifications : matrice de confusion et coefficient Kappa

Les matrices de confusion des classifications non supervisées ont permis de calculer un coefficient Kappa égal à 0,32 pour 2002 et 0,53 pour 2010. D'après Landis et Koch (1977), ces taux correspondent respectivement à une précision de classification considérée comme acceptable (entre 0,21 et 0,40) et modérée (entre 0,41 et 0,60). Nous pouvons noter que le coefficient Kappa de 2010 est plus élevé que celui de 2002, ce qui s'explique fort logiquement par la plus grande proximité temporelle de la campagne de terrain.

Pour ces deux classifications, nous constatons que deux classes sont principalement sources de confusion : la classe jeune jachère – champ et la classe vieille jachère (Tableau 37). Cela peut s’expliquer assez facilement par le fait que les jachères peuvent être très diverses. Leur composition peut ainsi varier énormément en fonction des endroits. Ces caractéristiques influencent leur signature spectrale, et il devient donc difficile de les différencier sur l’image satellitaire. Cependant, le reste de la classification semble correct pour ces deux années, puisque les zones urbaine et forestière correspondent à leur réalité de terrain.

Il faut toutefois ajouter que la précision de la classification non supervisée 2002 est très faible, avec la présence de nombreuses erreurs de classification dans la classe bâti – sol nu en plus des deux classes précitées. L’explication est assez simple : les points utilisés pour construire les matrices de confusion sont des points terrain de l’année 2012. Il est donc logique qu’un certain nombre de ces points n’ait pas la même réalité en 2002, suite à l’extension de la ville, aux changements d’occupation du sol et à la dynamique temporelle élevée de ces changements. Le coefficient Kappa de la classification non supervisée 2002 est donc à prendre avec du recul du fait même des échantillons utilisés pour le calculer.

Tableau 37 - Précisions du producteur et de l'utilisateur pour les deux classes les moins précises des classifications non supervisées de 2002 et de 2010.

	<i>Précision producteur (%)</i>		<i>Précision utilisateur (%)</i>	
	2002	2010	2002	2010
Jeune jachère – Champ	32,5	32,5	56,5	86,7
Vieille jachère	60,0	5,0	32,4	39,5

Les matrices de confusion des classifications supervisées ont permis de calculer un coefficient Kappa égal à 0,42 pour 2002 et 0,71 pour 2010. Ces valeurs de Kappa correspondent respectivement à une précision considérée comme modérée (entre 0,41 et 0,60) et bonne (entre 0,61 et 0,80) (Landis et Koch, 1977). Nous pouvons noter que le coefficient Kappa de 2010 est plus élevé que celui de 2002, ce qui s’explique de la même façon que précédemment.

Pour la classification supervisée de 2002, nous constatons que de nombreuses classes sont sources de confusion : la classe bâti discontinu, la classe brûlis – sol nu, la classe jeune jachère – champ et la classe vieille jachère (Tableau 38). Toutefois, ces trois dernières classes correspondent bien à des classes avec une variabilité temporelle très élevée, ce faible coefficient Kappa s’explique donc de la même façon que celui de la classification non supervisée 2002. Concernant le bâti discontinu, l’explication vient du fait que les zones de bâti discontinu de 2010 étaient sans aucun doute encore des zones rurales en 2002.

Le reste de la classification semble correct, puisqu’à nouveau les zones urbaine et forestière correspondent à leur réalité de terrain. Le coefficient Kappa de la classification supervisée 2002 est donc également à prendre avec du recul pour les mêmes raisons que celui de la classification non supervisée 2002.

Tableau 38 - Précisions du producteur et de l'utilisateur pour les quatre classes les moins précises de la classification supervisée de 2002.

	<i>Précision producteur (%)</i>	<i>Précision utilisateur (%)</i>
Bâti discontinu	10,0	33,3
Brûlis – Sol nu	0,0	0,0
Jeune jachère – Champs	40,0	20,0
Vieille jachère	30,0	13,0

D'après la matrice de confusion, la classification supervisée de 2010 est globalement assez bonne. Peu d'erreurs au niveau des classes sensibles (brûlis – sol nu, jeune jachère – champ, vieille jachère) se font ressentir et les précisions producteurs et utilisateurs sont pratiquement toutes au-dessus des 50%.

Pontius (2000) a montré que dans une étude d'occupation du sol, lorsque le coefficient Kappa est compris entre 0,50 et 0,75, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés.

Il n'y a donc pas de problème pour les classifications non supervisée et supervisée de 2010. Quant aux classifications non supervisée et supervisée 2002, nous rappellerons que leur coefficient Kappa est à analyser avec prudence.

Il faut rajouter que dans un cas théorique d'approche par classification non supervisée, le calcul d'une telle précision n'est pas possible à priori. En effet, sans points de terrain, il est impossible de construire une matrice de confusion qui soit réaliste. C'est dans ce genre de situation que Google Earth peut se révéler utile en fournissant des points issus d'images à très haute résolution, remplaçant ainsi les points de terrain.

6.1.3. Analyse de la dynamique paysagère

6.1.3.1. Matrices de transition

La matrice de transition des classifications non supervisées a montré que la superficie urbanisée de la ville de Kisangani a augmenté de $\pm 39\%$, alors que la surface couverte par la forêt a diminué d'un peu plus de $\pm 21\%$ et que l'impact de Kisangani sur le milieu naturel a augmenté de $\pm 36\%$. Ces résultats sont à prendre avec beaucoup de recul, car dans ces classifications non supervisées, la classe thématique dénommée bâti reprend aussi les nombreuses surfaces dispersées de brûlis et de sol nu tout autour de la ville, surfaces qui ont la même gamme de signature spectrale que le vrai bâti. De plus, nous constatons que 28000 ha de la classe forêt de 2002 sont devenus des vieilles jachères en 2010, soit $\pm 20\%$ de la surface forestière de 2002, ce qui représente la plus grosse transition présente dans la matrice de transition.

En ce qui concerne la matrice de transition des classifications supervisées, nous avons vu une augmentation de $\pm 16\%$ de la surface bâtie, une diminution de $\pm 7\%$ de la surface forestière et une augmentation de $\pm 9\%$ de la surface d'impact de la ville. L'analyse de la matrice de transition nous apprend également que la somme de la surface de la classe bâti et de la surface de la classe brûlis – sol nu s'approche de 10500 ha en 2002 et 19000 ha en 2010, ce qui correspond relativement bien aux chiffres de la classification non supervisée et confirme que les zones de brûlis – sol nu sont bien compris dans la classe bâti des classifications non supervisées.

Par contre, pour la classe forêt, un tableau de comparaison entre les classifications non supervisée et supervisée de 2010 (Tableaux 39 et 40) nous apprend que 16000 ha classés en vieille jachère dans la classification non supervisée sont classés en forêt dans la classification supervisée. La Figure 25 présentée ci-dessous indique que la transition zone rurale – zone forestière se visualise avec beaucoup plus de détails dans la classification supervisée que dans la classification non supervisée. Beaucoup de polygones classés en vieille jachère en classification non supervisée correspondent effectivement à de la forêt. Ceci peut résulter de plusieurs aspects : soit le nombre de clusters n'était pas suffisant pour créer des classes plus homogènes et permettre de mieux distinguer le gradient rural-forêt, soit il aurait fallu créer des classes thématiques mixtes qui auraient sans doute été plus proches de la réalité, mais qui auraient été plus difficiles à identifier et à analyser par la suite.

Tableau 39 - Comparaison entre les résultats de classification supervisée et non supervisée d'occupation du sol de 2010 : surface en hectares.

<i>Surface (ha)</i>		<i>Classes d'occupation du sol de la classification non supervisée 2010</i>						
		Bâti	Jeune jachère - Champ	Vieille jachère	Forêt primaire	Eau	Végétation flottante	Total
<i>Classes d'occupation du sol de la classification supervisée 2010</i>	Non classifié	5,49		0,95		8,08	140,31	154,83
	Bambous	551,09	2567,97	1372,80				4491,86
	Bâti continu	3521,11				1,76	10,36	3533,23
	Bâti discontinu	1609,53	0,68	43,69				1653,90
	Brûlis - Sol nu	8251,63	520,81	4961,78	33,84	14,62	172,00	13954,68
	Jeune jachère - Champ	877,64	9881,15	35233,72	2839,56	0,00	0,00	48832,07
	Eau	5,50		8,30	7,00	6902,49	254,23	7177,52
	Etang - Zone marécageuse	1,33					101,82	103,15
	Forêt primaire	13,15	0,00	16056,77	103428,83	0,00	49,25	119548,00
	Plantation	110,88	85,92	1375,61	471,22	0,00	3,08	2046,71
	Pâturage	349,81	3,63	7,04			1,08	361,56
	Vieille jachère	6,35	449,88	18572,47	1081,93			20110,63
	Végétation flottante	36,12	33,77	84,05	0,01		40,59	194,54
	Zone de végétation mixte	1628,27	558,35	731,18	1,66		14,04	2933,50
	Total	16967,90	14102,16	78448,36	107864,05	6926,95	786,76	225096,18

Tableau 40 - Comparaison entre les résultats de classification supervisée et non supervisée d'occupation du sol de 2010 : surface en pourcentages de ligne.

Surface (% de ligne)		Classes d'occupation du sol de la classification non supervisée 2010						Total
		Bâti	Jeune jachère - Champ	Vieille jachère	Forêt primaire	Eau	Végétation flottante	
Classes d'occupation du sol de la classification supervisée 2010	Non classifié	3,55	0,00	0,61	0,00	5,22	90,62	100
	Bambous	12,27	57,17	30,56	0,00	0,00	0,00	100
	Bâti continu	99,66	0,00	0,00	0,00	0,05	0,29	100
	Bâti discontinu	97,32	0,04	2,64	0,00	0,00	0,00	100
	Brûlis - Sol nu	59,13	3,73	35,56	0,24	0,10	1,23	100
	Jeune jachère - Champ	1,80	20,23	72,15	5,81	0,00	0,00	100
	Eau	0,08	0,00	0,12	0,10	96,17	3,54	100
	Etang - Zone marécageuse	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	98,71	100
	Forêt primaire	0,01	0,00	13,43	86,52	0,00	0,04	100
	Plantation	5,42	4,20	67,21	23,02	0,00	0,15	100
	Pâturage	96,75	1,00	1,95	0,00	0,00	0,30	100
	Vieille jachère	0,03	2,24	92,35	5,38	0,00	0,00	100
	Végétation flottante	18,57	17,36	43,20	0,01	0,00	20,86	100
	Zone de végétation mixte	55,51	19,03	24,93	0,06	0,00	0,48	100
Total	7,54	6,26	34,85	47,92	3,08	0,35	100	

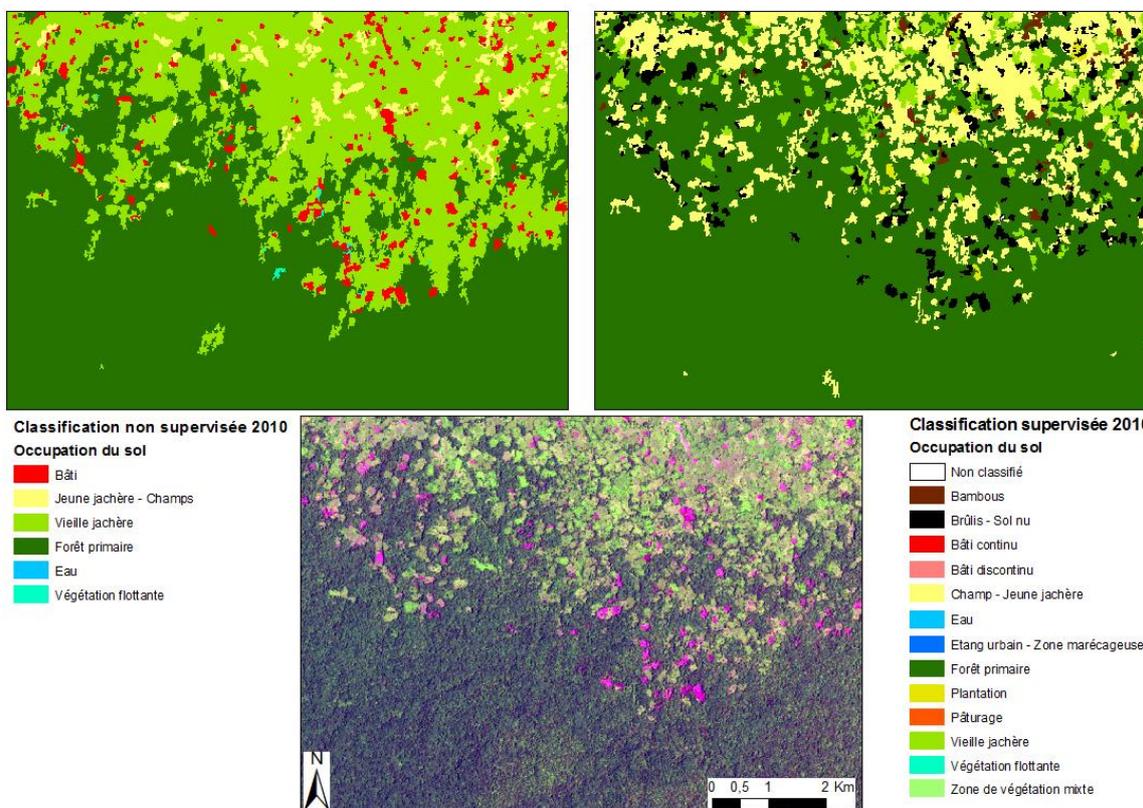


Figure 25 - Comparaison entre les classifications supervisée et non supervisée de 2010 pour une zone de transition forêt-rural, et comparaison avec l'image SPOT 5 de départ.

Nous retiendrons donc plus facilement la valeur de diminution de la forêt de 7% de la classification supervisée. Cette valeur de diminution de surface forestière est-elle plausible ? Bamba (2010) a montré dans sa thèse que la surface de forêt a diminué de 8% sur sa zone d'étude en 15 ans. Toutefois, la valeur que nous obtenons ici n'est pas tout à fait comparable à celle d'autres études. En effet, nous ne disposons ici que d'une partie de la couronne de déforestation entourant la ville de Kisangani. Pour comparer la valeur de la diminution de la forêt avec d'autres études, il aurait fallu extrapoler la valeur obtenue pour pouvoir estimer la diminution sur la couronne totale de déforestation. Ceci est difficile à réaliser : nous n'avons aucune certitude sur le fait que la forêt soit déboisée de la même façon à l'est de Kisangani qu'elle ne l'est sur la partie étudiée.

La matrice de transition des classifications non supervisées a montré que l'indice d'empreinte écologique de Kisangani sur son milieu naturel n'a pas augmenté de manière significative entre 2002 et 2010 par rapport à la taille de la ville. L'indice d'empreinte écologique est toujours \pm égal à 6. Quant à la matrice de transition des classifications supervisées, elle montre un indice d'empreinte écologique \pm égal à 19 pour les deux classifications supervisées. Dans tous les cas, cela indique que la surface d'impact de la ville augmente proportionnellement à la surface totale de la ville. Cependant, la différence entre les valeurs d'indice peut être expliquée à nouveau par la présence des zones de brûlis – sol nu qui sont comprises dans la classe bâti des classifications non supervisées, alors qu'elles forment une classe à part entière dans les classifications supervisées. La valeur d'indice d'empreinte écologique à retenir est donc celle des classifications supervisées.

Concernant les changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010 au sein de la zone rurale, la matrice de transition des classifications non supervisées montre qu'une proportion très faible des jeunes jachères est redevenue forêt. Cela semble logique, car le temps nécessaire à la reconstitution d'une forêt primaire à base d'une jeune jachère est beaucoup plus long qu'une période de huit ans. On observe également que les vieilles jachères redeviennent principalement des jeunes jachères et qu'au final, peu de forêt primaire semble se reconstituer entre 2002 et 2010. Cela indique que le système de rotation est bien présent dans le système cultural des paysans de Kisangani.

Les valeurs improbables des matrices de transition des classifications non supervisées ont montré une proportion importante de bâti devenant des vieilles jachères ou des jeunes jachères et des champs. A nouveau, cela s'explique par la présence des zones de brûlis – sol nu dans la classe bâti des classifications non supervisées.

Pour les deux matrices de transition, le cycle brûlis – champ – jeune jachère – vieille jachère – forêt primaire semble globalement bien suivi, les jeunes jachères deviennent des vieilles jachères ou des brûlis, tandis que les vieilles jachères redeviennent soit des jeunes jachères soit de la forêt primaire. La forêt quant à elle est dégradée en un mélange de brûlis, jeunes jachères et vieilles jachères.

La matrice de transition des classifications supervisées montre un pourcentage de stabilité de la classe brûlis – sol nu \pm égal à 29 %, ce qui indique à nouveau la présence d'agriculture itinérante et donc des occupations du sol à dynamique temporelle très élevée.

Concernant la réhabilitation de forêt primaire à hauteur de $\pm 12\%$ de surfaces de brûlis, nous n'avons pas réussi à l'expliquer correctement. Il est certain qu'un délai de huit ans est loin d'être insuffisant pour permettre à des zones de brûlis de reconstituer une forêt primaire. Une explication possible pourrait être que ces zones de brûlis, de faible surface et entourées par la forêt, ont été recouvertes en hauteur par le développement de la canopée avoisinante qui a masqué leur réelle occupation du sol à un capteur prenant des images depuis l'atmosphère.

Les cartes associées aux matrices de transition (Cartes 5 et 6) permettent d'analyser visuellement la structure spatiale des changements d'occupation du sol en termes de cohérence spatiale. La concentration de zones plus colorées autour de la ville indique une cohérence spatiale plus importante. En effet, des zones agrégées de même niveau de changement d'occupation du sol d'après l'échelle de naturalité sont plus fiables que des polygones de même niveau de changement sur l'échelle de naturalité dispersés un peu partout dans la zone d'étude. Nous constatons le même phénomène pour la forêt, dont le recul est bien visible car agrémenté de zones agrégées de même niveau de changement sur l'échelle de la naturalité dans les zones où la forêt a reculé. Ces deux phénomènes sont donc fiables en raison de la cohérence spatiale qui les caractérise. Il s'agit donc d'une analyse de la structure spatiale qui est cohérente.

Nous avons également vu que lorsque le changement d'occupation du sol est plus fort d'après l'échelle de naturalité (-3 est plus fort que -1 par exemple), les surfaces concernées sont moins grandes. Cela traduit une anthropisation progressive où on passe par exemple d'une jeune jachère à du bâti. Les transitions fortes telles que celle du type forêt primaire – bâti sont très limitées en termes de surface sur la période considérée.

6.1.3.2. Indices de structure spatiale

La zone périurbaine est caractérisée par un manque de cohérence spatiale au niveau des valeurs d'indice de proportion de surface bâtie. Cela s'explique par le fait que cette zone n'est pas caractérisée par une occupation du sol dominante, mais qu'elle est constituée de différentes occupations du sol très différentes qui se côtoient, faisant de cette zone une zone de mixité très élevée.

La zone périurbaine est en effet caractérisée par une *fonction* plutôt que par une occupation du sol dominante, à l'inverse de la zone urbaine caractérisée par la classe bâti et la zone forestière caractérisée par la classe forêt. Il n'y a donc pas de valeur dominante d'indice de surface bâtie.

D'après la comparaison des zones périurbaines identifiées pour les classifications non supervisées, il semble que la zone urbaine se soit étendue entre 2002 et 2010 aux dépens de la zone périurbaine qui a vu sa surface diminuer. Il semble donc y avoir un phénomène de densification du bâti existant.

Le lissage réalisé visualise mieux la zone périurbaine dans les classifications non supervisées que dans les classifications supervisées. Dans celles-ci, les zones urbaine et périurbaine sont moins distinctes car elles possèdent des valeurs d'écart-type semblables dues au niveau plus élevé de détails dans les classifications supervisées. En effet, plus une classification est détaillée, plus le mélange des classes empêche la distinction d'une zone en particulier. Dans le cas urbain, cela s'explique assez facilement. Le terme « urbain » fait référence à une utilisation du sol alors que l'occupation du sol en ville peut être très hétérogène (maisons, jardins, sols nus, routes, etc.). Le fait de rajouter des classes (dans le cas des classifications supervisées) va dès lors renforcer cet effet hétérogène. De plus, la définition des différentes classes d'occupation du sol des classifications supervisées ne suit pas la logique du gradient urbain-forêt, mais une logique en terme de séparabilité spectrale. Le nombre de classes fort différent entre les classifications non supervisées et les classifications supervisées empêche la comparaison pure et dure de ces deux approches au niveau urbain et périurbain. Ce problème ne sera pas rencontré pour la visualisation de la zone de transition rural – forêt. Le lissage permet sa visualisation aussi bien pour les classifications non supervisées que pour les classifications supervisées, car le nombre de classes est en effet semblable pour cette zone.

La zone de transition rural – forêt est, comme la zone périurbaine, caractérisée par un manque de cohérence spatiale au niveau des valeurs d'indice de proportion de surface anthropisée. Cette zone ne possède également pas d'occupation du sol dominante, étant donné qu'il s'agit d'une zone de transition où l'homme est très présent et modifie constamment le paysage.

Les indices d'équitabilité des proportions surfaciques des classes et de proportion de classe dominante ont montré que les zones périurbaine, rurale et de transition rural-forêt sont des zones où les classes d'occupation sont très variables et mélangées. Ces deux indices sont liés car plus l'équitabilité des classes augmente, plus la proportion de la classe dominante diminue.

Nous pouvons également nous pencher sur une approche multiscalaire avec deux niveaux d'hétérogénéité : un au niveau de la maille, l'autre entre les différentes mailles adjacentes. Ainsi, pour l'indice de classe dominante, les milieux périurbain et rural sont caractérisés par une dominance à petite échelle, alors que les milieux urbain et forestier sont caractérisés par une dominance à petite échelle et à grande échelle. Il en va de même pour les indices d'équitabilité des proportions surfaciques et de proportion de classe dominante.

6.1.3.3. Directions d'extension de la ville

Trois zones semblent constituer les directions préférentielles d'extension de la ville (Figure 26). Ces nouveaux quartiers constituent en effet le développement principal de la ville de Kisangani. La comparaison d'images Google Earth permet d'appréhender plus concrètement l'évolution de ces quartiers dans la décennie écoulée (Figures 27, 28 et 29). A nouveau, nous remarquons donc que la ville s'étend de façon nucléaire ou par combinaison avec des sites dispersés, mais la ville subit aussi une densification de l'habitat existant.

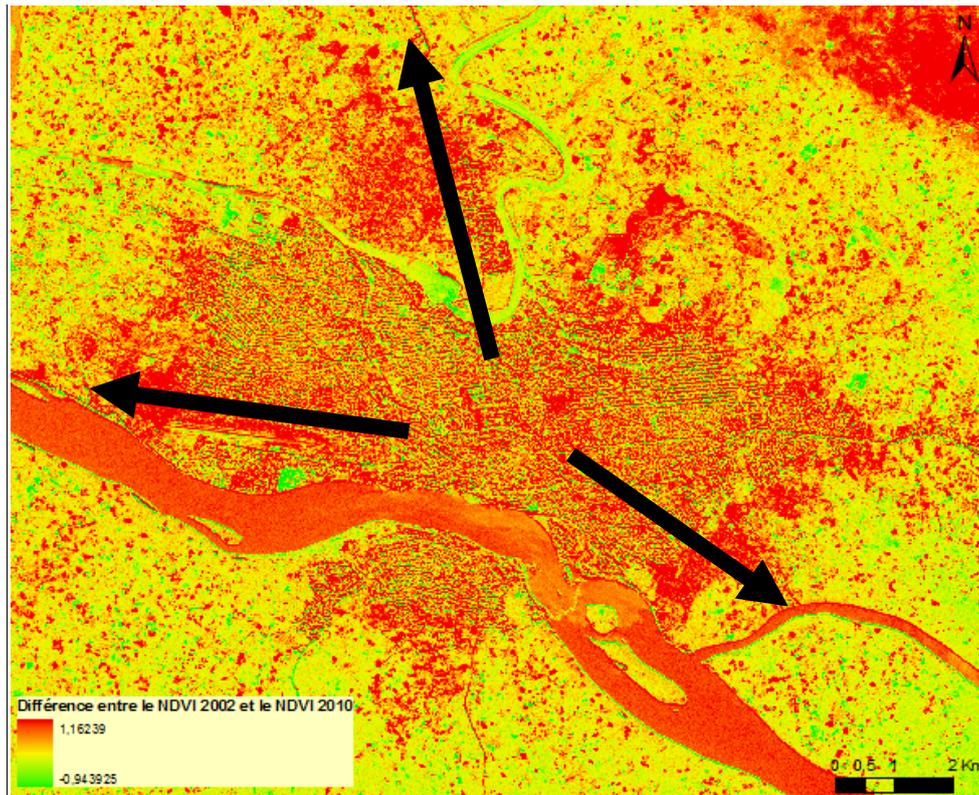


Figure 26 - Directions préférentielles d'extension de la ville de Kisangani entre 2002 et 2010 d'après le NDVI

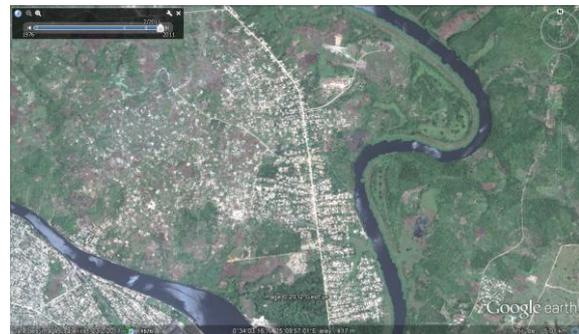
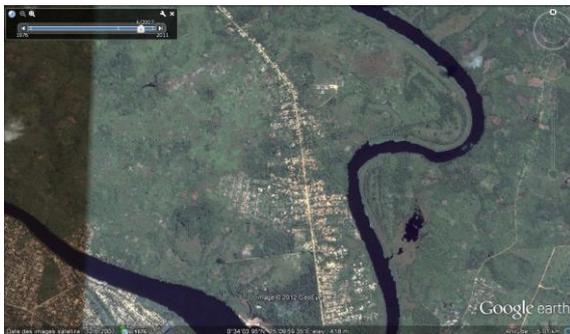


Figure 27 - Evolution du développement du quartier du zoo à Kisangani entre 2007 (gauche) et 2011 (droite), d'après des images Google Earth.

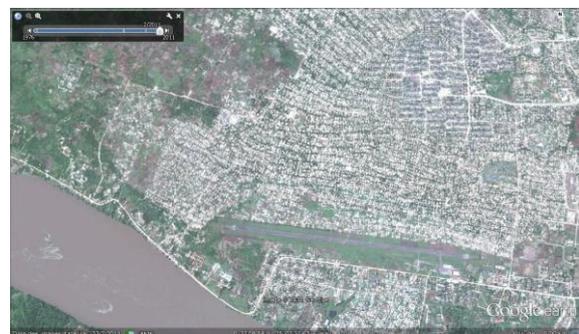
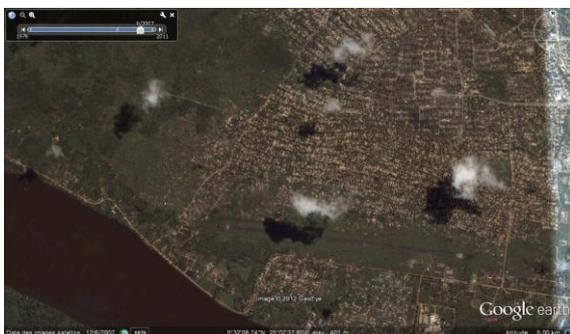


Figure 28 - Evolution du développement du quartier Simi-Simi à Kisangani entre 2007 (gauche) et 2011 (droite), d'après des images Google Earth.

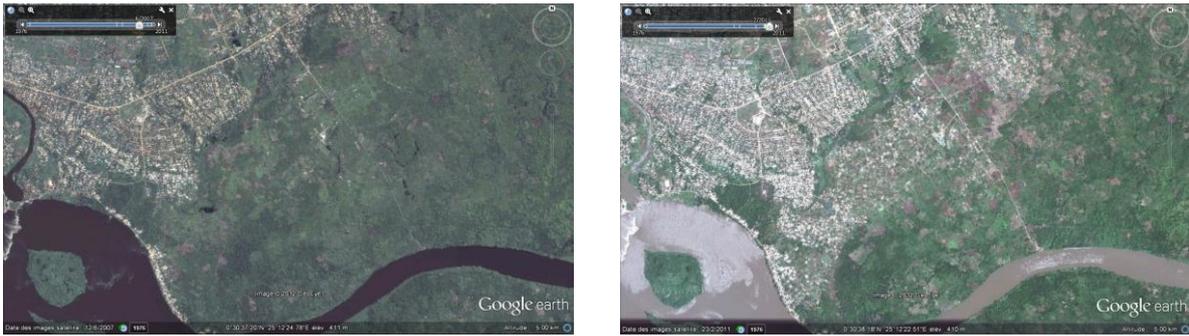


Figure 29 - Evolution du développement du quartier du Centenaire à Kisangani entre 2007 (gauche) et 2011 (droite), d'après des images Google Earth.

Nous avons vu que l'utilisation des images Google Earth pouvait être utile pour mieux appréhender les changements d'occupation du sol. Mais qu'en est-il réellement et quelles sont les potentialités de cet outil ? Venard et al. (2010) ont montré que si les images Google Earth ne peuvent se substituer aux images brutes, elles peuvent avoir un intérêt certain, notamment dans des approches paysagères. D'après ces auteurs, l'extraction des images présente certes des difficultés, mais celles-ci ne sont pas insurmontables. Cependant, cet outil sera plus facilement utilisable lorsque la zone d'étude n'est pas trop étendue, car les chances d'obtenir des images de très haute résolution sont alors plus grandes. De plus, les images Google Earth ne permettent pas les études diachroniques, car les images plus anciennes ne sont pas disponibles. Au niveau méthodologique, Luedeling et Buerkert (2008) ont notamment utilisé les images Google Earth comme source de vérification de résultats.

6.1.3.4. Projets d'extension de la ville de Kisangani

La ville de Kisangani possède plusieurs projets en cours concernant son développement et plus précisément au sujet de la création de nouveaux quartiers. Parmi ceux-ci sont prévues une extension de la cité du Centenaire mais également la création de nouveaux quartiers : Kibibi, Batiambale, Segama, Katanga (Figure 30).

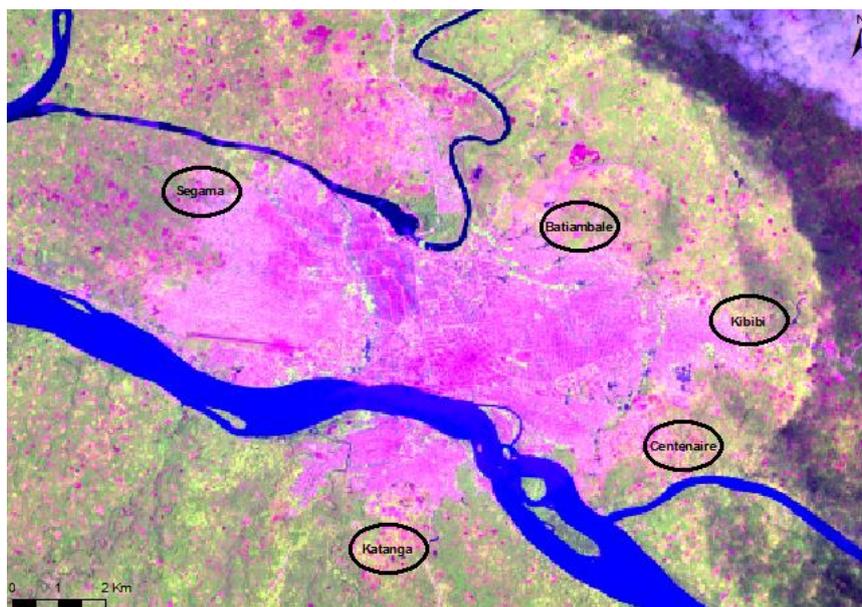


Figure 30 - Localisations approximatives des nouveaux projets de lotissements de la ville de Kisangani, situées sur l'image SPOT 5 de 2010 d'après des communications orales anonymes.

Ces projets en cours peuvent permettre de deviner l'extension de Kisangani dans les années à venir. On peut d'ores et déjà prédire que les zones marécageuses présentes dans la ville de Kisangani seront dans un futur proche recouvertes de sable et loties, à l'instar des zones marécageuses anciennement présentes au-dessus de l'aéroport Simi-Simi (Figure 31). En effet, les habitants ont tendance à combler les marécages présents dans la ville pour construire des maisons, plutôt que d'aller construire en périphérie de la ville.

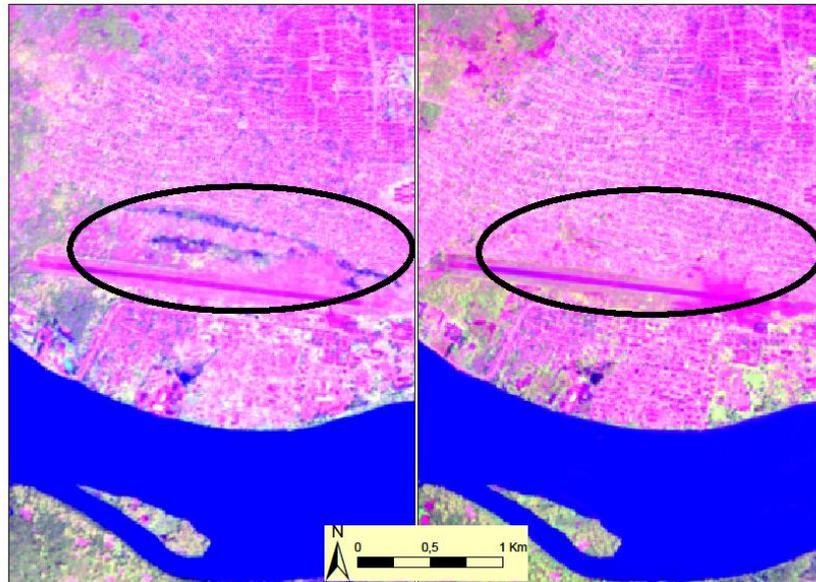


Figure 31 - Zones marécageuses (entourées en noir) au-dessus de l'aéroport Simi-Simi . Ces marécages sont présents en 2002 (gauche) mais plus en 2010 (droite) sur les images SPOT 5 de 2002 et 2010.

6.2. Discussion sur les méthodes utilisées

La comparaison des classifications non supervisées et supervisées a montré la supériorité de la classification supervisée dans la précision et la caractérisation des changements d'occupation du sol.

Les algorithmes de classification utilisés pour la méthode supervisée pourraient toujours être améliorés pour arriver à une classification encore plus précise que ce qui a été fait ici. Les potentialités de Definiens sont très larges, et si l'algorithme parfait n'existe pas, il est possible d'améliorer les résultats en prenant en compte des paramètres supplémentaires.

Concernant la classification de la zone urbaine, nous ne sommes pas parvenus à distinguer les routes par rapport au bâti. En effet, la réflectance est semblable (peu de routes sont asphaltées) et les classifications, que ce soit non supervisées ou supervisées, n'ont pas réussi à isoler cette classe d'occupation du sol. Cependant, cela peut s'expliquer simplement : d'après les mesures de terrain, les routes à l'intérieur de la ville de Kisangani sont larges de 8 m en moyenne. Sachant que la taille d'un pixel est de 10 x 10 m, ces routes sont donc difficilement identifiables car perdues dans des pixels mixtes.

La méthodologie sur le terrain nous a semblé relativement pertinente, puisqu'elle a bien répondu à l'objectif de caractériser les différents paysages et les différentes occupations du sol de la ville de Kisangani et ses alentours. Certains types d'occupation du sol (les carrières de sable par exemple) n'ont pas pu être mis en évidence sur la carte finale, car leurs surfaces étaient trop réduites.

Les images SPOT 5 semblent bien se prêter à l'analyse qui était demandée, à savoir la distinction du gradient urbain-forêt. Dans le cas d'études se concentrant sur le milieu urbain et périurbain, nous recommandons l'usage d'images satellitaires de résolution plus fine, qui permettront de mettre mieux en évidence les zones périurbaines et les directions d'expansion de la ville, pour autant que de telles images soient disponibles. Cependant, leur principal inconvénient reste leur prix.

Pour de futures études en milieu tropical sans données terrain disponibles, nous conseillerons de séparer premièrement les différentes zones en grandes zones de type urbain, rural et forestier, cela permettra notamment de séparer les polygones de brûlis – sol nu des polygones de bâti. Cette distinction n'a pas été effectuée pour les classifications non supervisées de ce travail car le but était de comparer la classification non supervisée « pure » à la classification supervisée qui utilise toutes les données terrain disponibles. Une méthode de classification hybride serait dans ce cas un bon compromis à faire.

L'intervalle de temps de dix ans entre les deux images semble approprié puisqu'il a permis de caractériser l'évolution de la ville et le recul de la forêt. Toutefois, si cet intervalle de temps convient pour une ville comme Kisangani, il sera peut-être insuffisant dans le cas de villes moins peuplées et se développant moins vite. Cet intervalle est donc à adapter en fonction des villes étudiées, sauf dans le cas d'études de comparaisons de dynamiques de différentes villes.

Les images SPOT 5, bien qu'ayant convenu dans une étude telle que celle-ci, possèdent un inconvénient majeur, à savoir le nombre de canaux. Si SPOT 5 ne comprend que quatre canaux, plusieurs autres capteurs en possèdent un nombre plus élevé. Ces capteurs pourraient dès lors mieux correspondre à la caractérisation des différentes occupations du sol en milieu rural par exemple. Citons en exemple le capteur Worldview2 qui possède huit canaux et pour lequel Zhou et al. (2012) ont montré le potentiel en classification d'occupation du sol.

Les indices de structure spatiale utilisés semblent avoir été bien choisis car ils ont permis de segmenter le gradient urbain-rural et ont apporté chacun une information complémentaire à l'analyse. Cependant, il ne s'agissait ici que d'indices de composition spatiale. Une perspective serait peut-être de calculer des indices de configuration spatiale, pour autant qu'une approche « tache » puisse être mise en place.

7. Conclusion

Ce travail de fin d'études a montré l'intérêt de la télédétection satellitaire et plus précisément des images SPOT 5 dans l'étude de la dynamique d'occupation du sol de la ville de Kisangani entre 2002 et 2010. Ces images ont en effet permis d'une part de caractériser l'urbanisation et la déforestation de Kisangani et sa périphérie entre ces deux années et d'autre part de segmenter le gradient urbain-périurbain-rural-forêt associé à cette ville.

Nous avons également montré qu'il existe une relation entre la croissance démographique de Kisangani et les changements d'occupation du sol qui s'opèrent dans la ville et sa périphérie. La croissance démographique de la ville de Kisangani provoque non seulement une augmentation de la surface couverte par la ville mais également un recul de la surface couverte par la forêt. De plus, il a été calculé que la surface d'impact de la ville sur son milieu naturel augmente proportionnellement à la surface totale de la ville.

Les indices de structure spatiale choisis ont bien répondu aux attentes et ont permis la segmentation et la caractérisation du gradient urbain-forêt en apportant chacun une information complémentaire. Des valeurs seuils ont pu être identifiées pour certains milieux (urbain, forêt), et des caractéristiques ont été attribuées à chacun des milieux. Les milieux périurbain, rural et de transition rural-forêt ont été identifiés comme étant des milieux à occupation du sol variable, où les mouvements sont encore très fréquents. On n'y retrouve donc aucune occupation du sol définitive, au contraire des milieux urbain et forestier qui possèdent une occupation du sol dominante fixe (bâti et forêt, respectivement).

Les classifications non supervisées, bien que moins précises que les classifications supervisées et produisant des estimations moins fiables de dynamique d'occupation du sol, ont malgré tout apporté de bons résultats dans la segmentation du gradient urbain-forêt. Le Tableau 41 propose une synthèse des différents aspects étudiés avec leurs résultats en classifications non supervisées et supervisées. L'utilisation d'une classification hybride couplée aux potentialités que peut offrir Google Earth notamment en matière de vérification de classification constitue une perspective intéressante pour de futures études.

Tableau 41 – Synthèse comparative des méthodes non supervisée et supervisée vis-à-vis des différents aspects étudiés dans ce travail. Tous les aspects repris dans ce tableau concernent la ville de Kisangani et sa périphérie pour les années 2002 et 2010.

<i>Aspect étudié</i>	<i>Classifications non supervisées</i>	<i>Classifications supervisées</i>
Nombre de classes d'occupation du sol différenciées	6	13
Précisions des classifications (coefficient Kappa)	Acceptable (2002) / Modérée (2010)	Modérée (2002) / Bonne (2010)
Quantification de l'extension urbaine	Surestimée	Bonne estimation
Quantification du recul de la forêt	Surestimée	Bonne estimation
Indice d'empreinte écologique	Sous-estimée	Bonne estimation
Stabilité du paysage	Bonne estimation	Bonne estimation
Mise en évidence de la zone urbaine	Aisée	Aisée
Mise en évidence de la zone périurbaine (indice de proportion de surface bâtie)	Aisée	Difficile
Mise en évidence de la zone rurale	Aisée	Aisée
Mise en évidence du front de déforestation (indice de proportion de surface anthropisée)	Aisée	Aisée
Mise en évidence de la zone forestière	Aisée	Aisée

8. Références bibliographiques

- ANDERSON, J. R., HARDY, E. E., ROACH, J. T. & WITMER, R. E. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *USGS Professional Paper*, 964, 28.
- ANDRÉ, M. 2012. Communication personnelle.
- ASTRIUM. 2012. *Niveaux de prétraitement et précision de localisation* [Online]. Available: <http://www.astrium-geo.com/fr/911-niveaux-de-pretraitement-et-precision-de-localisation> [Accessed 04/06/2012].
- BAMBA, I. 2010. *Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en République Démocratique du Congo*. Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences.
- BENCHEKROUN, H. Urbanisme et télédétection spatiale dans les pays en développement. In: GÉO OBSERVATEUR, ed. *La télédétection spatiale pour l'environnement et le développement* (Marisy 95), 1995 Ifrane, Maroc. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), 155-170.
- BENSON, B. J. & MACKENZIE, M. D. 1995. Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters. *Landscape Ecology*, 10, 113-120.
- BLASCHKE, T. & STROBL, J. 2001. What's wrong with pixels ? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *GeoBIT/GIS*, 6, 12-17.
- BOCK, M., XOFIS, P., MITCHLEY, J., ROSSNER, G. & WISSEN, M. 2005. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales - Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. *Journal for Nature Conservation*, 13, 75-89.
- BOGAERT, J., FARINA, A. & CEULEMANS, R. 2005. Entropy increase of fragmented habitats : a sign of human impact ? *Ecological Indicators*, 5, 207-212.
- BOGAERT, J. & MAHAMANE, A. 2005. Ecologie du paysage : cibler la configuration et l'échelle spatiale. *Annales des Sciences Agronomiques du Bénin*, 7, 39-68.
- BOLA, M. 2002. *Epiphytes vasculaires et phorophytes de l'écosystème urbain de Kisangani*. Université de Kisangani.
- BOLOORANI, A. D., ERASMI, S. & KAPPAS, M. Urban land cover mapping using object/pixel-based data fusion and ikonos images.
- BONN, F. & ROCHON, G. (eds.) 1992. *Précis de télédétection, volume 1 : principes et méthodes*, Louiseville: Presses de l'université du Québec.
- BUREL, F. & BAUDRY, J. 1999. *Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications*, Paris, Editions Tec & Doc.
- CABINET DU MAIRE DE LA VILLE DE KISANGANI 2007. Rapport annuel exercice 2007.
- CABINET DU MAIRE DE LA VILLE DE KISANGANI 2008. Plan de développement urbain de la ville de Kisangani "PDU Kisangani", rapport de synthèse.
- CABINET DU MAIRE DE LA VILLE DE KISANGANI 2009. Processus de revue et de restitution communautaire du PDU Kisangani : Plan-Programme d'Action Prioritaire pour le Développement Urbain de la Ville de Kisangani à l'horizon 2012.
- CLAPHAM, W. B. 2003. Continuum-based classification of remotely sensed imagery to describe urban sprawl on a watershed scale. *Remote Sensing of Environment*, 86, 322-340.
- CLEVE, C., KELLY, M., KEARNS, F. & MORITZ, M. 2008. Classification of the wildland-urban interface : A comparison of pixel- and object-based classifications using high-resolution aerial photography. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32, 317-326.

- CONGALTON, R. G. & GREEN, K. 1999. *Assessing the accuracy of remotely sensed data : principles and practices*, Lewis Publishers.
- DÉCAMPS, H. & DÉCAMPS, O. 2007. Organisation de l'espace et processus écologiques. *Economie rurale*, 297-298, 55-70.
- DIBI N'DA, H., KOUAKOU K'GUESSAN, E., EGNANKOU WADJA, M. & AFFIAN, K. 2008. Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le parc national de la Marahoué (Côte d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 8, 17-34.
- DIRECTION PROVINCIALE DE L'INS/KISANGANI 2010. Annuaire statistique.
- DIVISION GÉOGRAPHIQUE DE LA DIRECTION DES ARCHIVES DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES 2004. République Démocratique du Congo.
- ENDERLE, D. I. M. & WEIH, R. C. 2005. Integrating Supervised and Unsupervised Classification. Methods to Develop a More Accurate Land Cover Classification. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 59.
- FAO 1984. Données agro-climatologiques, Afrique. Rome.
- FAO 2010. Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. Rome.
- FOODY, G. M. 2000. Estimation of sub-pixel land cover composition in the presence of untrained classes. *Computers & Geosciences*, 26, 469-478.
- FORMAN, R. T. T. 1997. *Land mosaics : the ecology of landscapes and regions*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- FORMAN, R. T. T. 2010. *Urban regions : ecology and planning beyond the city*, New York, Cambridge University Press.
- FORTIN, M. J. 1999. The effects of quadrat size and data measurement on the detection of boundaries. *Journal of Vegetation Science*, 10, 43-50.
- GENDREAU, F. 1996. *Démographies africaines*, Paris, ESTEM.
- GIRARD, M. C. & GIRARD, C. M. 1989. *Télédétection appliquée : zones tempérées et intertropicales*, Paris, Masson.
- GIRARD, M. C. & GIRARD, C. M. 2010. *Traitement des données de télédétection : environnement et ressources naturelles*, Paris, Dunod.
- GONG, P. & HOWARTH, P. J. 1992. Land-use classification of SPOT HRV data using a cover-frequency method. *International Journal of Remote Sensing*, 13.
- GRIMM, N. B., FAETH, S. H., GOLUBIEWSKI, N. E., REDMAN, C. L., WU, J., BAI, X. & BRIGGS, J. M. 2008. Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 319, 756-760.
- GUINDON, B., ZHANG, Y. & DILLABAUGH, C. 2004. Landsat urban mapping based on a combined spectral-spatial methodology. *Remote Sensing of Environment*, 92, 218-232.
- HUNG, M.-C. & RIDD, M. K. 2002. A subpixel classifier for urban land-cover mapping based on a maximum-likelihood approach and expert system rules. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68, 1173-1180.
- IORGULESCU, I. & SCHLAEPFER, R. 2002. Paysage en tant qu'écosystème : définition, types, caractéristiques, fonctionnement et fonctions. *Fiche d'enseignement 4.1, Laboratoire de Gestion des Écosystèmes, Ecole Polytechnique de Lausanne*, 24.
- JACQUIN, A., MISAKOVA, L. & GAY, M. 2008. A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. *Landscape and urban planning*, 84, 152-165.
- JENSEN, J. R. 2005. *Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective (Third Edition)*, United States of America, Pearson Prentice Hall.
- JOURNAL OFFICIEL 11 décembre 1980.
- KAHINDO MUHONGYA, J.-M. 2011. *Potentiel en Produits Forestiers Autres que le Bois d'oeuvre dans les formations forestières de la région de Kisangani. Cas des rotins Eremospatha haullevilleana De Wild. et Laccosperma secundiflorum (P. Beauv.)*

- Kuintze de la Réserve Forestière de Yoko (Province Orientale, RD Congo)*. Université de Kisangani, Faculté des sciences.
- KUMAR, A. & SAGGAR, S. 2008. Class based ratioing effect on sub-pixel single land cover. Automatic mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII.
- LANDIS, J. T. & KOCH, G. G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- LAROUSSE ENCYCLOPÉDIE. 2009. *Téledétection* [Online]. Available: <http://www.larousse.fr/> [Accessed 26/06/2012].
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. & CHIPMAN, J. W. 2004. *Remote sensing and image interpretation : Fifth Edition*, United States of America, John Wiley & Sons.
- LUBINI, A. 1982. *Végétation messicole et postculturale des Sous-Régions de Kisangani et de la Tshopo (Haut-Zaïre)*. Université de Kisangani.
- LUEDELING, E. & BUERKERT, A. 2008. Typology of oases in northern Oman based on Landsat and SRTM imagery and geological survey data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1181-1195.
- MILNE, B. T. 1991. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: TURNER, M. G. & GARDNER R.H. (eds.) *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. New York: Springer.
- MINISTÈRES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ÉLEVAGE ; DU PLAN ; DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE L'ENVIRONNEMENT ; CONSERVATION DE LA NATURE / FORÊTS ET PÊCHE 1998. Monographie de la Province Orientale.
- MIRKIN, B. 2011. Choosing the number of clusters. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Data Mining and Knowledge Discovery*, 1, 252-260.
- NOON, B. R. & DALE, V. H. 2002. Broad-Scale Ecological Science and Its Application. In: GUTZWILLER, K. J. (ed.) *Applying Landscape Ecology in Biological Conservation*. Springer.
- PIELOU, E. C. 1966. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession. *Journal of Theoretical Biology*, 10, 370-383.
- PONTIUS, R. G. 2000. Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1011-1016.
- RAY, S. & TURI, R. H. 1999. Determination of Number of Clusters in K-Means Clustering and Application in Colour Image Segmentation. Victoria, Australia: School of Computer Science and Software Engineering, Monash University.
- RIMBERT, S. 1992. Villes et Télédétection : un Etat de la Question. *Sistema Terra*, 1, 9-11.
- ROBIN, M. 1995. *La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques*, Paris, Nathan.
- ROBIN, M., RENOUX, E., DEBAINE, F., RAKOTONAVALONA HOBIALISOA, D. & LAMBERTS, C. 2010. Cartographie de la mangrove du delta de la Mahajamba (Nord-Ouest de Madagascar) par classification d'une image Spot selon une approche orientée objet. *Revue Télédétection*, 9, 195-208.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., DEERING, D. W. & SCHELL, J. A. 1974. Monitoring the vernal advancement and the retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Remote Sensing Center, Texas A&M University, College Station.
- RUESCAS, A. B., SOBRINO, J. A., JULIEN, Y., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SÒRIA, G., HIDALGO, V., ATITAR, M., FRANCH, B., CUENCA, J. & MATTAR, C. 2010. Mapping sub-pixel burnt percentage using AVHRR data. Application to the Alcalaten area in Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 5315-5330.

- SCHIEWE, J., TUFTE, L. & EHLERS, M. 2001. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *GeoBIT/GIS*, 6, 34-39.
- SCHLAEPFER, R. 2002. Analyse de la dynamique du paysage. Lausanne: Laboratoire de gestion des écosystèmes (GECOS), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- SOYER, J. & WILMET, J. 1983. Etude de l'environnement de Lubumbashi de 1973 à 1981 à l'aide de la télédétection par satellite : croissance urbaine et déboisement. *Geo-Eco-Trop*, 7, 67-81.
- SPARFEL, L., GOURMELON, F. & LE BERRE, I. 2008. Approche orientée-objet de l'occupation des sols en zone côtière. *Revue Télédétection*, 8, 237-256.
- STEINBERG, J. 2000. *Cartographie : Télédétection, systèmes d'information géographique*, Paris, Sedes.
- SWAIN, P. H. & DAVIS, S. M. 1978. *Remote Sensing : The Quantitative Approach*, United States of America, McGraw-Hill.
- TIBSHIRANI, R., WALTHER, G. & HASTIE, T. 2000. Estimating the number of clusters in a dataset via the Gap statistic. *Technical Report N° 208*. Stanford, California: Division of Biostatistics, Stanford University.
- TURNER, B. L. & MEYER, W. B. 1994. Global land use and land cover change : an overview. In: MEYER, W. B. & TURNER, B. L. (eds.) *Changes in Land Use and Land Cover : a global perspective*. Cambridge: University of Cambridge.
- TURNER, M. G. 1989. Landscape Ecology : the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, 171-197.
- TURNER, M. G., O'NEILL, R. V., GARDNER, R. H. & MILNE, B. T. 1989. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 3, 153-162.
- UNITED NATIONS POPULATION DIVISION 2007. World Urbanization Prospects : The 2007 Revision.
- VAN DE VOORDE, T., DE GENST, W. & CANTERS, F. 2007. Improving Pixel-based VHR Land-cover Classifications of Urban Areas with Post-classification Techniques. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 73.
- VENARD, C., DELAITRE, E., CALLOT, Y., OUESSAR, M. & OUERCHEFANI, D. 2010. Exploitation d'images satellitaires à très haute résolution spatiale fournies par Google Earth ©. Exemple d'application à l'étude de l'ensablement d'oliveraies en Tunisie. *Revue Télédétection*, 9, 59-71.
- VITOUSEK, P. M. 1994. Beyond global warming : ecology and global change. *Ecology*, 75, 1861-1876.
- WEIH, R. C. & RIGGAN, N. D. 2010. Object-based classification vs. pixel-based classification : comparative importance of multi-resolution imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII.
- WHITESIDE, T. G., BOGGS, G. S. & MAIER, S. W. 2011. Comparing object-based and pixel-based classifications for mapping savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 884-893.
- WIENS, J. A. 1989. Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology*, 3, 385-397.
- WILMET, J. 1996. Chapitre 13 : utilisation du sol urbain et périurbain. In: BONN, F. (ed.) *Précis de télédétection, volume 2 : applications thématiques*. Québec: Presses de l'université du Québec.
- WILMET, J. & SOYER, J. 1982. Lubumbashi et le Sud-Est du Haut-Shaba : Interprétation de données LANDSAT. *Société Belge d'Etudes Géographiques*, 1, 87-100.
- WOLFF, E. 2005. Rapport de mission cartographique à Kisantu (R.D. Congo) du 15 au 30 Septembre 2005. Bruxelles, Belgique: SLCD.

- XINLIANG, L., SHUHE, Z., YIKANG, R. & WEI, T. 2007. An object-based classification approach for high-spatial resolution imagery. *Proceedings of the SPIE*, 6752.
- YUAN, F., SAWAYA, K. E., LOEFFELHOLZ, B. C. & BAUER, M. E. 2005. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98, 317-328.
- ZEMBA, A. A. 2010. Analysis of Urban Surface Biophysical Descriptors and Land Surface Temperature Variations in Jimeta City, Nigeria. *Global Journal of Human Social Science*, 10, 19-25.
- ZHA, Y., GAO, Y. & NI, S. 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 583 - 594.
- ZHANG, J. & FOODY, G. M. 2001. Fully-fuzzy supervised classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery: statistical and artificial neural network approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 615-628.
- ZHOU, X., JANCSÓ, T., CHEN, C. & VERÖNÉ, M. W. 2012. Urban Land Cover Mapping Based on Object Oriented Classification Using WorldView 2 Satellite Remote Sensing Images *International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint*.

9. Annexes

9.1. Classification de Köppen

1ère lettre : Principaux types de climat		
Code	Type	Description
A	Climat tropical	Température moyenne de chaque mois de l'année > 18°C
		Saison sèche peu importante
		Fortes précipitations annuelles (supérieures à l'évaporation annuelle)
B	Climat sec	Evaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles
		Cours d'eau permanents rares
C	Climat tempéré chaud	Températures moyennes des 3 mois les plus froids comprises entre -3°C et 18°C
		Température moyenne du mois le plus chaud > 10°C
		Les saisons été et hiver sont bien définies
D	Climat tempéré froid	Température moyenne du mois le plus froid < -3°C
		Température moyenne du mois le plus chaud > 10°C
		Les saisons été et hiver sont bien définies
E	Climat polaire	Température moyenne du mois le plus chaud < 10°C La saison été est très peu marquée

2ème lettre : Pluviométrie		
S	Climat de steppe	B
	Précipitations annuelles comprises entre 250-350 et 760 mm	
W	Climat désertique	B
	Précipitations annuelles < 250 mm	
f	Climat humide	A - C - D
	Précipitations tous les mois de l'année, ou presque	
	Pas de saison sèche, ou peu marquée	
w	Saison sèche en hiver	A - C - D
s	Saison sèche en été	A - C - D
m	Climat de mousson	A
	Précipitations annuelles > 1500 mm	
	Précipitations du mois le plus sec < 60 mm	
T	Température moyenne du mois le plus chaud comprise entre 0 et 10°C	E
F	Température moyenne du mois le plus chaud < 0°C	E

Annexes

3ème lettre : Température		
a (été chaud)	Température moyenne du mois le plus chaud > 22°C	C - D
b (été tempéré)	Température moyenne du mois le plus chaud < 22°C	C - D
	Températures moyennes des 4 mois les plus chauds > 18°C	
c (été court et frais)	Température moyenne du mois le plus chaud < 22°C	C - D
	Températures moyennes mensuelles > 10°C pour moins de 4 mois	
	Température moyenne du mois le plus froid > - 38°C	
d (hiver très froid)	Température moyenne du mois le plus froid < - 38°C	D
h (sec et chaud)	Température moyenne annuelle > 18°C	B
k (sec et froid)	Température moyenne annuelle < 18°C	B

9.2. Fiche de terrain

FICHE DE TERRAIN		Date :		
Urbain - Rural - Forêt		N° :		
N_WP	X	Y	Occupation_sol	N_Photos

9.3. Photos des différentes occupations du sol prises sur le terrain

Bambous



Bâti continu



Bâti discontinu



Brûlis – Sol nu



Etang – Zone marécageuse



Forêt primaire



Jeune jachère - Champ



Pâturage



Plantation



Végétation flottante



Vieille jachère



Zone de végétation mixte



9.4. Tableaux statistiques des classifications

Classification non supervisée 2000

Principal Component Analysis: Brightness; Green; Red; MIR; NDBI; NDVI; Green_1;

Eigenanalysis of the Correlation Matrix

Eigenvalue	4,9900	2,9151	1,4435	0,8566	0,4028	0,1555	0,1244	0,0629
Proportion	0,454	0,265	0,131	0,078	0,037	0,014	0,011	0,006
Cumulative	0,454	0,719	0,850	0,928	0,964	0,979	0,990	0,996

Eigenvalue	0,0416	0,0075	0,0000
Proportion	0,004	0,001	0,000
Cumulative	0,999	1,000	1,000

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Brightness	0,392	-0,223	-0,228	0,105	0,025	0,027	0,114	-0,052
Green	0,424	-0,160	0,004	0,126	-0,010	0,240	-0,071	0,138
Red	0,303	-0,263	-0,438	0,059	0,104	-0,457	0,333	-0,173
MIR	0,353	0,015	0,443	0,255	-0,005	-0,340	0,230	-0,089
NDBI	0,401	-0,189	-0,138	0,069	-0,069	0,568	-0,257	0,087
NDVI	-0,277	-0,099	-0,608	-0,192	0,051	0,100	0,117	-0,156
Green_1	0,163	0,443	-0,269	0,178	0,540	-0,271	-0,501	0,222
Red_1	0,103	0,424	-0,287	0,229	-0,792	-0,156	-0,144	-0,042
MIR_1	0,312	0,294	0,102	-0,492	0,073	0,073	-0,159	-0,722
NDBI_1	-0,017	0,516	-0,074	0,378	0,228	0,425	0,572	-0,119
NDVI_1	0,280	0,283	-0,034	-0,627	-0,069	-0,031	0,339	0,567

Variable	PC9	PC10	PC11
Brightness	-0,221	0,049	-0,816
Green	-0,053	0,773	0,312
Red	0,450	-0,099	0,265
MIR	-0,572	-0,229	0,242
NDBI	0,036	-0,573	0,222
NDVI	-0,630	0,033	0,243
Green_1	-0,085	-0,026	-0,000
Red_1	-0,009	0,028	0,000
MIR_1	0,038	0,065	-0,000
NDBI_1	0,104	0,007	0,000
NDVI_1	-0,035	-0,056	0,000

K-means Cluster Analysis: Brightness; Green; Red; MIR; NDBI; NDVI; Green_1; Red

Standardized Variables
Final Partition
Number of clusters: 20

	Number of observations	Within cluster sum of squares	Average distance from centroid	Maximum distance from centroid
Cluster1	1747	6828,611	1,896	5,036
Cluster2	406	5450,129	3,477	7,262
Cluster3	2195	7057,011	1,724	4,469
Cluster4	1007	6729,605	2,432	9,050
Cluster5	1386	5485,933	1,896	8,891
Cluster6	4193	5701,639	1,094	3,693
Cluster7	3802	6008,892	1,201	3,465
Cluster8	3711	7108,160	1,331	3,224
Cluster9	2553	6382,752	1,421	5,388

Annexes

Cluster10	6564	4613,095	0,771	4,925		
Cluster11	906	5064,344	2,198	7,326		
Cluster12	836	11968,749	3,554	11,293		
Cluster13	3347	5956,525	1,254	3,608		
Cluster14	5379	5340,296	0,953	2,403		
Cluster15	8096	6890,232	0,865	3,379		
Cluster16	1448	7454,794	1,974	18,324		
Cluster17	2103	6788,913	1,714	4,438		
Cluster18	2335	6777,168	1,622	4,604		
Cluster19	6465	9252,898	0,956	7,070		
Cluster20	3911	5601,007	1,125	3,695		
Cluster Centroids						
Variable	Cluster1	Cluster2	Cluster3	Cluster4	Cluster5	Cluster6
Brightness	0,5985	-3,5066	0,9530	0,1864	0,9138	0,4364
Green	1,2244	-2,5255	1,4339	0,6636	1,7098	0,2429
Red	-0,2267	-2,8138	0,3127	-0,4153	-0,2745	0,5914
MIR	1,7549	0,0022	1,7976	0,9339	2,4500	0,1196
NDBI	1,0416	-3,5279	1,1729	0,6424	1,4623	0,2485
NDVI	-2,0180	-2,2330	-1,8481	-1,2923	-2,6081	0,1616
Green_1	0,8739	-2,1274	-0,7705	2,9995	-1,6045	-0,6343
Red_1	0,3505	-3,2143	-0,7017	1,3902	-0,3601	-0,9401
MIR_1	1,7440	-1,1845	0,7523	2,8283	-0,6446	-0,4052
NDBI_1	0,4767	-2,3671	-0,7532	2,0050	-0,1005	-0,9340
NDVI_1	0,9952	-1,7432	0,5997	2,3754	-1,4005	-0,4997
Variable	Cluster7	Cluster8	Cluster9	Cluster10	Cluster11	Cluster12
Brightness	0,9531	1,0492	-0,7785	-1,0217	0,3386	-1,5792
Green	0,6618	0,9892	-0,8050	-1,0157	1,1323	-1,2455
Red	1,2003	1,0152	-0,7025	-0,9399	-0,5085	-1,3881
MIR	-0,0172	0,6324	-0,6555	-0,7278	2,4303	1,1978
NDBI	0,7398	0,8654	-0,7168	-0,9653	0,4060	-2,0088
NDVI	0,3802	-0,2775	0,4960	0,5085	-2,5553	-1,5410
Green_1	0,6976	0,1378	0,8792	-0,8004	0,7966	3,1911
Red_1	0,1754	-0,3034	1,0389	-0,6740	0,5795	2,8715
MIR_1	-0,0689	0,5675	-0,0805	-0,6471	-0,5216	1,2558
NDBI_1	-0,0605	-0,5684	1,4604	-0,3550	0,9411	4,7048
NDVI_1	-0,1654	0,7223	-0,0837	-0,4966	-1,1247	1,2472
Variable	Cluster13	Cluster14	Cluster15	Cluster16	Cluster17	Cluster18
Brightness	1,3062	0,3571	-0,5796	0,8308	0,6845	1,0718
Green	0,9755	0,0066	-0,6608	1,1738	0,6710	1,3034
Red	1,5491	0,7254	-0,4869	0,3400	0,6465	0,7223
MIR	0,1556	-0,4832	-0,6918	1,1228	0,2883	1,1574
NDBI	0,9608	0,2245	-0,4790	1,0982	0,7115	1,1451
NDVI	0,4080	0,6751	0,5617	-1,2135	-0,2079	-1,0649
Green_1	-0,3801	-0,2966	-0,3458	1,0820	1,4330	0,0837
Red_1	-1,0489	-0,0005	-0,0159	1,6124	1,0861	0,1810
MIR_1	-0,4226	-0,5818	-0,5064	2,7519	1,0037	1,8136
NDBI_1	-0,8933	-0,4934	-0,0510	0,3383	0,5617	-0,4628
NDVI_1	-0,4305	-0,5150	-0,3708	2,8515	1,2183	2,1124
Grand						
Variable	Cluster19	Cluster20	centroid			
Brightness	-1,4893	0,0191	-0,0000			
Green	-1,3919	-0,2231	0,0000			
Red	-1,4436	0,2744	0,0000			
MIR	-0,9286	-0,5463	-0,0000			
NDBI	-1,4683	-0,0095	0,0000			
NDVI	0,6319	0,6041	0,0000			
Green_1	-0,2732	0,5127	-0,0000			
Red_1	-0,1452	1,0531	0,0000			
MIR_1	-0,4628	-0,2905	-0,0000			
NDBI_1	0,5696	0,4493	-0,0000			
NDVI_1	-0,4279	-0,2427	-0,0000			
Distances Between Cluster Centroids						

Annexes

	Cluster1	Cluster2	Cluster3	Cluster4	Cluster5	Cluster6	Cluster7
Cluster1	0,0000	10,3674	2,6405	3,5910	4,4464	4,7432	4,0553
Cluster2	10,3674	0,0000	9,5293	12,1808	9,4301	8,1501	9,9864
Cluster3	2,6405	9,5293	0,0000	6,0586	2,9495	3,4826	3,8072
Cluster4	3,5910	12,1808	6,0586	0,0000	7,8330	7,0838	5,7271
Cluster5	4,4464	9,4301	2,9495	7,8330	0,0000	4,5328	5,1243
Cluster6	4,7432	8,1501	3,4826	7,0838	4,5328	0,0000	2,2644
Cluster7	4,0553	9,9864	3,8072	5,7271	5,1243	2,2644	0,0000
Cluster8	3,1051	9,8631	2,3847	5,4398	4,5306	2,3502	1,7363
Cluster9	5,2343	8,7404	5,9947	5,4924	6,7833	4,2557	3,7963
Cluster10	6,1003	6,3786	5,5939	7,5987	6,2409	2,9764	4,2685
Cluster11	3,3474	9,4691	3,7676	5,8528	3,1084	4,7992	4,5320
Cluster12	7,2068	11,9095	9,2728	5,3041	9,9044	9,2802	8,3317
Cluster13	4,9296	9,6860	3,5255	7,2815	4,7142	1,6920	1,9934
Cluster14	5,0499	8,7007	4,3401	6,8439	5,2829	1,3893	1,7810
Cluster15	5,3660	7,4939	5,0772	6,7632	5,8623	2,4705	3,2059
Cluster16	2,7466	11,9860	4,4715	2,8692	6,7399	6,0813	4,9412
Cluster17	2,8410	10,7340	4,0216	3,5030	5,8574	4,0225	2,3752
Cluster18	2,2794	10,7963	2,4962	4,4715	5,1955	4,3211	3,6820
Cluster19	6,4554	6,6543	6,5139	7,3167	7,1070	4,2215	4,9608
Cluster20	4,7174	9,1740	4,9491	5,7273	5,8777	2,9119	2,1269
	Cluster8	Cluster9	Cluster10	Cluster11	Cluster12	Cluster13	
Cluster1	3,1051	5,2343	6,1003	3,3474	7,2068	4,9296	
Cluster2	9,8631	8,7404	6,3786	9,4691	11,9095	9,6860	
Cluster3	2,3847	5,9947	5,5939	3,7676	9,2728	3,5255	
Cluster4	5,4398	5,4924	7,5987	5,8528	5,3041	7,2815	
Cluster5	4,5306	6,7833	6,2409	3,1084	9,9044	4,7142	
Cluster6	2,3502	4,2557	2,9764	4,7992	9,2802	1,6920	
Cluster7	1,7363	3,7963	4,2685	4,5320	8,3317	1,9934	
Cluster8	0,0000	4,6699	4,6877	4,4236	8,7071	2,0727	
Cluster9	4,6699	0,0000	3,1256	5,1862	5,7746	5,2713	
Cluster10	4,6877	3,1256	0,0000	5,8397	8,3862	4,5542	
Cluster11	4,4236	5,1862	5,8397	0,0000	7,2403	5,2298	
Cluster12	8,7071	5,7746	8,3862	7,2403	0,0000	10,0340	
Cluster13	2,0727	5,2713	4,5542	5,2298	10,0340	0,0000	
Cluster14	2,6887	3,4135	2,8203	5,0706	8,7421	2,1995	
Cluster15	3,8509	2,3087	1,2390	5,2456	7,8532	3,8706	
Cluster16	4,0494	5,9362	7,2475	5,7437	7,3705	6,0743	
Cluster17	2,4164	3,6814	5,2176	4,5255	6,8154	4,0581	
Cluster18	2,2120	5,7067	6,1151	5,0039	8,5330	4,1753	
Cluster19	5,5446	2,4177	1,5406	6,1512	7,3164	5,6983	
Cluster20	3,2704	1,9181	3,1125	4,7900	7,1558	3,6416	
	Cluster14	Cluster15	Cluster16	Cluster17	Cluster18	Cluster19	
Cluster1	5,0499	5,3660	2,7466	2,8410	2,2794	6,4554	
Cluster2	8,7007	7,4939	11,9860	10,7340	10,7963	6,6543	
Cluster3	4,3401	5,0772	4,4715	4,0216	2,4962	6,5139	
Cluster4	6,8439	6,7632	2,8692	3,5030	4,4715	7,3167	
Cluster5	5,2829	5,8623	6,7399	5,8574	5,1955	7,1070	
Cluster6	1,3893	2,4705	6,0813	4,0225	4,3211	4,2215	
Cluster7	1,7810	3,2059	4,9412	2,3752	3,6820	4,9608	
Cluster8	2,6887	3,8509	4,0494	2,4164	2,2120	5,5446	
Cluster9	3,4135	2,3087	5,9362	3,6814	5,7067	2,4177	
Cluster10	2,8203	1,2390	7,2475	5,2176	6,1151	1,5406	
Cluster11	5,0706	5,2456	5,7437	4,5255	5,0039	6,1512	
Cluster12	8,7421	7,8532	7,3705	6,8154	8,5330	7,3164	
Cluster13	2,1995	3,8706	6,0743	4,0581	4,1753	5,6983	
Cluster14	0,0000	1,8891	6,0237	3,6015	4,6453	3,7826	
Cluster15	1,8891	0,0000	6,3884	4,1456	5,3565	1,9311	
Cluster16	6,0237	6,3884	0,0000	2,8981	2,3153	7,4441	
Cluster17	3,6015	4,1456	2,8981	0,0000	2,7163	5,4383	
Cluster18	4,6453	5,3565	2,3153	2,7163	0,0000	6,7461	
Cluster19	3,7826	1,9311	7,4441	5,4383	6,7461	0,0000	
Cluster20	1,8019	1,8884	5,4231	2,8154	4,7340	3,3166	
	Cluster20						
Cluster1	4,7174						

Cluster2	9,1740
Cluster3	4,9491
Cluster4	5,7273
Cluster5	5,8777
Cluster6	2,9119
Cluster7	2,1269
Cluster8	3,2704
Cluster9	1,9181
Cluster10	3,1125
Cluster11	4,7900
Cluster12	7,1558
Cluster13	3,6416
Cluster14	1,8019
Cluster15	1,8884
Cluster16	5,4231
Cluster17	2,8154
Cluster18	4,7340
Cluster19	3,3166
Cluster20	0,0000

Classification non supervisée 2010

Principal Component Analysis: Brightness; Green; Red; MIR; NDBI; NDVI; Green_1;

Eigenanalysis of the Correlation Matrix

Eigenvalue	4,8956	2,7648	1,5169	0,7376	0,4747	0,2593	0,2064	0,1149
Proportion	0,445	0,251	0,138	0,067	0,043	0,024	0,019	0,010
Cumulative	0,445	0,696	0,834	0,901	0,945	0,968	0,987	0,997

Eigenvalue	0,0230	0,0068	0,0000
Proportion	0,002	0,001	0,000
Cumulative	0,999	1,000	1,000

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Brightness	0,309	-0,403	-0,207	0,156	-0,010	-0,023	-0,045	-0,020
Green	0,410	-0,223	0,086	0,127	0,065	0,141	-0,067	0,165
Red	0,124	-0,438	-0,424	0,184	-0,205	-0,508	0,149	-0,108
MIR	0,356	0,026	0,432	0,284	-0,019	-0,287	0,208	0,074
NDBI	0,359	-0,285	-0,097	-0,064	0,197	0,591	-0,271	-0,000
NDVI	-0,346	-0,142	-0,468	-0,108	-0,031	0,066	-0,141	-0,187
Green_1	0,255	0,325	-0,330	0,005	-0,508	0,383	0,557	0,061
Red_1	0,173	0,340	-0,379	0,137	0,772	-0,099	0,279	-0,089
MIR_1	0,381	0,207	0,090	-0,296	-0,124	-0,120	-0,183	-0,803
NDBI_1	0,084	0,446	-0,227	0,573	-0,206	-0,049	-0,600	0,091
NDVI_1	0,316	0,177	-0,206	-0,628	-0,038	-0,334	-0,231	0,505

Variable	PC9	PC10	PC11
Brightness	-0,288	-0,091	-0,762
Green	-0,392	0,652	0,351
Red	0,399	0,049	0,290
MIR	-0,295	-0,570	0,246
NDBI	0,346	-0,383	0,219
NDVI	-0,625	-0,276	0,321
Green_1	-0,038	-0,019	-0,000
Red_1	-0,007	0,022	-0,000
MIR_1	-0,034	0,079	0,000
NDBI_1	0,041	-0,011	-0,000
NDVI_1	-0,045	-0,091	-0,000

K-means Cluster Analysis: Brightness; Green; Red; MIR; NDBI; NDVI; Green_1; Red

Annexes

Standardized Variables
Final Partition
Number of clusters: 20

	Number of observations	Within cluster sum of squares	Average distance from centroid	Maximum distance from centroid
Cluster1	387	2271,160	2,276	5,353
Cluster2	1618	7214,668	2,004	4,824
Cluster3	2355	10327,126	1,998	4,887
Cluster4	5720	6638,347	1,005	6,169
Cluster5	173	141,687	0,781	2,521
Cluster6	7405	5965,875	0,837	4,264
Cluster7	98	64,061	0,708	2,098
Cluster8	5276	6446,261	1,057	2,752
Cluster9	7287	6211,565	0,827	4,705
Cluster10	2497	10735,943	1,967	4,810
Cluster11	3069	7192,685	1,394	4,571
Cluster12	72	77,099	0,865	3,550
Cluster13	384	3635,068	2,939	5,861
Cluster14	459	6289,580	3,520	10,638
Cluster15	4245	7409,440	1,247	4,237
Cluster16	5	0,000	0,000	0,000
Cluster17	1061	6310,631	2,293	7,234
Cluster18	3173	10061,591	1,699	6,104
Cluster19	3891	9132,633	1,464	3,594
Cluster20	2056	11628,100	2,260	5,549

Cluster Centroids

Variable	Cluster1	Cluster2	Cluster3	Cluster4	Cluster5	Cluster6
Brightness	-3,5293	0,5754	0,0476	0,5034	-0,9731	-0,6490
Green	-2,3556	1,5601	1,0894	0,1519	-1,1638	-0,9159
Red	-2,7835	-0,8887	-1,1408	0,7149	-0,5386	-0,2737
MIR	1,9623	2,0706	1,3634	-0,1273	-0,9618	-0,8834
NDBI	-4,0950	1,3585	1,0075	0,1640	-1,0132	-0,6460
NDVI	-1,9994	-2,0591	-1,7872	0,3701	0,8805	0,8287
Green_1	-1,1285	-1,0856	0,7526	-0,5357	-2,2698	-0,5831
Red_1	-2,6557	-0,3892	0,4461	-0,8770	-3,0179	-0,0923
MIR_1	-0,3691	0,7673	1,4118	-0,5019	-1,4269	-0,7380
NDBI_1	-2,0654	-0,4187	0,0855	-0,8182	-2,5281	-0,0558
NDVI_1	-1,2594	-0,8210	0,5971	-0,4987	-1,7874	-0,5730

Variable	Cluster7	Cluster8	Cluster9	Cluster10	Cluster11	Cluster12
Brightness	-1,7119	0,4525	-1,4279	0,6522	-0,4355	-0,1347
Green	-1,5394	-0,0725	-1,3566	1,0753	-0,6085	-0,7392
Red	-1,4177	0,8084	-1,1306	0,0599	-0,1981	0,4857
MIR	-1,0648	-0,4794	-0,9991	0,8846	-0,6420	-0,8971
NDBI	-1,5874	0,1974	-1,2910	1,0111	-0,3539	-0,4237
NDVI	0,8018	0,6583	0,7642	-1,0533	0,5458	1,0302
Green_1	-2,3379	0,1201	-0,6067	0,7529	0,6100	-2,3085
Red_1	-3,1394	0,2113	-0,2564	1,6580	0,9983	-3,0927
MIR_1	-1,4522	-0,4650	-0,6930	1,6114	-0,2925	-1,4384
NDBI_1	-2,6102	-0,1226	0,1753	0,0107	0,9551	-2,5899
NDVI_1	-1,8546	-0,4093	-0,5834	2,0099	-0,0847	-1,8132

Variable	Cluster13	Cluster14	Cluster15	Cluster16	Cluster17	Cluster18
Brightness	-2,7940	-1,2457	1,2999	-3,4235	0,5825	0,8378
Green	-1,6706	-0,6232	0,7825	-2,6042	1,4483	1,1865
Red	-2,1227	-0,8428	1,4827	-2,8303	-0,2167	0,3873
MIR	1,2880	0,9770	0,0724	-3,2036	2,7151	1,0641
NDBI	-3,3987	-1,7164	0,7680	-4,1653	0,0144	0,9080
NDVI	-1,5577	-1,0930	0,3123	2,5826	-2,1020	-1,0972
Green_1	1,5496	3,4110	-0,1337	-2,3409	-0,1229	-0,0993
Red_1	1,0245	2,7725	-0,6804	-3,1578	0,4533	-0,4341
MIR_1	0,9002	1,2170	-0,3760	-1,4608	0,3154	0,8990
NDBI_1	2,1904	5,3753	-0,6231	-2,6317	2,1980	-0,5182

Annexes

NDVI_1	0,4366	0,9422	-0,2383	-1,8576	-1,0593	1,0113	
Variable	Cluster19	Cluster20	Grand centroid				
Brightness	0,7941	0,0476	0,0000				
Green	0,6407	0,6890	0,0000				
Red	0,7644	-0,6242	0,0000				
MIR	0,1910	0,7883	0,0000				
NDBI	0,6618	0,7447	-0,0000				
NDVI	-0,1043	-1,1933	0,0000				
Green_1	0,6510	2,4111	0,0000				
Red_1	0,2841	0,9426	0,0000				
MIR_1	0,3674	2,3659	-0,0000				
NDBI_1	-0,0499	1,2240	-0,0000				
NDVI_1	0,9575	2,1346	-0,0000				
Distances Between Cluster Centroids							
	Cluster1	Cluster2	Cluster3	Cluster4	Cluster5	Cluster6	Cluster7
Cluster1	0,0000	8,6522	8,8433	8,2810	6,5101	7,4949	5,7143
Cluster2	8,6522	0,0000	2,8316	4,3741	7,2050	5,6472	7,8575
Cluster3	8,8433	2,8316	0,0000	4,6052	8,0497	5,2885	8,5617
Cluster4	8,2810	4,3741	4,6052	0,0000	4,5668	2,4788	5,5468
Cluster5	6,5101	7,2050	8,0497	4,5668	0,0000	4,4549	1,3556
Cluster6	7,4949	5,6472	5,2885	2,4788	4,4549	0,0000	4,9788
Cluster7	5,7143	7,8575	8,5617	5,5468	1,3556	4,9788	0,0000
Cluster8	8,9277	4,9382	4,5144	1,5420	5,6157	2,1660	6,4700
Cluster9	6,6353	6,3072	5,8058	3,7235	4,5139	1,4324	4,6422
Cluster10	10,3217	4,4902	2,4669	4,9603	8,9642	5,6769	9,6104
Cluster11	8,5701	5,6241	4,4468	3,3237	6,4888	2,1074	6,9820
Cluster12	7,6789	6,9695	8,0064	4,0525	1,5226	4,6252	2,8620
Cluster13	6,7747	8,0099	6,4667	7,7792	9,2916	6,4126	9,0746
Cluster14	11,4992	9,3149	7,3050	9,2341	12,3009	8,2970	12,4851
Cluster15	9,5889	4,4042	4,5965	1,5335	5,8962	3,7496	6,9699
Cluster16	7,1662	11,7113	11,8100	9,1215	5,5885	7,6958	4,5223
Cluster17	9,2082	3,3812	3,6546	5,3654	8,6820	6,0016	9,2524
Cluster18	9,1364	2,8874	2,4174	3,1835	7,0736	4,7685	7,8742
Cluster19	9,5363	4,2888	3,1607	2,6690	7,0364	3,8141	7,8536
Cluster20	10,3669	5,6452	2,9576	6,1019	9,8172	6,3750	10,2933
	Cluster8	Cluster9	Cluster10	Cluster11	Cluster12	Cluster13	
Cluster1	8,9277	6,6353	10,3217	8,5701	7,6789	6,7747	
Cluster2	4,9382	6,3072	4,4902	5,6241	6,9695	8,0099	
Cluster3	4,5144	5,8058	2,4669	4,4468	8,0064	6,4667	
Cluster4	1,5420	3,7235	4,9603	3,3237	4,0525	7,7792	
Cluster5	5,6157	4,5139	8,9642	6,4888	1,5226	9,2916	
Cluster6	2,1660	1,4324	5,6769	2,1074	4,6252	6,4126	
Cluster7	6,4700	4,6422	9,6104	6,9820	2,8620	9,0746	
Cluster8	0,0000	3,5155	4,4771	2,1419	5,2357	7,2997	
Cluster9	3,5155	0,0000	6,4331	2,7458	5,1141	5,6518	
Cluster10	4,4771	6,4331	0,0000	4,4939	8,7343	7,2672	
Cluster11	2,1419	2,7458	4,4939	0,0000	6,5575	5,6497	
Cluster12	5,2357	5,1141	8,7343	6,5575	0,0000	10,0142	
Cluster13	7,2997	5,6518	7,2672	5,6497	10,0142	0,0000	
Cluster14	8,1875	8,1560	7,2893	6,4884	12,5660	5,0294	
Cluster15	1,9496	5,0693	4,5577	3,9354	5,1253	8,5938	
Cluster16	9,5720	6,8099	12,6243	9,4038	6,8578	10,3147	
Cluster17	5,2700	6,5216	4,8751	5,2328	8,5301	6,6668	
Cluster18	3,5185	5,6841	2,6620	4,4424	6,6701	7,6796	
Cluster19	2,1743	4,8913	2,6011	3,0315	6,6366	7,2997	
Cluster20	5,4966	6,7954	2,5301	4,8669	9,7783	6,3366	
	Cluster14	Cluster15	Cluster16	Cluster17	Cluster18	Cluster19	
Cluster1	11,4992	9,5889	7,1662	9,2082	9,1364	9,5363	
Cluster2	9,3149	4,4042	11,7113	3,3812	2,8874	4,2888	
Cluster3	7,3050	4,5965	11,8100	3,6546	2,4174	3,1607	
Cluster4	9,2341	1,5335	9,1215	5,3654	3,1835	2,6690	
Cluster5	12,3009	5,8962	5,5885	8,6820	7,0736	7,0364	
Cluster6	8,2970	3,7496	7,6958	6,0016	4,7685	3,8141	

Annexes

Cluster7	12,4851	6,9699	4,5223	9,2524	7,8742	7,8536
Cluster8	8,1875	1,9496	9,5720	5,2700	3,5185	2,1743
Cluster9	8,1560	5,0693	6,8099	6,5216	5,6841	4,8913
Cluster10	7,2893	4,5577	12,6243	4,8751	2,6620	2,6011
Cluster11	6,4884	3,9354	9,4038	5,2328	4,4424	3,0315
Cluster12	12,5660	5,1253	6,8578	8,5301	6,6701	6,6366
Cluster13	5,0294	8,5938	10,3147	6,6668	7,6796	7,2997
Cluster14	0,0000	9,3396	14,0349	6,9168	8,5713	7,7173
Cluster15	9,3396	0,0000	10,5569	5,2557	2,7976	2,2018
Cluster16	14,0349	10,5569	0,0000	12,6026	11,4492	11,0460
Cluster17	6,9168	5,2557	12,6026	0,0000	4,2222	4,7108
Cluster18	8,5713	2,7976	11,4492	4,2222	0,0000	1,9582
Cluster19	7,7173	2,2018	11,0460	4,7108	1,9582	0,0000
Cluster20	5,8196	5,8708	12,9191	5,3024	4,0808	3,8172
Cluster20						
Cluster1	10,3669					
Cluster2	5,6452					
Cluster3	2,9576					
Cluster4	6,1019					
Cluster5	9,8172					
Cluster6	6,3750					
Cluster7	10,2933					
Cluster8	5,4966					
Cluster9	6,7954					
Cluster10	2,5301					
Cluster11	4,8669					
Cluster12	9,7783					
Cluster13	6,3366					
Cluster14	5,8196					
Cluster15	5,8708					
Cluster16	12,9191					
Cluster17	5,3024					
Cluster18	4,0808					
Cluster19	3,8172					
Cluster20	0,0000					