UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Contribution de la télédétection dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de la ville de Bujumbura : cas de la zone comprise entre les rivières Muha et Mugere

Ntezimana, Révérien; Sous la direction de : Dr Athanase Nkunzimana ; Pr Aloys Ndayisenga

2023-05
UB, FLSH
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/513

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES

Master en Sociétés, Pouvoirs, Territoires et Développement durable (SPTD)

CONTRIBUTION DE LA TELEDETECTION DANS L'ETUDE DE LA DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE LA VILLE DE BUJUMBURA : CAS DE LA ZONE COMPRISE ENTRE LES RIVIERES MUHA ET MUGERE

Par

Révérien NTEZIMANA

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de Master en « Sociétés, Pouvoirs, Territoires et Développement durable » (SPTD)

Option: Aménagement

Sous la direction de :
Dr Athanase NKUNZIMANA, Directeur
Pr Aloys NDAYISENGA, Co-directeur

Bujumbura, Mai 2023

Contribution de la télédétection dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de la ville de Bujumbura : cas de la zone comprise entre les rivières Muha et Mugere

MEMBRES DU JURRY

Président : Dr Erasme NGIYE

Secrétaire : Dr Appolinaire NIYONKURU

Directeur : Dr Athanase NKUNZIMANA

Co-Diercteur : Pr Aloys NDAYISENGA

DEDICACE

A ma chère épouse Emmelencienne NSHIMIRIMANA ;

A mes fils Bernis Gaël IGIRANEZA & Ethan Basile NISHIMWE ;

A ma fille Anny Fleurette ITERITEKA ;

A mon regretté père disparu au moment où je rédigeais ce mémoire ;

A ma chère Maman ;

Nous dédions ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, il nous est agréable d'exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes tant physiques que morales qui ont contribuées à sa réalisation.

Nos sincères remerciements s'adressent à Dr NKUNZIMANA Athanase et à Professeur Aloys NDAYISENGA respectivement Directeur et Co-directeur de mémoire qui ont bien accepté de diriger ce travail malgré leurs multiples occupations. Leur disponibilité, leurs remarques et leur rigueur scientifique sont à la base de la réussite de ce travail. Nous leur serons à jamais reconnaissant.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants et plus particulièrement ceux de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines, pour la formation tant morale que scientifique qu'ils nous ont fait acquérir.

Nous réitérons nos remerciements aux responsables des différents services pour avoir mis à notre disposition, toute la documentation nécessaire pour conduire à terme ce travail.

Il sied d'adresser nos sincèrest remerciements à notre chère épouse et nos enfants pour leur patience, leur encouragement et leur soutien durant toute la période de formation. C'est le même sentiment à l'endroit de nos parents, frères et sœurs pour leur soutient**.** Que Dieu les bénisse.

Enfin, que toute notre famille, tous nos amis et toute personne qui nous a accordée le soutien tant moral que matériel considèrent le présent travail comme la meilleure expression de notre sincère et profonde reconnaissance.

NTEZIMANA Révérien

RESUME

La ville de Bujumbura en général et la zone comprise entre les rivières Muha et Mugere en particulier, sont soumises à une croissance spatiale et démographique sans précédent. Le but du présent travail est de montrer la contribution de la télédétection spatiale dans l'analyse de l'évolution de l'occupation du sol. Grâce au traitement numérique d'images satellitaires multidates (Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI-TIRS), une mise en évidence et un suivi des changements ont été réalisés dans la zone comprise entre les rivières Muha et Mugere, pour la période de 1996 à 2021. Notre démarche repose sur la comparaison de classification et post-classification qui permet de quantifier les changements.

Nous avons effectué des classifications et post-classification de ces images qui nous ont permis de mettre en évidence l'évolution de l'occupation spatiale. Les résultats montrent que notre zone d'étude a connu des évolutions positives et négatives pour les classes thématiques constituées. Les régressions ou progressions au sein des classes ont été montrées par l'analyse des pixels ou soit par l'analyse des changements des superficies. Les classes qui ont régressé sont celles du sol très faiblement couvert (-13027 pixels soit -527,13ha), du sol faiblement couvert (-7391 pixels soit -665,19ha) et du sol nu (-519 pixels soit -46,71ha). Les résultats ont également montré que les classes de sol moyennement couvert et le bâti ont augmenté de 3801 pixels et 16674 pixels soient 342,09ha et 1500,66ha respectivement. Cette augmentation du bâti coïncide avec l'évolution de la population dans la zone d'étude que nous avons montrée dans la revue de la littérature. Les données quantitatives sur l'évolution démographique le prouvent, ce qui explique l'évolution positive du bâti.

A part la mise évidence de l'évolution spatiale entre 1996 et 2021, un aperçu sur l'évolution de l'eau côtière du lac Tanganyika a été fait. Sur ce point, nous avons montré que la turbidité du lac Tanganyika augmente tandis que l'eau pâle a diminué.

Les résultats des classifications et post-classification coïncident avec l'objectif d'étude où nous avions montré que la télédétection spatiale est utilisée dans le suivi de l'évolution de l'occupation du sol urbain et périurbain au sud de la ville de Bujumbura. Cette partie connaît des changements importants comme nos résultats l'ont démontré.

Mots-clés : Télédétection, dynamique spatio-temporelle, occupation urbaine, image satellitaire Landsat, Détection des changements.

ABSTRACT

The city of Bujumbura in general and in particular the area between the Muha and Mugere rivers is subject to unprecedented growth. The aim of this work is to show the contribution of spatial remote sensing in the analysis of the evolution of land cover. Thanks to the digital processing of multi-date satellite images (Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI-TIRS), these changes were highlighted and monitored in the area between the Muha and Mugere rivers, for the period from 1996 to 2021. Our approach is based on the comparison of classification and post-classification which make it possible to quantify the changes.

We carried out classifications and post-classifications of these images which allowed us to highlight the evolution of the spatial occupation. The results show that our study area has experienced positive and negative changes for the thematic classes formed. The regressions or progressions within the classes were shown by the analysis of the pixels or either by the analysis of the changes in the areas. The classes that have regressed are those of very lightly covered soil (-13027 pixels or -527.13ha), lightly covered soil (-7391 pixels or -665.19ha) and bare soil (-519 pixels or -46.71ha). The results also showed that the classes of moderately covered soil and the built environment increased by 3801 pixels and 16674 pixels, to mean 342.09ha and 1500.66ha respectively. This increase in buildings coincides with the evolution of the population in the study area that we have shown in the literature review. Quantitative data on the demographic evolution prove it, which explains the positive evolution of the building.

Apart from highlighting the spatial evolution between 1996 and 2021, an overview of the evolution of the coastal water of Lake Tanganyika has been made. On this point, we have shown that the turbidity of Lake Tanganyika is increasing while the pale water has decreased.

The results of the classifications and post-classification coincide with the study objective where we had shown that spatial remote sensing is used in monitoring the evolution of urban and peri-urban land use south of the city of Bujumbura. This area knows important changes as our results have shown.

Keywords : Remote sensing, spatio-temporal dynamics, urban occupancy, Landsat satellite image, change detection

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURRY ..... **i**
DEDICACE ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ..... **ix**
LISTE DES FIGURES ..... **x**
SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **xi**
AVANT-PROPOS ..... **xii**
INTRODUCTION **1**
1. Problématique de la recherche 3
1.1. Intérêt du sujet 4
2. Objectifs de l'étude 5
2.1. Objectif général 5
2.2. Objectifs spécifiques 5
3. Hypothèse générale 6
3.1. Hypothèses spécifiques 6
CHAPITRE I : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE **7**
1.1. Cadre de formation 7
1.1.1. Situation 7
1.1.2. Site et ses contraintes 9
1.1.2.1. Site 9
1.1.2.2. Contraintes 9
1.2. Historique de Bujumbura 10
1.3. Délimitation spatio-temporelle de la zone l'étude 11
1.4. La croissance spatio-démographique 12
1.4.1. Extension spatiale de la ville de Bujumbura 12
1.4.2. Evolution de la population 14
1.4.2.1. Evolution globale des effectifs 14
1.4.2.2. Croissance de la population de la ville de Bujumbura par zone 15
1.4.2.3. Evolution des effectifs de la zone d'étude 17
1.4.2.4. Evolution et répartition de la population par zone de 1990 à 2020 18

1.4.2.5. Croissance démographique 19
1.5. Aménagement de la zone d'étude 21
1.5.1. Quartiers viabilisés 21
1.5.2. Quartiers non viabilisés 21
CHAPITRE II : APPROCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE 23
2.1. Approche conceptuelle 23
2.1.1. Définition des concepts clés 23
2.1.2. Historique de la télédétection 24
2.1.3. Processus d'acquisition de l'Image 25
2.1.4. Apport de la télédétection dans l'étude 26
2.2. Méthodologies du travail 26
2.2.1. Schéma méthodologique 27
2.2.2. Revue de la littérature 28
2.2.3. Méthodes de collecte des données 28
2.2.3.1. Choix des capteurs 29
2.2.3.2. Choix et description des images 30
2.2.3.3. Choix des images 30
2.2.3.4. Description des images 31
2.3. Prétraitement des images 33
2.4. Traitement des images 35
2.4.1. Composition colorée 35
2.4.2. Classification 36
2.4.2.1. Classification non supervisée 36
2.4.2.2. Classification supervisée 36
2.4.3. Validation de la classification supervisée 38
2.4.3.1. Degré de précision globale 39
2.4.3.2. Coefficient de Kappa 40
CHAPITRE III : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS 41
3.1. Analyse des résultats de la classification 41
3.2. Présentation des résultats cartographiques d'occupation du sol 42
3.2.1. Occupation du sol en 1996 42
3.2.2. Occupation du sol en 2021 43
3.3. Interprétation des résultats statistiques de la classification 45
3.3.1. Matrice de confusion des résultats de la classification de l'image de 1996 45

3.3.2. Matrice de confusion des résultats de la classification de l'image de 2021 47
3.4. Analyse de la dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol entre 1996 et 2021 .. 49
3.4.1. Evolution d'occupation du sol entre 1996 et 2021 49
3.4.2. Analyse de l'évolution des superficies entre 1996 et 2021 51
3.5. Discussion des résultats 55
3.5.1. Corrélation entre l'extension urbaine et le changement des classes d'occupation du sol 55
3.5.2. Corrélation entre l'évolution de la population et la diminution de l'espace à bâtir 57
CONCLUSION 59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 62
1. Ouvrages et Articles 62
2. Site Web Internet 64
ANNEXES 65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Evolution de la population de Bujumbura..... 14
Tableau 1.2: La croissance de la population urbaine de Bujumbura par zone de 1990 à 2020..... 16
Tableau 1.3: Evolution de la population de la zone d'étude de 1990 à 2020..... 17
Tableau 1.4: Répartition de la population dans la commune de Muha entre 1990 et 2020 18
Tableau 1.5 : Accroissement de la population de Muha par zone entre les périodes 1990-2008, 2008 - 2015 et 2015-2020……..20
Tableau 2.1: Caractéristiques des capteurs 29
Tableau 2.2: Synthèses caractéristiques des images découpées..... 30
Tableau 2.3: ROI de Calibration 37
Tableau 2.4: ROI de validation de la classification 39
Tableau 2.5: Coefficient de Kappa..... 40
Tableau 3.1: Matrice de confusion des résultats de la classification de 1996..... 46
Tableau 3.2: Matrice de confusion des résultats de la classification de 2021..... 48
Tableau 3.3: Matrice de transition entre 1996 et 2021..... 49
Tableau 3.4: Evolution entre 1996 et 2021 50
Tableau 3.5: Superficies en ha entre 1996 et 2021 52
Tableau 3.6: Evolution en superficie (en hectare) entre 1996 et 2021..... 53

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Carte de localisation de la zone d'étude 8
Figure 1.2: Allure d'évolution de la population de la ville de Bujumbura de 1914 à 2020 15
Figure 1.3: Evolution de la population de la zone d'étude de 1990 à 2020 18
Figure 2.1: Schéma méthodologique du travail 27
Figure 2.2: Zone couverte par l'image Landsat chemin (Path) 173 et ligne (Row) 062 31
Figure 2.3: Image de la Scène complète de Landsat 5 et Landsat8 32
Figure 2.4: Image satellitaire de 1996 découpée aux dimensions de la zone d'étude 33
Figure 2.5: Image satellitaire de 2021 découpée aux dimensions de la zone d'étude 34
Figure 3.1: carte d'occupation du sol de la zone d'étude en 1996 42
Figure 3.2: carte d'occupation du sol de la zone d'étude en 2021 44
Figure 3.3: Comparaison des superficies en ha entre 1996 et 2021 54

SIGLES ET ABREVIATIONS

µm	:	Millimicron
ENVI	:	Environment for Visualizing Images
ERTS	:	Earth Resources Technology Satellite
GEOTIFF	:	Georeferencing Tagged Image File Format
ha	:	hectare
IRTh	:	Infrarouge thermique
ISTEEBU	:	Institut des Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi
km	:	Kilomètre
m	:	Mètre
MIR	:	Moyen Infrarouge
MSS	:	Multispectrale scaner
NASA	:	National Aeronautics and Space Administrator
OLI	:	Operational Land Imager
Pan	:	Panchromatique
PIR	:	Proche Infra-Rouge
QGIS	:	Quantum Geographic Information System
RGPH	:	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
ROI	:	Region Of Interest
RVB	:	Rouge-Vert-Bleu
SIG	:	Système d'Information Géographique
TIRS	:	Thermal Infrared Sensor
TM	:	Thematic Mapper
USGS	:	United States Geological Survey
UTM	:	Universal Tranverse Mercator
WGS84	:	World Geodetic System 1984

AVANT-PROPOS

Le monde actuel est soumis à l'évolution technologique sans précédent, la télédétection spatiale est une de ces nouvelles technologies. Elle est un outil actuellement utilisé dans l'analyse de l'évoluton de l'environnement, dans le suivi des phénomènes météorologiques, des Mers et des Océans, dans les prospections minières et pétrolières, etc. Cette nouvelle technologie a été rendue possible grâce à l'utilisation des Images satellitaires. Le premier satellite a été mis en orbite en 1956, mais il a fallu attendre l'année 1972 pour avoir les premières images de la télédetection civile car les précédentes étaient du domaine militaire.

L'usage de ces images a marqué un tournant déterminant dans l'évolution technologique. Des études portant sur différents domaines d'application de la télédétection ont été déjà réalisées dans le monde. Les études de la dynamique de l'occupation du sol ont été réalisées et ont permis non seulement de montrer l'évolutive de l'occupation du sol mais également de faire des projections dans le temps et dans l'espace.

Au Burundi, dans les périphéries des villes en général et dans la ville Bujumbura en particulier, la surface bâtie continue à augmenter du fait que ces bandes disposent des espaces encore vides convoités par les immigrants. Le rythme de croissance de la population urbaine entraîne la conquête des espaces pouvant abriter des nouvelles maisons pour répondre à la demande sans cesse croissante des logements en la ville.

Dans le but de contribuer à démontrer le rythme de cette croissance, nous avons mené une étude sur l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol de la partie sud de Bujumbura. Dans cette étude, nous avons utilisé les images satellitaires afin de montrer l'apport de cette nouvelle technologie actuelle dans la gestion et l'évolution de l'occupation du sol.

INTRODUCTION

La gestion de l'espace urbain est l'une des contraintes majeures auxquelles fait face la plupart des pays spécialement les pays en voie de développement qui enregistrent une croissance urbaine accélérée dans ces dernières années. Le continent africain appartient aux espaces les moins urbanisés de la terre. Mais il est présentement engagé dans un mouvement d'urbanisation très rapide et puissant, comme s'il était soucieux de rattraper à grands pas son retard sur les autres continents (Robert, 1998). Certains pays parviennent à mettre en place des mesures de régulation de l'espace urbain tandis que d'autres restent presque incapables de gérer cette croissance urbaine.

Le Burundi enregistre une croissance démographique rapide depuis des années. Cette croissance se remarque tant à la compagne que dans les villes. Actuellement, des villes et centres à vocation urbaine se multiplient ou s'agrandissent très rapidement entraînant ainsi les modifications dans l'occupation du sol. Or, plus la population se multiplie, plus l'habitat augmente et l'espace est confronté à des changements permanents. Dans les villes ou centres urbains, la croissance se manifeste sur les périphéries par la densification de la population et du bâti.

La ville de Bujumbura est soumise à une croissance spatiale et démographique rapide depuis sa création. Des nouveaux espaces ruraux sont en train d'être annexés à cette. Les périphéries du Nord et du Sud sont les plus touchées par cette croissance.

La périphérie sud de Bujumbura est l'une des parties touchées par cette croissance. Elle est comprise entre les rivières Muha et Mugere et attire notre attention pour cette étude. Cette zone enregistre une croissance rapide depuis quelques années. Les normes urbanistiques ne sont pas respectées partout, ce qui amplifie son degré de vulnérabilité aux glissements de terrain au piedmont des Mirwa à l'Est et aux inondations dans certains quartiers de l'Ouest (Buterere et Kibenga). Selon SINDAYIHEBURA (2005), depuis les années 80 les communes urbaines de Bujumbura ont connu des séries répétitives des inondations qui ont surtout menacées les quartiers situés en basse altitude.

Des chercheurs ont tenté depuis un certain temps de faire des études sur la croissance de la ville de Bujumbura. Toutefois, il y a toujours des lacunes dans l'explication et l'interprétation de la dynamique spatio-temporelle (NDAYIRUKIYE, 2002).

La télédétection spatiale est actuellement utilisée comme un outil d'étude et de suivi d'occupation du sol mais le rythme est encore faible pour certains pays.

Les études détaillées sur la dynamique de l'occupation du sol de la zone métropolitaine, avec l'utilisation de la technologie satellitaire restent rares alors que ces dernières permettent non seulement de faire une étude évolutive de l'occupation du sol mais également de montrer des projections dans le temps et dans l'espace. Les études déjà effectuées dans différents pays grâce à la télédétection, ont mis en évidence les évolutions de l'espace. La détection de l'étalement urbain dans le bas-Sahara (Dechaïcha et Alkama, 2020) a été analysée via la télédétection. De même, l''évolution de la ville d'Oran (Algérie) est mise en évidence par usage de la télédétection (FOUZIA et al, 2011).

De même au Burundi une étude sur la contribution de la télédétection dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain de la partie nord de la mairie de Bujumbura (NDIKUBWAYO, 2019) a été effectuée à base de la télédétection. Cette dernière est pour le moment un outil de suivi de l'évolution du paysage.

Le but de notre travail est de faire une analyse de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol de la zone d'étude en utilisant des images satellitaires multidates. La technique de la télédétection spatiale permet de mener une analyse approfondie de corrélation entre la croissance spatiale et la croissance démographique de la zone d'étude.

1. Problématique de la recherche

La croissance des villes comme Bujumbura se fait par apport migratoire et le croît naturel de population (ISTEEBU, 1990, 2008). Cette croissance se remarque également à travers les prévisions de la population (ISTEEBU, 2020) (actuellement Institut National de la statistique du Burundi INSBU). Dans cette ville, cet apport se réalise généralement à la périphérie et particulièrement au sud de la rivière Muha par intégration de migrants. Ces parties périphériques continuent à accueillir une population de plus en plus nombreuse alimentée par l'exode rural. Notre zone d'étude est soumise à ce phénomène de croissance spatiale par annexion des parties périphériques à la ville, mais aussi par la densification du bâti qui en découle.

Avant les années 90, le quartier sud de Kanyosha, n'existait pas comme le prouve les données de recensement (BCR, 1990). Depuis les années 1990, les zones qui constituent l'actuelle commune de Muha ont connu des évolutions sans précédent et surtout à la sortie de la crise sociopolitique qui a endeuillé le Burundi depuis 1993 à septembre 2006, date d'accord de paix avec le dernier mouvement rebelle. La situation de paix en ville a poussé les gens à convoiter la vie urbaine. Plusieurs jeunes ont quitté la campagne pour embrasser la vie en ville et cela s'est accompagné par de nombreux problèmes d'ordre socio-économique, dont le manque de logement, le banditisme, l'oisiveté, les enfants de la rue etc. La croissance rapide de la population et le manque de logement dans la partie viabilisée a eu comme conséquences l'occupation des zones périphériques qui visiblement n'étaient pas encore occupées comme le sud de Bujumbura. Souvent, cette installation ne suivait pas les normes urbanistiques.

Les axes d'extension de la ville sont surtout le nord et le sud du fait de leur configuration physique qui présente un atout à l'installation des maisons. L'Est de la ville comprend les contreforts des Mirwa qui constituent un frein dans l'extension urbaine. Cette partie dispose d'un mauvais terrain où les aménagements sont extrêmement chers à cause de la pente qui exige des coûts élevés pour les constructions. L'Ouest quant à elle est complètement inconstructible suite à la présence du lac Tanganyika qui constitue une barrière naturelle à l'aménagement urbain. Seuls, les axes nord et sud situés dans la partie de la plaine, sont facilement exploitables, soit pour la construction des maisons, soit pour accueillir différentes cultures.

Compte tenu de ses atouts (Aspect topographique, accessibilité) et de sa localisation, notre zone d'étude est donc la cible pour l'extension ; sa croissance est inéluctable : l'occupation du sol s'intensifie, des nouvelles maisons se construisent d'année en année. La gestion de cette croissance semble être difficile à voir son rythme. Actuellement l'utilisation des images satellitaires a servi d'outil important dans le suivi des évolutions de l'environnement naturel et/ou de l'espace urbain dans différents endroits.

La problématique est de savoir la contribution de la télédétection dans l'analyse de l'évolution de l'occupation spatio-temporelle urbaine et périurbaine soumise à des mutations sans précédent comme le sud de Bujumbura. Nous cherchons encore à savoir si la détection des changements urbains est possible à base des données satellitaires pour une petite bande urbaine et périurbaine.

De ce qui précède il y a lieu de se poser des questions :

1. Existe-elle une relation entre la croissance de la population et l'étalement de l'espace urbain dans la zone comprise entre Muha et Mugere ?

2. Quelle est la contribution de la télédétection dans l'étude de l'évolution de l'occupation du sol ?

1.1. Intérêt du sujet

La télédétection permet d'acquérir les informations spatiales sans entrer en contact avec la terre, elle est un des moyens de suivi de l'évolution de l'occupation du sol. Elle permet de recueillir des données instantanées à plusieurs reprises suivant la durée de la répétitivité des capteurs utilisés. Depuis les années 70, cette technique a été utilisée pour l'observation civile de la terre (COLOZ et COLLET, 2001). Comme elle utilise des capteurs installés dans l'atmosphère (altitude variable), elle est utile dans le suivi des zones hospitalières et inhospitalières. De même la technologie évolue et les capteurs deviennent de plus en plus performants et, par conséquent, la qualité des données s'améliore au fur des années.

L'utilisation des images satellitaires à des dates variées contribue dans le suivi et l'évolution de paysage dans différents domaines. Ces images sont disponibles aussi pour le Burundi sur le site web d'USGS[1].

[1] https://earthexplorer.usgs.gov/

Leur analyse et interprétation contribuent à une connaissance ample et actualisée de l'utilisation de l'espace urbain et périurbain, difficile à contrôler, à voir le rythme de croissance périphérique de la ville de Bujumbura.

Ces images étant prises sur des années différentes, leur comparaison et/ou confrontation permet de détecter les changements opérés au cours de la période concernée. Dans ce domaine, l'étude de la déforestation et de la dégradation des forêts à Kisangani (MIKWA NGAMBA, 2010) a été possible grâce à l'utilisation des images satellitaires. Dans différentes régions du monde, l'image satellitaire est venue contribuer dans l'analyse des milieux en pleine croissance et a marqué un tournant important de la révolution technologique dans l'observation et le suivi de l'évolution d'affectation du sol. Étant donné que certaines villes connaissent actuellement des phases de croissances sans précédent, l'une des solutions permettant de suivre ce mouvement est l'analyse et interprétation des images satellitaires.

Le suivi du sud de la ville de Bujumbura en évolution serait difficile. Cependant, le recours aux images satellitaires, une fois mise en avant, apporte une remédiation. Dans cette zone, l'occupation du sol se modifie très rapidement et les images satellitaires sont les mieux indiquées pour analyser cette évolution.

2. Objectifs de l'étude

2.1. Objectif général

Notre travail consiste à faire une étude de la dynamique spatio-temporelle de la zone comprise entre les rivières Muha et Mugere afin de montrer le rôle des images satellitaires dans le suivi de l'évolution de l'occupation du sol urbain au sud de la ville de Bujumbura.

2.2. Objectifs spécifiques

De manière spécifique, ce travail consiste à :

- Montrer l'évolution de l'occupation du sol, particulièrement du bâti et de la végétation de la zone d'étude à partir des images satellitaires Landsat de 1996 et de 2021 ;
- Analyser la corrélation entre l'extension de la surface bâtie et la croissance démographique de la zone d'étude.

3. Hypothèse générale

Les changements de l'occupation du sol entre les années 1996 et 2021 sont liés à l'évolution de la population et du bâti.

3.1. Hypothèses spécifiques

1°. La périphérie urbaine du sud de Bujumbura dispose encore des espaces non construits qui attirent des nouveaux occupants.
2°. L'analyse par la télédétection permet de détecter la dynamique de l'occupation du sol.

CHAPITRE I : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

1.1. Cadre de formation

1.1.1. Situation

La zone qui fait l'objet de l'étude est située au Sud de la ville de Bujumbura. Elle est délimitée au Sud par la rivière Mugere, au Nord par la rivière Muha, à l'Est par les Mirwa et à l'Ouest par le Lac Tanganyika. Cette zone est traversée par deux routes nationales : la RN7 et la RN3. Elle comprend aussi 3 autres cours d'eau (Mpimba qui est un affluent de la Muha, Kanyosha et Kizingwe) qui traversent cette zone de l'Est à l'Ouest débouchant directement sur le lac Tanganyika. La figure ci-après montre l'emplacement de notre zone d'étude.

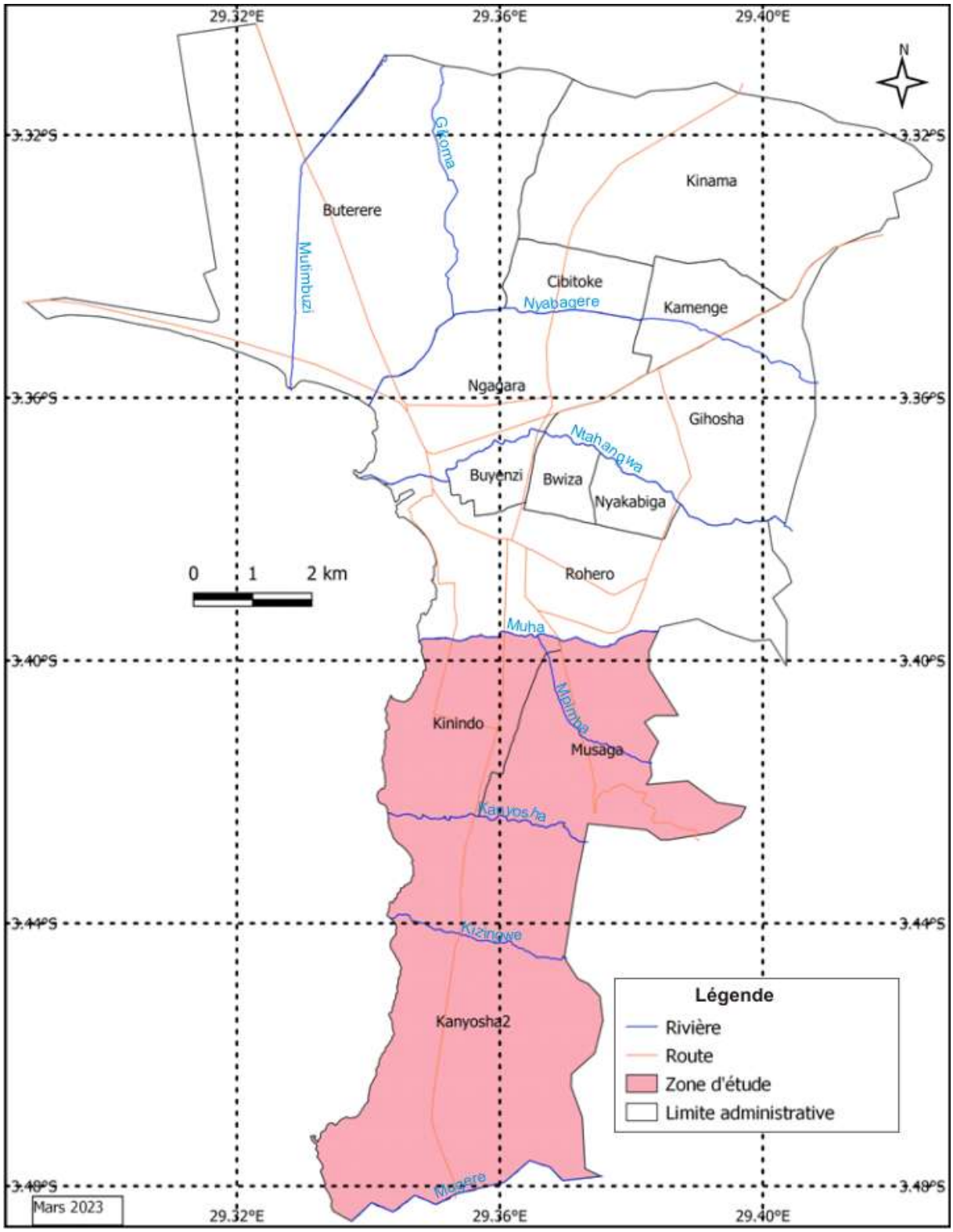


Figure 1.1: Carte de localisation de la zone d'étude

Source : Auteur sur base de shapfile des limites administratives du Burundi

1.1.2. Site et ses contraintes

1.1.2.1. Site

Le site d'une ville est perçu comme l'assiette de la ville, l'emplacement précis de l'espace construit dans ses rapports avec la topographie du milieu. Pour la ville de Bujumbura, il s'agit d'un site de plaine. Notre zone d'étude, telle que localisée sur la figure 1.1, est située au Sud de la ville de Bujumbura, qui est à son tour placée dans la plaine de l'Imbo.

Cette plaine est issue des mouvements tectoniques qui ont affectés la partie orientale de l'Afrique (au tertiaire supérieur). A la puissance de la tectonique, l'écorce terrestre, rigide, n'a réagi qu'en se cassant, entraînant ainsi des soulèvements et des affaissements sur le plan topographique donnant naissance au Horst et Graben. La plaine de l'Imbo où se trouve la ville de Bujumbura dont notre zone d'étude fait partie, est issue de ce mouvement. Les formations du Quaternaire sont caractéristiques de sa géologie. Pendant que l'érosion différentielle exploitait le Horst, les dépôts fluvio-lacustres se sont succédés pour remblayer une partie du graben, donnant lieu à un relief de faille attenué par le haut et remblayé par le bas. Il en résulte un relief à faible pente qui a mis en place un site favorable à l'implantation de l'habitat. Cette zone est convoitée par beaucoup de personnes suite à la facilité qu'elle offre en ce qui concerne l'installation de maisons.

Néanmoins de difficultés ne manquent pas, la partie Est touche sur les piedmonts de Mirwa et est confrontée aux glissements de terrain tandis que l'ensemble de la zone d'etude subit les effets des eaux de ruissellement qui proviennent des contreforts des Mirwa. Par conséquent la partie Ouest est souvent victime des inondations dues au débordement du lac Tanganyika. Ce qui rend difficile l'extension de l'habitat vers l'Est (Mirwa) et l'Ouest (Lac Tanganyika).

1.1.2.2. Contraintes

Dans cette partie Sud de la ville de Bujumbura, les contraintes les plus remarquables sont liées aux milieux physiques et aux aléas climatiques. Les risques liés au climat sont souvent les vents violents et les fortes précipitations qui détruisent les maisons dans les parties à occupation spontanée telles que Gikoto, Kamesa, Kinogono, Gisyo et Ruziba. Les risques liés à la dynamique fluviale se remarquent également le long des cours d'eau qui traversent la zone soit à l'intérieur, soit aux extrémités de zone. Les rivières Muha, Mpimba, Kanyosha et Kizingwe sont en plein dynamisme.

Elles surcreusent des lits mineurs, causent ainsi des effondrements des berges chaque année. Les conséquences se font sentir directement sur les populations riveraines.
Ces conséquences sont amplifiées par l'implantation des populations dans des zones à hauts risques ou dans les zones tampons en violation des normes d'urbanisme. Certaines constructions se sont déjà effondrées tandis que d'autres comportent des fissures dans les murs.

On peut se poser la question de savoir si les locataires de ces parcelles n'étaient pas conscients du danger ou si la dynamique se serait amplifiée jusqu'à ce que la zone tempon soit dépassée. Dans la plupart des cas, les locataires ont ignoré les lois en construisant des maisons jusque dans le lit majeur. Encore, la roche est si tendre que les effondrements ont été importants de sorte que l'élargissement des lits des cours d'eau a atteint les maisons.

1.2. Historique de Bujumbura

La Ville de Bujumbura dans laquelle se trouve notre zone d'étude croît sans cesse depuis sa création. Elle a connu des périodes de croissance variées et d'extension donnant naissance à des divers quartiers qui la constituent. Fondée par les allemands en 1897, le noyau originel de Bujumbura était un terrain de cent hectares, acheté à un chef local le 11 août 1897 par des missionnaires allemands[2]. A partir de cette année, les asiatiques dont les arabes et les hindous ont occupé la partie se trouvant au bord du Lac Tanganyika, dénommée actuellement Quartier Asiatique (BIDOU et al., 1991).

Appelée Usumbura à sa création, elle s'est développée pour devenir une véritable ville pendant la période de tutelle belge (1922-1962) et l'administration coloniale en fit la capitale du Rwanda-Urundi. En 1960, Usumbura fut érigée en commune urbaine. A la promulgation de la constitution du 16 octobre 1962, le nom « Usumbura » fut remplacé par « Bujumbura ».

Ce n'est qu'après 1908 que le premier quartier de la ville (Quartier Asiatique) a été aménagé et occupé en majorité par les asiatiques.

Au départ, le centre-ville était essentiellement occupé par les européens qui ont été à l'origine de la création de la ville. Tout autour, d'autres quartiers ont été créés pour les populations africaines de situation sociale et économique moyenne, soumises à l'autorité de

[2] https://www.yaga-burundi.com/2019/bujumbura-histoire-que-vous-ignoriez

l'administration coloniale ou des employés des colonisateurs. C'est dans cette optique que les zones administratives telles que Musaga, Nyakabiga,etc. ont été fondées.

Les premiers quartiers noirs furent créés entre 1928 et 1932 ; il s'agit de Buyenzi et Kabondo respectivement.

Dans les années 1940 furent créés Nyakabiga et Rohero II et Musaga a été créé en 1965. Les quartiers Kamenge, Kinana et Ngagara ont été créés à leur tour entre 1952 et 1957. L'installation des nouveaux quartiers au nord de la Ntahangwa a été faite afin de loger la main-d'œuvre dont on avait de plus en plus besoin avec l'implantation d'une douzaine d'entreprises de transformation des produits agricoles ou de substitution (BIDOU et al. ,1991).

Les autres quartiers de Bujumbura ont été créés après les années 80, période pendant laquelle Kinindo et Kinanira, faisant partie de notre zone d'étude, vont être lotis. Enfin Kanyosha a été créé en 1990, constituant un atout pour l'extension urbaine.

Les conditions d'installation humaine qui, jugées hostiles, au départ se sont progressivement améliorées. La topographie plane de la ville facilite l'implantation, de même, sa situation constitue un atout. Ouverte sur le rivage du lac Tanganyika, la ville de Bujumbura permet la liaison avec l'océan Indien via la Tanzanie par un chemin de fer. La création et le développement de la ville de Bujumbura sont liés à sa position qui facilite l'exportation et l'importation des biens. Etant donné qu'elle est la capitale économique du Burundi, les flux commerciaux, de la main-d'œuvre et des capitaux y sont fréquents et sont à la base de son extension.

1.3. Délimitation spatio-temporelle de la zone l'étude

Notre travail porte sur la période de 1996 à 2021, pour laquelle, les détails seront démontrés dans le présent travail, avec le choix d'images dont nous nous sommes servis lors de l'analyse de la dynamique spatiale. Cette zone est délimitée par deux cours d'eau (Muha et Mugere) traversant la ville de Bujumbura de l'Est à l'Ouest et se déversant dans le Lac Tanganyika (l'illustration de la figure 1.1).

Du point de vue administratif, la ville de Bujumbura qui comptait 13 communes en 2008 lors du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) ne compte actuellement que 3, parmi lesquelles la commune Muha.

Les 13 anciennes communes urbaines sont administrativement devenues des zones administratives urbaines. Notre zone couvre les zones urbaines actuelles de Musaga, Kinindo et Kanyosha qui constituent à leur tour la commune Muha. Les trois zones n'ont pas été créées à la même période et dans les mêmes circonstances.

1.4. La croissance spatio-démographique

La croissance spatio-démographique observée actuellement au niveau de la ville de Bujumbura en général et de la périphérie sud (entre Muha et Mugere) en particulier, nous pousse à faire une étude sur cette zone bien définie afin de tirer une conclusion sur la façon dont s'opère l'évolution spatio-démographique. La croissance spatio-démographique de notre zone découle des idées qui stipulent que l'extension de la ville de Bujumbura est orientée vers deux axes (axe Nord et axe Sud) dont l'axe Sud fait objet de notre étude. Elle coïncide également avec le découpage administratif des communes urbaines actuelles, parmi lesquelles, la commune Muha. Sur ce volet, nous avons analysé l'extension tant spatiale que démographique mais un accent particulier porte sur la dynamique d'occupation spatiale.

1.4.1. Extension spatiale de la ville de Bujumbura

Depuis sa création, la ville de Bujumbura n'a pas cessé de s'accroître. Sa superficie s'agrandit sans cesse passant de 0,3 km² en 1907 à 37 km² en 1983. De 1983 à 2018, la superficie de la ville a presque triplé passant de 37 km² à 115 km² (NDIHOKUBWAYO, 2019).

La commune Muha, objet de notre étude, est située au Sud de Bujumbura, l'un des axes de croissance de la ville. Elle connaît par conséquent une extension spatiale et démographique rapide. Positionnée au Sud de la rivière Muha, cette commune a été créée plus récemment avec la restructuration administrative de la ville de Bujumbura par la loi n°1/33 du 28 novembre 2014 portant Révision de la Loi n°1/02 du 25 janvier 2010 portant Organisation de l'Administration Communale[3] .

De même, en analysant les données du Recensement Général de la Population et de l'Habitant de 1990, on constate que Kanyosha et Kinindo ne figuraient pas sur la liste des zones recensées cette année-là; seule, la zone Musaga existait. L'évolution a été très remarquable au sud, dans la zone Kanyosha, qui avait pour limite Sud la rivière Kizingwe lors de sa création en 1990.

[3] En ligne, disponible sur https://www.presidence.gov.bi

Actuellement, cette zone s'est prolongée encore vers le Sud pour inclure le quartier Ruziba et se limiter désormais à la rivière Mugere, limite Sud de la ville de Bujumbura. La partie Est a été également touchée par cette extension à l'exemple du quartier Kamesa localisé au piedmont de Mirwa. La zone Kinindo a connu l'extension spatiale vers l'Ouest, pour inclure le quartier Kibenga.

Cette évolution des quartiers périphériques ne se fait pas au même rythme que celle des quartiers du centre de la ville telle que Rohero ou ses voisins comme Bwiza, Buyenzi, qui connaissent déjà des limites stables. Une autre forme d'évolution spatiale touche le quartier Gihosha et Kamenge, récemment créés. En effet, la superficie de Kamenge a été réduite au profit de Gihosha. Les quartiers Taba et Gasenyi à titre d'exemple sont devenus parties intégrantes de Gihosha avec la récente restructuration des limites administratives de la mairie de Bujumbura.

Spatialement, la ville de Bujumbura s'oriente vers le Sud et vers le Nord. Cela est dû aux conditions naturelles qui constituent des obstacles naturels dont les escarpements de Mirwa à l'Est et le lac Tanganyika à l'Ouest qui ne permettent pas l'extension de cette ville vers ces deux directions. L'Est peut être aménagé mais moyennant des moyens financiers colossaux, d'outils spécialisés, des études approfondies et de spécialistes en matière d'aménagement des terrains escarpés.

La croissance spatiale de Muha se fait vers le Sud où on a encore de l'espace et où la topographie plane est favorable à l'aménagement. Cette croissance spatiale de la ville de Bujumbura vers le Sud et le Nord est loin d'être arrêtée si d'autres mesures de détermination et d'orientation de la croissance urbaine ne sont pas envisagées. Actuellement, un projet du plan d'extension spatiale réalisé montre que l'axe le plus sensible est le Nord. Cela s'explique par la topographie de ce milieu et l'étendue de la plaine dans cette partie. Au Sud de Kanyosha, la plaine se rétrécit et tend à disparaître car les escarpements des Mirwa se prolongent jusqu'au niveau du Lac. Dans la ville, les aménagements sont toujours orientés vers les lieux sans contraintes naturelles. Or, la partie Sud de Bujumbura où se situe la commune Muha dispose des terrains plats souhaités pour l'aménagement, ce qui explique cette préférence pour de la croissance spatiale. Mais avec les actuels aménagements de Nyabugete et Kizingwe-Bihara, l'espace plat de la commune urbaine actuelle de Muha va s'épuiser et la tendance d'extension sera totalement orientée vers le Nord.

1.4.2. Evolution de la population

1.4.2.1. Evolution globale des effectifs

La population urbaine de Bujumbura a toujours évolué depuis sa création en 1897 jusqu'à nos jours. Les effectifs des différentes années présentent des variations significatives. Le tableau 1.1 montre que les effectifs de la population de la ville de Bujumbura ont augmenté passant de 2.500 habitants de 1914 à 699.288 habitants en 2020.

Le tableau ci-après montre l'évolution rapide de la population de la ville de Bujumbura.

Tableau 1.1: Evolution de la population de Bujumbura

Année	Effectif
1914	2500 (a)
1959	45585 (a)
1979	141630 (b)
1990	235440 (c)
2008	497166 (c)
2015	616328 (d)
2020	699288 (d)

Source : (a) Sylvestre NDAYIRUKIYE, *Bujumbura centenaire 1897-1997 Croissance et défis*, p.32

(b) Département de la population : *RGPH du 16-31/8/ 19979*

(c) B.C.R : *RGPH du 16-31/8/1990 et du 16-31/8/2008*

(d) Prévision de l'ISTEEBU

Les données de 1979, 1990 et 2008 sont plus fiables du fait qu'elles sont issues des recensements généraux de la population réalisés au cours de ces années. Cette croissance se poursuit cmme le montrent les estimations de l'ISTEEBU de 2015 et 2020 pour la ville de Bujumbura.

La figure ci-contre nous montre l'allure générale de cette croissance.

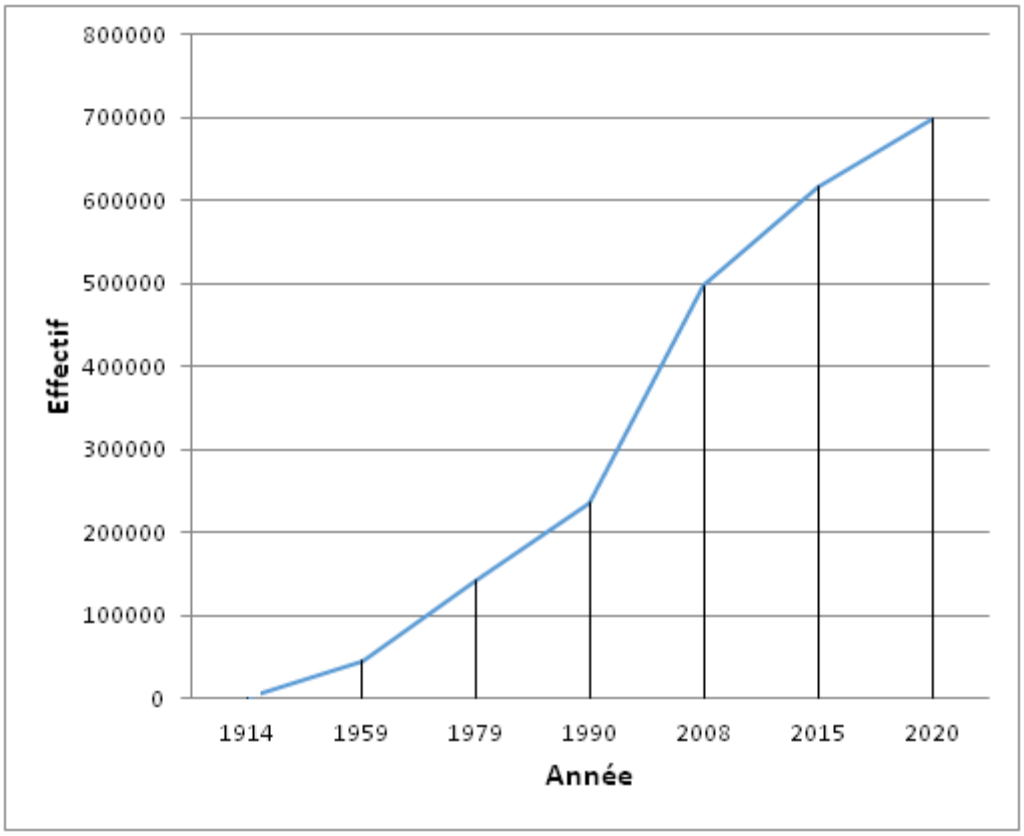


Figure 1.2: Allure d'évolution de la population de la ville de Bujumbura de 1914 à 2020

Source: Auteur, à base des données du tableau 1.1

L'allure générale de croissance des effectifs sur l'ensemble de la ville de Bujumbura (figure1.2) est proche de celle qui s'observe dans la zone d'étude à voir les effectifs du tableau 1.2.

Etant considéré comme un centre de rayonnement, la ville de Bujumbura attire plusieurs personnes suite à ses différentes fonctions qu'elle offre. Actuellement cette centralité provoque le mouvement d'immigration massive de gens en provenance de la campagne (exode rural) qui espèrent trouver le confort et le bien être en ville.

1.4.2.2. Croissance de la population de la ville de Bujumbura par zone

La croissance de la population de la ville découle de la croissance de la population de ces zones. Nous nous sommes intéressés sur la croissance observée depuis les années 90 où beaucoup de quartiers existaient déjà. Le tableau ci-après nous montre l'évolution de la population urbaine par zone depuis les années 90.

Tableau 1.2: La croissance de la population urbaine de Bujumbura par zone de 1990 à 2020

Commune (Zone)	Population en 1990 (a)	Population en 2008 (a)	Population en 2015 (b)	Population en 2020 (b)
Buterere	-	28371	35171	39905
Buyenzi	27941	47363	58715	66618
Bwiza	26612	37688	46721	53010
Cibitoke	25399	50899	63099	71592
Gihosha	-	39503	48971	55563
Kamenge	20880	50070	62071	70426
Kanyosha	-	59181	73366	83241
Kinama	23560	49776	61706	70012
Kinindo	-	21920	27174	30832
Musaga	30746	43735	54218	61515
Ngagara	15135	30883	37557	42613
Nyakabiga	15738	20883	25888	29373
Rohero	22123	17481	21671	24588
Total	226628	497166	616328	699288

Source : (a) Ministère de l'intérieure, Bureau Central du Recensement

(b) Projection de l'ISTEEBU

Le tableau précédent montre que les zones Buterere, Gihosha, Kanyosha et Kinindo n'avaient pas de données comptant pour le Recensement Rénéral de la Population et de l'Habitat de 1990. Cette situation traduit que ces dernières n'avaient pas encore été créées ou qu'elles étaient en phase de création. A cette année, toutes les autres zones disposaient de données, ce qui explique qu'elles existaient déjà avant le recensement de 1990.

Concernant l'année 2008, toutes les zones disposaient des effectifs. Le constat général est que la population de la ville de Bujumbura a doublé, passant de 226628 à 497166 pendant une période de 18 ans (entre les périodes de 1990-2008). Cette évolution est très élevée à voir même le rythme général de la croissance du pays.

Les effectifs ont évolué positivement au sein des zones sauf pour la zone de Rohero où on observe une évolution négative de la population passant de 22123(1990) à 17481(2008).

Certaines des raisons sont que cette zone est d'abord située au centre de la ville. Or à Bujumbura comme dans la plupart des villes dans le monde, les centres sont considérés comme des quartiers des affaires ou commerciaux. Ensuite cette partie de la ville ne dispose plus d'espace vides pour accueillir des nouveaux logements, ainsi les gens à la recherche des parcelles sont obligées de quitter le centre vers les périphéries.

Ce sont ces dernières qui constituent des zones d'extension et disposent par conséquent des espaces encore vides, des parcelles moins chères par rapport à celles des centres villes prêt à accueillir les nouveaux locataires. Elles constituent alors des pôles d'attraction des jeunes citadins des centres villes d'où la diminution des effectifs au centre ville au profit des zones périphériques.

Au cours des périodes de 2008-2015 et 2015-2020, les évolutions globales de la population urbaine sont positives. Les deux dernières années comprennent des effectifs issus des projections réalisées à base de recensement de la population et de l'habitat de 2008, ces projections peuvent donner l'idée sur des valeurs proches de la réalité. Nous constatons alors que la croissance générale de la population de la ville de Bujumbura est positive.

1.4.2.3. Evolution des effectifs de la zone d'étude

Avant les années 1979, seule Musaga existait parmi les zones administratives qui constituent la commune Muha. Ce n'est qu'après 1980 que l'extension et le lotissement des nouveaux quartiers de la ville de Bujumbura a été important.

Les effectifs de la population dans la zone d'étude augmentent aussi rapidement que ceux de l'ensemble de la ville, comme le montrent les données du tableau ci-après.

Tableau 1.3: Evolution de la population de la zone d'étude de 1990 à 2020

Année	Effectif
1990	30746 (a)
2008	124836 (à)
2015	154758 (b)
2020	175588 (b)

Source : (a) département de la population : *RGPH du 16-31/1990 et RGPH du 16-31/8/2008*

(b) Prévision de la population de l'ISTEEBU

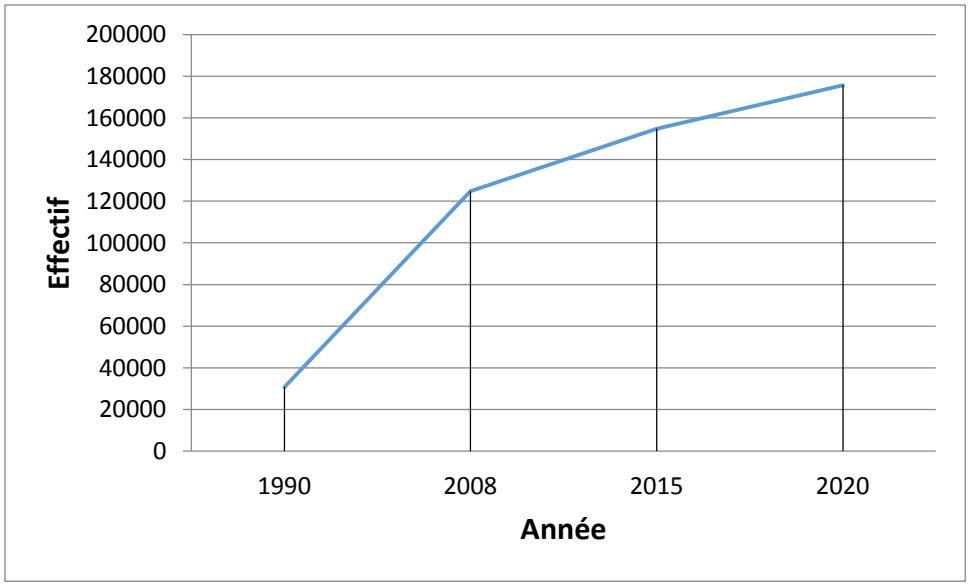


Figure 1.3: Evolution de la population de la zone d'étude de 1990 à 2020

Source : Auteur à base des données du tableau 1.3

La figure 1.3, issue du tableau 1.3, illustre que l'évolution de la population est très remarquable.

Elle a été très importante entre les années 1990 et 2008 ce qui s'explique par le fait que c'est dans les années 90 que le nouveau quartier de Kanyosha a été créé. Situé dans l'axe Sud d'extension de la ville, elle connaît une croissance rapide.

1.4.2.4. Evolution et répartition de la population par zone de 1990 à 2020

Les effectifs de la population urbaine de la commune actuelle de Muha varient en fonction des zones, comme l'indiquent les données du tableau suivant.

Tableau 1.4: Répartition de la population dans la commune de Muha entre 1990 et 2020

Années / Zones	1990 (a)	2008 (a)	2015 (b)	2020 (b)
Kanyosha	-	59181	73366	83241
Kinindo	-	21920	27174	30832
Musaga	30746	43735	54218	61515
Total	30746	124836	154758	175588

Source : (a) Département de la population : *RGPH du 16-31/1990*

(b) Prévision de la population de l'ISTEEBU

Le tableau 1.4 montre que les zones actuelles de Kanyosha et Kinindo ne disposaient pas des données au cours d'année 1990.

Elles n'étaient pas encore aménagées ou n'étaient pas encore annexées à la ville à cette année. Cette répartition prouve que seule la zone Musaga existait avant les années 90 car elle a fait objet du recensement. Elle disposait d'une population de 30746 habitants.

Nous constatons que toutes les zones existaient en 2008. La situation surprenante est celle de la zone Kanyosha qui n'existait pas en 1990 mais qui dispose de l'effectif de 59181 en 2008, effectif le plus élevé de toutes les autres zones de la commune alors qu'elle est parmi les plus récentes. Elle est suivie par la zone Musaga avec 43735 et enfin Kinindo avec 21920 habitants. L'effectif élevé de la Kanyosha s'explique par le fait qu'elle est située dans l'axe d'extension Sud. Pour la zone Musaga, l'extension se fait vers l'Est, zone des escarpements des Mirwa, qui inclut les quartiers de Gasekebuye et plus récemment Kamesa.

Les données de 2015 montrent toujours que les effectifs les plus élevés s'observent dans les zones Kanyosha et Musaga avec 73366 et 54218 habitants respectivement, Kinindo comptait 27174 habitants à la même date. Cela montre que comparativement à Kinindo, les deux autres zones disposaient des vastes espaces non occupés à l'intérieur, susceptibles d'être viabilisés ou occupés anarchiquement. Les raisons ne sont autres que leurs positions par rapport à l'axe d'extension (Kanyosha) et l'annexion de nouveaux quartiers (Musaga).

Dans la zone Kinindo, l'extension visait le quartier Kibenga qui est situé à basse altitude et qui est souvent inondable en cas de fortes précipitations ou de débordement du Lac Tanganyika comme c'était le cas en 2020 et 2021. Ce facteur contribue à la faiblesse de son évolution. Mais pour le moment, cette zone est presque saturée.

Enfin, un aperçu sur les prévisions de la population de 2020 nous a permis de faire une analyse sur l'accroissement de la population. En observant les prévisions des données de 2020, nous constatons que la zone Kanyosha vient toujours au sommet avec un effectif de 83241, suivi par Musaga avec 61515 et Kinindo en dernière positon avec 30832 habitants (tableau 1.4). Cela montre que la population urbaine est très élevée dans les nouvelles zones qui disposent des espaces pouvant accueillir des nouveaux demandeurs des parcelles. Le constat est que le rythme est accéléré dans cette partie Sud et Est de la commune.

1.4.2.5. Croissance démographique

La croissance accélérée de la population des zones qui constituent l'actuelle commune de Muha est justifiée par plusieurs facteurs dont les mouvements de la population et l'extension du site habité depuis 1990 jusqu'en 2020.

Tableau 1.5 : Accroissement de la population de Muha par zone entre les périodes 1990-2008, 2008 – 2015 et 2015-2020

Période / Zone	1990-2008	2008-2015	2015-2020
Kanyosha	59181	14185	9875
Kinindo	21920	5254	3658
Musaga	12989	10483	7297
Total	94090	29922	20830

Source : Auteur à partir des données calculées du tableau 1.4

Nous constatons que l'accroissement de la population est positif dans toutes les zones pour les trois périodes considérées. L'accroissement a été très important pour la période comprise entre 1990 et 2008 où elle a été de 94090.

Les effectifs de la population de cette commune se sont accrus de 29922 à partir des années 2008 jusqu'en 2015 tandis que cette dernière voit sa population s'accroître de 20830 personnes, pendant la période comprise entre 2015 et 2020. Au cours de ces périodes, toutes les zones ont enregistré des accroîssements positifs. Kanyosha a connu une augmentation de la population de 59181 entre la période de 1990 et 2008, de 14185 personnes entre 2008 et 2015 mais aussi de 9875 depuis 2015 jusqu'à 2020.

Malgré sa position géographique, Kinindo a vu ses effectifs augmenter de 21920 depuis 1990 jusqu'en 2008, de 5254 personnes entre 2008 et 2015 et de 3658 dès 2015 à 2020. Enfin à Musaga, l'accroissement a été de 12989 depuis 1990 à 2008, puis de 10483 entre 2008 et 2015 et de 7297 entre 2015 et 2020.

Les accroissements de la population dans les zones de Muha sont partout positifs. Cela signifie que l'on continue à accueillir des nouveaux venus dans cette commune.

1.5. Aménagement de la zone d'étude

Dans la commune actuelle de Muha, l'aménagement est variable suivant les zones et/ou quartiers. Certains quartiers sont viabilisés suivant les normes de l'urbanisme et sont issus des opérations de lotissement, de découpage parcellaire tandis que d'autres sont occupés de façon anarchique.

1.5.1. Quartiers viabilisés

Dans les quartiers viabilisés, le travail découle du service de l'urbanisme. Le découpage s'effectue sur un plan pré-élaboré avant l'attribution de parcelles. Ce document de découpage montre le plan parcellaire.

En effet, le parcellaire permet de voir l'organisation de l'espace du quartier qu'il représente. Il donne ensuite l'idée de la taille de la parcelle. Cependant, les parcelles ne sont pas de mêmes dimensions, mais ont toutes accès à la voirie.

Dans les quartiers viabilisés tels que Kinindo, Kibenga, Zeimet, Kinanira, Musama, Nyabugete et Nkenga-Busoro, avant d'obtenir une parcelle viabilisée, plusieurs démarches interviennent différemment. Il s'agit d'un processus progressif qui commence avec la conception du projet d'aménagement et qui va jusqu'à l'attribution de la parcelle. Le lotissement consiste à délimiter les espaces réservés à recevoir les parcelles englobant le traçage de la voirie, la planification des domaines réservés aux équipements, tandis que la viabilisation repose sur le traçage des voies de desserte, des caniveaux d'évacuation des eaux pluviales et l'assainissement des eaux usées. Cette opération inclut la précision des emprises pour les réseaux d'approvisionnement en eau potable, en l'électricité et réseau téléphonique et autres.

1.5.2. Quartiers non viabilisés

L'état des quartiers rend compte de la manière dont ils sont aménagés. Beaucoup de quartiers créés après les années 1990 sont issus de la volonté de propriétaires et dépendent de leurs moyens. Les anciens champs de culture appartenant à des privés ont été soit transformés par leurs propriétaires soient vendus aux autres individus et surtout aux nouveaux arrivants qui cherchaient des parcelles pour construire. Dans ce cas, aucune intervention du service de l'urbanisme et de l'habitat n'a été envisagée. Les habitants de ces quartiers sont pour la plupart des populations à moyens et à faibles revenus ne pouvant pas répondre aux exigences des normes d'urbanistiques.

L'absence de l'inervention de l'Etat dans l'amenagement de ces quartiers a été à l'origine des problemes que connaissent aujourd'hui ces quartiers (inondations, salublité, rues trop étroites, problèmes de circulation, des maisons non accesible, etc.).

Suite au manque d'espaces publics vastes pouvant faire l'objet d'aménagements par l'urbanisme (Viabilisation et lotissement) pour satisfaire les demandes des acquéreurs, ces derniers sont obligés de se débrouiller. Ils achètent des parcelles n'importe où dans les quartiers périurbains et y érigent des maisons correspondant à leurs moyens. Ceci concerne les quartiers Kibenga rural (zone Kinindo), la grande partie de la zone Musaga (Sauf Kinanira) et Kinogono, Gisyo, Busoro, Ruziba (zone Kanyosha). Ces quartiers ne disposent ni de voiries ni de caniveaux répondant aux normes d'aménagement urbain. Les locataires s'entendent pour céder quelques mètres afin de libérer de l'espace servant de traçage des routes ou chemins pour les piétons. Etant donné que même les parcelles achetées ont des dimensions variées, souvent petites, les propriétaires ne peuvent pas céder plus d'un mètre ou au plus deux mètres. D'où alors les dimensions des voiries sont réduites. Les caniveaux n'existent pas dans certains endroits ou s'ils existent, ils sont tracés à main, non maçonnés et non entretenus.

CHAPITRE II : APPROCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE

2.1. Approche conceptuelle

2.1.1. Définition des concepts clés

L'**occupation du sol** désigne « la couverture physique de la surface des terres émergées » et donc le type d'usage (ou de non-usage) fait des terres par l'Homme[4].

La Dynamique spatiale désigne l'ensemble des changements, des évolutions que l'on peut trouver sur un territoire au fil du temps[5].

La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information[6].

Résolution Spatiale: est la plus petite surface au sol (unité territoriale) dont le signal radiométrique est détectable par le capteur. La taille de cette unité dépend des caractéristiques du capteur et de l'altitude de la plate-forme. Cette surface correspond au pixel[7].

La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites[8].

Landsat : Le **programme Landsat** est le premier programme spatial d'observation de la Terre destiné à des fins civiles. Il est développé au milieu des années 1960 par l'Agence Spatiale Américaine, la NASA à l'investigation de l'Institut des études géologiques américain (USGS) et du département de l'agriculture. Sept satellites Landsat sont lancés entre 1972 et 1999 et un huitième le 11 février 2013[9].

[4] (FAO, 1998, cité par https://fr.wikipedia.org , consulté le 15/102022)
[5](https://lewebepedagogique.com; consulté 10/8/2022)
[6] Kergomard C., 2003
[7] (https://www.rncan.gc.ca, consulté le 15/10/2022)
[8] (https://www.rncan.gc.ca, consulté le 15/10/2022)
[9] https://earthexplorer.usgs.gov/(Consulté le 15/9/2022)

Une image satellitaire est image d'observation de la surface de la terreterre résultant de la prise de vue d'un appareillage embarqué dans un satellite[10].

Une **orbite héliosynchrone** désigne une orbite géocentrique légèrement rétrograde dont on choisit l'altitude et l'inclinaison de façon que l'angle entre le plan d'orbite et la direction du soleil demeure quasiment constant. Un satellite placé sur une telle orbite passe au-dessus de la surface terrestre à la même heure solaire locale[11].

L'**orbite géostationnaire** est une orbite située à 35 786 km d'altitude au-dessus de l'équateur de la Terre, dans le plan équatorial et d'une excentricité orbitale nulle[12].

Un **capteur**, dans le domaine de la **télédétection spatiale**, est un instrument qui recueille de l'énergie radiative provenant de la scène visée et délivre un signal électrique correspondant et mesurable[13].

2.1.2. Historique de la télédétection

Le début de l'exploration de l'espace par satellite remonte de l'année 1957 avec le lancement du premier satellite de l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques (URSS), appelé Spoutnik 1 et s'achève en 1972. Cette année, coïncide avec mise en orbite du satellite ERTS, rebaptisé ensuite Landsat 1, premier satellite de télédétection des ressources terrestres qui a ouvert l'époque de la télédétection moderne. Ce satellite est le premier de la série Landsat dont aujourd'hui, on est au huitième. Parallèlement, les radiomètres-imageurs ont été mis au point et perfectionnés, de même que les premiers radars.

Le développement constant des capteurs et des méthodes de traitement des données numériques ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et en fait un instrument indispensable de gestion de la planète, et, de plus en plus, un outil économique.

Depuis les années 1990, on assiste ainsi à la multiplication des satellites équipés de capteurs actifs, radars en particulier. Dans le domaine du rayonnement visible et infrarouge, les capteurs à très haute résolution spectrale sont aujourd'hui d'utilisation courante dans leur version aéroportée et font leur apparition à bord de satellites.

[10] https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-image-satellitale-4977 (Consulté le 08/3/2023)
[11] https://www.telesatellite.com (Consulté le 08/3/2023)
[12] https://www.techno.science.net (consulté le 08/3/2023)
[13] https://www.techno-science.net/definition/2718.html

2.1.3. Processus d'acquisition de l'Image

Pour obtenir les images satellitaires, une source de rayonnement est indispensable, il peut être le soleil ou le satellite lui-même. Lorsque la source (soleil ou satellite) envoie un rayonnement à la surface terrestre, des interactions se produisent entre le rayonnement et la cible illuminée. Il se produit des Interactions entre le rayonnement et l'atmosphère tout au long du trajet de la source vers la cible et entre la cible et le capteur. En fonction des propriétés et des caractéristiques de la cible, une partie du rayonnement est réfléchie vers le capteur satellitaire.

Chaque objet ou chaque surface possède ainsi une réponse spectrale bien précise à une longueur d'onde donnée. L'ensemble des réponses spectrales à différentes longueurs d'onde constitue ce que l'on appelle la signature spectrale d'une surface. Chaque type de surface peut ainsi être caractérisé et identifié par le satellite. Le rayonnement électromagnétique réfléchi, émis ou rétrodiffusé par la cible, est mesuré par le capteur satellitaire lorsque celui-ci lui parvient. Ce flux énergétique est enregistré au niveau du capteur satellitaire et permet de distinguer entre eux les principaux types de surfaces terrestres ou d'analyser plus finement les propriétés de ces surfaces.

Les radiomètres fournissent des données numériques, c'est à dire un ensemble de nombres, généralement des entiers codés en binaire sur des bandes magnétiques, qui, arrangés en lignes et en colonnes, permettent de reconstituer une image. Le mode d'utilisation privilégié de ces données est donc le traitement numérique, à l'aide de l'informatique. Le traitement numérique permet de calibrer les données initiales en grandeurs physiques, ou de classer statistiquement les pixels pour aboutir à la cartographie automatique des phénomènes.

Les données sont codées sur des comptes numériques en octet (8 bits, c'est à dire dans l'intervalle 0-255). Ensuite elles sont transmises directement ou par un satellite relais à une station équipée d'une antenne parabolique de réception. Au niveau de la station, on procède au prétraitement et traitement des données afin de produire des images satellitaires. Les images abtenues sont stockées et mises en ligne pour permettre aux chercheurs d'acceder à ces dernières afin d'en extraire des informations.

2.1.4. Apport de la télédétection dans l'étude

Etant donné que la télédétection permet de faire une analyse de la dynamique du milieu sans contact direct avec ce dernier, son apport est important dans l'étude de l'évolution de l'occupation du sol urbain et périurbain qui fait l'objet de notre travail. L'utilisation de la technologie moderne constitue un des moyens d'analyse de la dynamique urbaine dans différentes villes du monde. Tandis que la télédétection civile a commencé en 1972 avec le lancement d'ERTS, rebaptisé Landsat 1, premier satellite spécialisé de télédétection des ressources terrestres, le domaine militaire avait déjà commencé à utiliser les images satellitaires depuis les années 1957. Cette date correspond au lancement du premier satellite russe dit Spoutnik 1(Site web de USGS). La période qui commence en 1957 et qui s'achève en 1972 marque les débuts de l'exploration de l'Espace et prépare l'avènement de la télédétection actuelle qui marque le début de la période moderne de la télédétection.

La performance des capteurs utilisés permet de faire un traitement des images et produire des cartes d'évolution d'occupation du sol en général et urbain en particulier.

Le rehaussement de la résolution spatiale captée par les premiers capteurs (Landsat MSS) a permis l'amélioration de la qualité des images actuelles issues de Landsat TM.

L'évolution de la ville de Bujumbura comme les autres villes du monde peut être analysée par l'utilisation des images satellitaires variées. Dans notre travail, nous nous sommes servis des images de Landsat que nous avons traitées et analysées en vue de montrer ses applications dans le domaine de l'évolution de la partie urbaine au sud de Bujumbura.

2.2. Méthodologies du travail

Dans un travail de recherche la revue de la littérature et la méthodologie sont d'une grande importance car elles permettent de puiser des informations qui permettent de circonscrire le sujet et de montrer comment l'aborder. La documentation permet de tirer des idées sur des travaux similaires ou réalisés dans le même ordre d'idées que le chercheur. De même le chercheur est appelé à définir la méthodologie utilisée pour arriver à des résultats fiables et acceptables.

2.2.1. Schéma méthodologique

Dans notre travail de recherche, nous avons utilisé les technologies des systèmes d'information géographiques (SIG) et la télédétection spatiale pour détecter la dynamique spatio- temporelle de la commune actuelle de Muha qui fait objet notre zone d'étude.
La méthodologie comporte des étapes franchies du début jusqu'à l'obtention des résultats, elle est reprise dans le schéma ci-après.

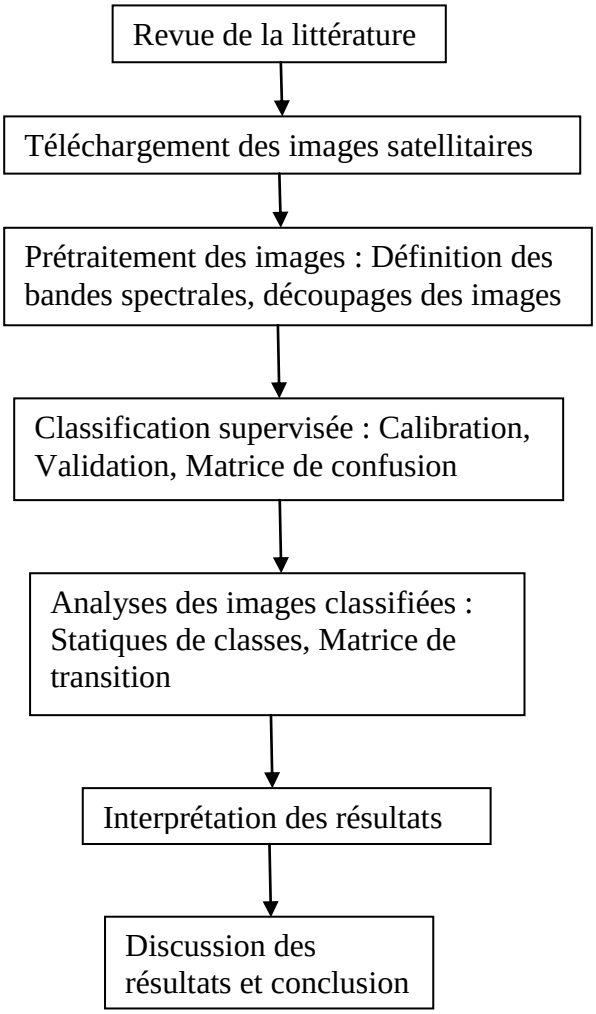


Figure 2.1: Schéma méthodologique du travail

Source : Auteur

La figure 2.1 montre la procédure de la réalisation du présent travail. Il permet d'appréhender en résumé la méthodologie, le parcours de la réalisation du travail depuis l'étape de revue de la littérature, le téléchargement et le traitement des images jusqu'à la discussion des résultats obtenus.

2.2.2. Revue de la littérature

Nous avons effectué des recherches documentaires qui nous ont permis de bien orienter notre étude et de mieux connaître notre zone d'étude.

Les connaissances acquises lors de ma formation et des études ayant des liens avec notre thématique de recherche que nous avons consultées, nous ont permis de bien aborder notre sujet de travail.

La documentation nous a fait acquérir une compréhension avancée dans les études de la dynamique spatio-temporelle (Bendraoua et Bernard, 2013*)* et de l'occupation du sol (NDIKUBWAYO, 2019). Cela nous a permis de dégager une approche méthodologique qui a guidé notre travail de recherche.

Pour bien mener ce travail de recherche, des sources différentes ont été consultées. Il s'agit entre autres des ouvrages généraux tels que « précis de télédétection » (COLOZ et COLLET, 2001), « Travaux pratiques de télédétection spatiale » (DENIS, 2016). Ces ouvrages et d'autres ont été consultés en vue d'acquérir des concepts de base, la généralité et les principes de la télédétection. Des articles et des mémoires sur l'étude de l'évolution de l'occupation (SAMAALI, 2011), Etude évolutive de la mangrove de la Baie de Caracol (LAFLEUR, 2015), étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain (NDIKUBWAYO, 2019) etc. ont été également consultés pour se familiariser avec le champ de travail et avoir l'idée sur la manière de rédiger un travail scientifique.

2.2.3. Méthodes de collecte des données

Une partie des données utilisées dans notre travail a été collectée à l'ISTEEBU. Ces dernières nous ont été utiles dans la recherche des informations en rapport avec les données statistiques de la population (ISTEEBU, 1990 et ISTEEBU, 2008) ainsi que les projections démographiques (ISTEEBU, 2020). Ces données nous ont permis de dégager l'idée sur la répartition et l'évolution de la population en général et en particulier sur la zone d'étude.

Une autre partie a consisté à l'usage des images satellitaires pour l'étude de la dynamique spatiale, la gestion et organisation de l'espace. Ces images ont été téléchargées sur le site web d'USGS, et puis, découpés aux dimensions de la zone d'étude et enfin traitées avant d'être classifiées.

2.2.3.1. Choix des capteurs

Le choix des capteurs n'a pas été un hasard, mais nous avons associé les théories apprises en classe, les connaissances sur les logiciels de traitement ainsi que la qualité des images à traiter. Ainsi deux capteurs ont été utilisés pour le choix d'image.

Il s'agit du capteur Landsat 5 TM level1 pour l'image de 1996 et du capteur Landsat 8 OLI-TIRS level-1 pour l'image de 2021. (Tableau 2.1)

Tableau 2.1: Caractéristiques des capteurs

Satellites	**LANDSAT 5 TM C1 Level 1**			**LANDSAT 8 OLI-TIRS Level-1**		
Caractéristiques des bandes	**Bandes spectrale**	**Résolution spectrale (en µm)**	**Résolution spatiale (en m)**	**Bandes spectrale**	**Résolution spectrale (en µm)**	**Résolution spatiale (en m)**
	Thematic Mapper (TM)			**Bandes spectrales de l'instrument OLI**		
	Bande 1 - Bleu	0,45 - 0,52	30	Bande 1 - Aérosols	0,433 - 0,453	30
	Bande 2 - Vert	0,52 - 0,60		Bande 2 - Bleu	0,450 - 0,515	
	Bande 3 - Rouge	0,63 - 0,69		Bande 3 - Vert	0,525 - 0,600	
	Bande 4 - PIR	0,76 - 0,90		Bande 4 - Rouge	0,630 - 0,680	
	Bande 5 - MIR 1	1,55 - 1,75		Bande 5 - PIR	0,845 - 0,885	
	Bande 6 - IRTh	10,4 - 12,5	120	Bande 6 – MIR 1	1,560 - 1,660	
	Bande 7 - MIR 2	2,08 - 2,35	30	Bande 7 – MIR 2	2,100 - 2,300	
	-	-	-	Bande 8 - Pan	0,500 - 0,680	15
	-	-	-	Bande 9 - Cirrus	1,360 - 1,390	30
	-	-	-	**Bandes spectrales de l'instrument TIRS**		
	-	-	-	Bande 10 - IRM	10,30 - 11,30	100
	-	-	-	Bande 11 - IRM	11,50 - 12,50	
Fauchée	170 x 185 km			170 km x 185 km		
Cycle orbital	16 jours			16 jours		
Format des images	GEOTIFF			GEOTIFF		

Source : http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/teled2/memotele/mem33tel.htm (consulté le 20/8/2022)

En analysant le tableau 2.1, nous avons constaté que le capteur Landsat 8 est amélioré par rapport au capteur Landsat 5.

Landsat 8 compte 11 bandes réparties en 2 instruments OLI et TIRS embarqués dans un même satellite tandis que Landsat 5 ne compte que 7 bandes seulement. Les résolutions spatiales sont variables mais la grande majorité de bandes a une résolution de 30x30m.

La couverture totale de l'image (Fauché) est de 170x180Km pour toutes les deux images. La durée du cycle orbitale est de 16 jours et est identique sur les deux images.

2.2.3.2. Choix et description des images

Nous avons utilisé les images du programme Landsat qui est le premier programme spatial d'observation de la Terre destiné à des fins civiles. Ce programme a une mission d'observation spatiale civile de la terre. Ce sont des images gratuites et accessibles sur le site web de l'USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/).

Il est sous la responsabilité de la «National Aeronautics and Space Administrator» (NASA), laquelle est une agence du gouvernement des Etats-Unies d'Amérique, spécialisée dans la recherche aéronautique et aérospatiale. La mission Landsat dispose d'une longue série d'archives d'images satellitaires d'observation de terre qui permettent de suivre l'évolution des phénomènes environnementaux.

2.2.3.3. Choix des images

Les images que nous avons utilisées dans le présent travail ont été téléchargées sur un site web de l'USGS. Il s'agit des images des capteurs Landsat TM pour l'année 1996 et du capteur Landsat 8 OLI-TIRS pour l'année 2021. Nous avons préféré utiliser 2 images prises dans les mêmes conditions d'ensoleillement, pour ce, toutes les deux ont été prises au mois de juillet. Cela nous permet de détecter les changements et de faire une bonne analyse et interprétation des images.

En télédétection spatiale, une étude comparée doit se faire en utilisant des images prises dans les mêmes conditions d'éclairement solaire et sur les mêmes périodes de l'année d'où alors nous avons préféré les images de la saison sèche, au mois de juillet où la couverture nuageuse est très faible dans notre région. Ces dernières présentent des caractéristiques climatiques similaires et aussi sont traitables à l'aide de notre logiciel. Certes, d'autres images existent mais les écarts de leurs dates pourraient apporter des difficultés dans l'analyse et l'interprétation. Le tableau 2.2 montre les informations détaillées sur les caractéristiques des images.

Tableau 2.2: Synthèses caractéristiques des images découpées

Satellites	Date d'acquisition	Couverture nuageuse de la zone découpée	Nombre de bandes
Landsat 5 TM	30/07/1996	0%	7
Landsat 8 OLI-TIRS	19/07/2021	0%	12

Source : Auteur à base des images découpées

Les données du tableau montrent que les images ont été prises à des dates très proches de la saison sèche en juillet.

La couverture nuageuse globale des images est variable, elle de 4% pour l'image de 1996 tandis qu'elle est de 1,54% pour l'image de 2021.

Néanmoins, cette couverture est de 0% pour la partie découpée concernant notre zone d'étude ce qui rassure de la qualité des données traitées. La résolution spatiale est de 30m d'une façon générale, elle ne varie que dans les bandes des moyens infrarouges, IRTh et panchromatique.

2.2.3.4. Description des images

Les deux images couvrent la même bande, elles s'étendent sur une partie nord-ouest du Burundi, le sud-ouest du Rwanda et une partie de la province du sud Kivu en République démocratique du Congo. Le système de projection utilisé est "WGS84" UTM_ZONE 35 S (figure 2.2).



Figure 2.2: Zone couverte par l'image Landsat chemin (Path) 173 et ligne (Row) 062

Source : Site web d'USGS[14]

[14] https://earthexplorer.usgs.gov

Chaque image possède son propre numéro d'identification(ID) et le Chemin (Path)/ 173 lignes (Row) 062 mais aussi une référence. Les figures suivantes nous montrent en scènes complète, les deux images utilisées.

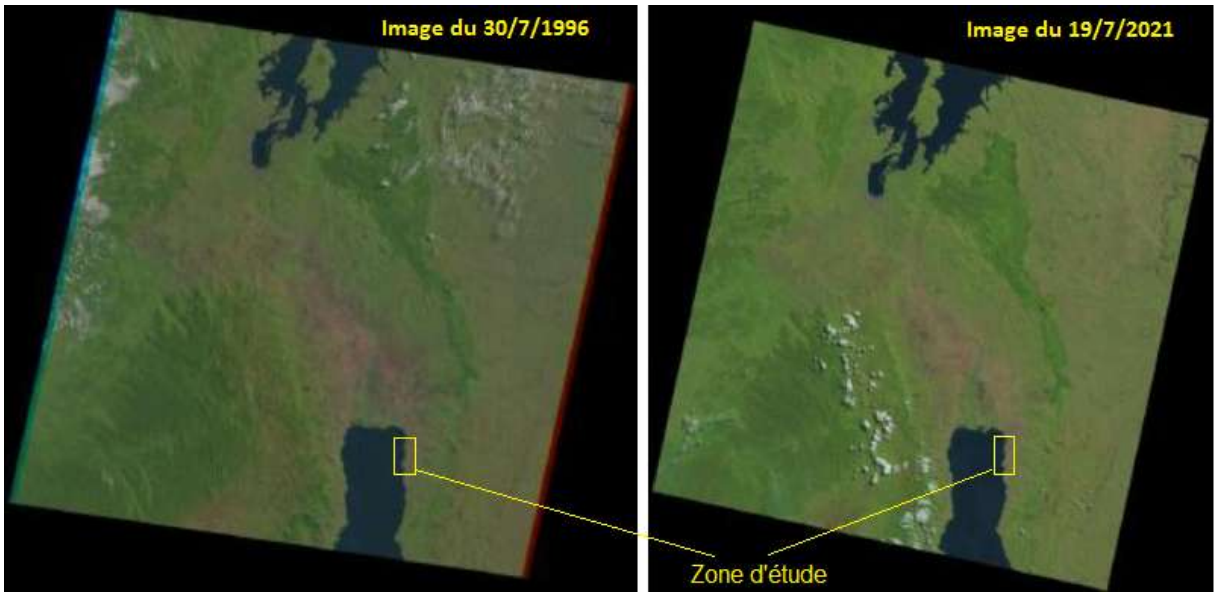


Figure 2.3: Image de la Scène complète de Landsat 5 et Landsat 8

Source : Auteur à base des images du site web d'USGS

Ces images (figure 2.3) montrent dans la partie inférieure, une partie du Burundi faisant l'objet d'étude du fait que même la partie nord du lac Tanganyika est visible. C'est dans cette partie où se trouve notre zone au Nord-Est de ce lac. Sur cette image, l'eau reflète dans le bleu foncé, les nuages dans le blanc, la Végétation dans le vert, tandis que les sols non couverts représentent la couleur magenta. Chaque image dispose de son identificateur et l'identificateur de la scène, de la date et l'heure d'acquisition, de la catégorie et du numéro de collecte. La couverture nuageuse terrestre de scène ainsi que les coordonnées sont également indiquées. Chaque image dispose aussi d'une réflectance dans la thermique, ce qui traduit que le capteur utilisé dispose d'une bande thermique et donc enregistre toutes les informations du domaine de l'infrarouge. La projection utilisée est celle de UTM, WGS84, zone 35 Sud.

Les détails sur les descriptifs propres à chacune des images qui concernent notre travail se trouvent dans les tableaux en annexe.

2.3. Prétraitement des images

Les images brutes sont très vastes et couvrent une grande zone (le fauché total est de 170Km x 180Km). Cette superficie est de loin supérieure à notre zone d'intérêt, d'où alors il est nécessaire de découper les images pour rester avec la partie concernée par cette étude.
Plus la zone est plus petite, plus l'extraction des informations est facile ainsi que son analyse et interprétation.
Dans le découpage des images, le traitement et la classification, des logiciels QGIS et spécialement ENVI ont été utilisés.

Lors de la classification, comme notre zone d'étude est limitée à l'ouest par le Lac Tanganyika, nous avons intégré une zone côtière du lac que nous avons scindé en 2 classes thématiques pour avoir l'idée sur l'état de l'eau de cette zone côtière du lac.
Le travail de prétraitement est un long processus qui consiste à définir les bandes à utiliser d'abord. Ainsi, pour l'image de 1996, nous avons choisi les bandes 5, 4 et 3 du satellite Landsat5. Ces images ont été codées en RVB pour obtenir une composition colorée avant de procéder au découpage.

La figure 2.4 présente l'image de la zone d'étude codée en RVB et découpée aux dimensions réelles actuelles de la commune Muha.



Figure 2.4: Image satellitaire de 1996 découpée aux dimensions de la zone d'étude

Source : Auteur, à base de l'Image Landsat 5 du 30/07/1996

En analysant cette image après codage RVB, nous pouvons identifier certains aspects de l'occupation du sol. Il est possible de distinguer les parties couvertes de végétations de celles non couvertes.

Concernant l'image de 2021, les bandes 6, 5 et 4 ont fait objet de la réalisation de la composition colorée fausse couleur par codage en RVB. Comme pour le cas de l'image de 1996, nous avons découpé l'image pour l'adapter à la zone d'étude (figure 2.5).

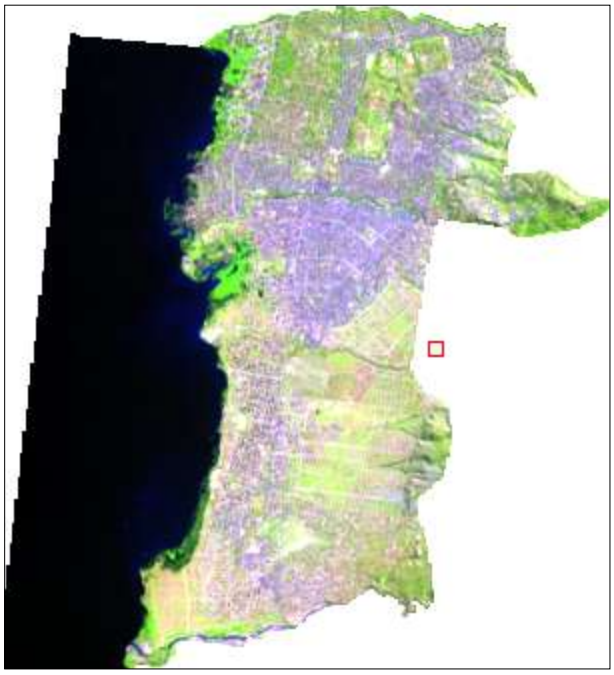


Figure 2.5: Image satellitaire de 2021 découpée aux dimensions de la zone d'étude

Source : Auteur, à base de l'Image Landsat 8 du 19/07/2021

La figure 2.5 donne l'idée globale de l'occupation du sol parce que nous avons codé l'image en RVB en utilisant les bandes 6, 5 et 4 qui montrent une composition fausse couleur où les objets aux couleurs les plus vives peuvent déjà être perceptibles à l'œil, avant la classification qui permettra de distinguer les différents pixels constituants chaque classe .

Le constat est que si on observe les deux images, on constate qu'il y a une différence. Il reste à analyser pourquoi et interpréter leurs significations. Ainsi, il convient de combiner les bandes spectrales en une seule image composée de plusieurs bandes pour rendre la manipulation plus facile afin que les traitements se fassent simultanément sur l'ensemble des bandes regroupées (Denis, 2016).

Pour ce faire, nous nous sommes servis du logiciel de télédétection ENVI 5.0 qui nous a permis de faire le traitement des images.

Les images découpées au départ présentent des formes rectangulaires, qui sont différentes de la zone d'intérêt. Par la création d'une couche de masque, nous avons obtenu des images qui couvrent la zone d'étude, avec lesquelles les classifications ont été faites.

2.4. Traitement des images

Le traitement des images exige de franchir plusieurs étapes pour obtenir des résultats fiables. C'est une procédure technique à laquelle on doit attacher un accent particulier car les erreurs commises à ce stade peuvent compromettre les résultats ou exiger de reprendre toute la procédure depuis le début.

2.4.1. Composition colorée

Pour mieux mener le traitement des images, nous avons procédé par la réalisation d'une composition colorée pour chaque image utilisée. Le nombre de canaux dont disposent les capteurs qui ont fournis les images est variable. Le capteur Landsat 5 dispose de 7 bandes tandis que Landsat 8 dispose de 11 bandes. Pour les 2 capteurs, nous avons choisi 3 bandes pour chacun qui nous ont permis de réaliser cette composition colorée. Ces bandes choisies ne sont pas identiques partout mais leur codages varient en fonction de l'image. Selon LAFLEUR (2015), la technique de composition colorée est utilisée afin de mieux visualiser les différents objets des images.

Après la combinaison, nous avons obtenu des compositions fausses couleurs. Les images obtenues sont proches de ce que nous pouvons observer ou voir sur une photo simple (voir les figures 2.4 et 2.5). La réflectance de certains éléments de la surface est perceptible. Il nous reste à réaliser la classification supervisée pour voir réellement les différents éléments d'occupation du sol. La première idée de détermination des classes dont nous nous sommes servis dans la classification découle de cette étape. Non seulement l'occupation du sol mais aussi comme notre zone d'étude est délimitée à l'ouest par le Lac Tanganyika, une petite partie de ce dernier a été retenue et fait l'objet d'analyse des variations qui se sont produites le long du lac, pour les eaux côtières.

2.4.2. Classification

Il existe deux sortes de classifications et notre logiciel ENVI 5.0 peut les réaliser toutes. L'une est dite classification non supervisée et l'autre classification supervisée.

2.4.2.1. Classification non supervisée

Pour la classification non supervisée, le gros du travail est réalisé par le logiciel. L'auteur active l'outil de classification « unsupervised » et l'image à classifier et puis le logiciel détermine lui-même le nombre de classes et réalise la classification afin de sortir le résultat. Cette classification donne des résultats mêlés où même plusieurs éléments peuvent se retrouver dans un même pixel.

2.4.2.2. Classification supervisée

Concernant classification supervisée, l'auteur est au centre du travail et guide toutes les étapes de la classification suivant la thématique préétablie. Ainsi, la classification supervisée a été choisie pour mieux élucider la thématique de ce travail de recherche.

Elle a été possible grâce au Logiciel ENVI 5.0, par son outil dit « Maximum Likelihood » (Maximum de vraisemblance) qui permet d'identifier les pixels les plus vraisemblables dans la signature spectrale de l'image classifiée. Il est plus important de travailler sur une zone connue, car la connaissance du milieu est un atout du fait que la maîtrise du terrain peut donner un complément d'informations pour le temps présent.

La connaissance du terrain contribue aussi dans l'analyse des résultats parce que s'il s'observe des irrégularités, l'auteur peut directement reconnaître, interférer et revoir la classification. Pour réaliser la classification supervisée nous avons fait recours à plusieurs étapes dont les plus importantes sont évoquées ci-après.

1°. Définition des classes

Les classes spectrales correspondent aux classes thématiques que nous avons définies pour les deux images. Il s'agit de 7 classes suivantes :

- Sol nu ;
- Sol très faiblement couvert ;
- Sol faiblement couvert ;
- Sol moyennement couvert ;

- Bâti ;
- Eau Pâle ;
- Eau turbide.

Cette étape est pertinente car elle donne l'idée globale de toutes les thématiques que l'on rencontre sur terrain une fois que l'on effectue une visite. Elle influence les résultats de la classification, d'où la prudence qu'il faut pour se rassurer que toutes les classes spectrales qui se trouvent sur l'image vont être détectées lors de la classification proprement dite.

2°. Détermination des aires d'entraînement ou Region Of Interest (ROI) de classification

La classification exige la détermination des aires d'entraînement sur lesquelles se font toutes les opérations. Pour cette étape, nous avons utilisé l'outil de classification supervisée avec un maximum de vraisemblance en définissant les ROI. Dans cette opération, on doit définir au moins 30 pixels pour chaque classe du spectre classifié. Ces pixels constituent un échantillon représentatif pour la calibration de la classification supervisée.

Selon (Denis, 2016), elles sont définies à l'écran par la numérotation d'un ou plusieurs polygones représentatifs de chaque classe spectrale. Cela ne signifie pas que l'on doit chaque fois définir 30 pixels, ces derniers ne sont qu'un seuil de référence minimal car en dessous de ce nombre, l'échantillon n'est pas représentatif ; néanmoins l'échantillon peut compter plus de 30 pixels. Cette opération de la détermination des thématiques et des échantillons se retrouve dans la phase appelée calibration (tableau 2.3).

Tableau 2.3: ROI de Calibration

Nom de Classe	Image de 1996		Image de 2021	
	Polygones	Pixels	Polygones	Pixels
Sol nu	15	38	6	38
Sol très faiblement couvert	15	95	8	58
Sol faiblement couvert	7	34	4	40
Sol moyennement couvert	7	61	9	84
Bâti	14	50	32	147
Eau Pâle	27	82	10	70
Eau turbide	7	33	11	70
Total	**92**	**393**	**80**	**507**

Source : Auteur, à partir de la classification

Le tableau2.3 montre le nombre de polygones utilisés pour trouver les pixels correspondant. Le constat est que les pixels comme les polygones varient d'une classe à l'autre.

Plusieurs paramètres sont considérés afin que l'on se rassure de la vraisemblance maximale des éléments d'une classe. A travers ce tableau, nous constatons que toutes les classes ont été considérées pour l'image satellitaire de 1996 et celle de 2021.
Néanmoins, les polygones et les pixels varient en fonction des classes de l'image, mais le principe est d'utiliser des polygones qui génèrent au minimum 30 pixels pour chaque classe de l'image classifiée.

2.4.3. Validation de la classification supervisée

La classification supervisée bien qu'elle soit une étude minutieuse qui demande beaucoup de temps pour trouver les résultats précis sur la vraisemblance des pixels qui constituent l'image classifiée, doit être validée.

Des méthodes variées peuvent être utilisées pour valider la classification. Il s'agit de la validation par une nouvelle matrice de confusion ou par visite de terrain. Selon A. LAFLEUR (2015), la validation de la classification peut se faire par de nombreuses méthodes centrées sur les résultats de la classification. Dans le présent travail, nous avons préféré utiliser la validation par matrice de confusion. Ce choix est issu d'une étude très poussée sur le fait que les images traitées ont été prises à des dates différentes et que la première est plus ancienne et la seconde date d'une année ce qui traduit que le terrain a déjà connu des modifications. Seule la validation à l'aide des images est la plus fiable. C'est une technique qui consiste à définir des nouveaux ROI identiques à ceux utilisés dans la calibration et on procède de la même manière que pour la calibration. Elle exige aussi de déterminer le même nombre de classes et d'utiliser le nombre de pixels toujours supérieur à 30 comme pour la calibration.

Le choix, quoique aléatoire, se fait dans les zones où l'on est sûr de la correspondance à la classe à valider (Denis, 2016). Cette opération se fait dans le même ordre et démarches que pour la calibration. Elle se base sur la définition des pixels les plus vraisemblables que possible. Les polygones utilisés découlent de l'identification des pixels qui reflètent une vraisemblance maximale pour une même classe thématique sur l'image. Ces classes doivent être égales à celles utilisées dans la calibration (Tableau 2.4).

Tableau 2.4: ROI de validation de la classification

Nom de Classe	Image de 1996		Image de 2021	
	Polygones	Pixels	Polygones	Pixels
Sol nu	10	32	5	34
Sol très faiblement couvert	3	34	7	47
Sol faiblement couvert	6	34	4	40
Sol moyennement couvert	6	41	7	54
Bâti	8	35	17	106
Eau Pâle	5	38	9	63
Eau turbide	6	35	7	66
Total	**44**	**249**	**56**	**410**

Source : Auteur

D'après les données du tableau précédent, il ressort que les nombres des pixels utilisés sont partout supérieurs à 30, ce qui est recommandé pour une classification supervisée. De même, les polygones varient dans le but d'avoir un échantillon constitué par des pixels les plus vraisemblables. Même si les totaux des pixels utilisés pour les deux images sont différents, cela n'a rien à avoir avec les pixels que l'on utilise pour chaque image et n'a aucun impact sur la classification. L'important est que chaque classe thématique renferme au moins 30 pixels. La matrice des données permet de faire une appréciation de la classification supervisée et de trouver le degré de précision globale de la classification.

2.4.3.1. Degré de précision globale

La précision globale est le rapport entre le nombre de pixels classifiés par le nombre de pixels de validation. Une classification est fiable et exploitable si et seulement si la précision globale est à 80% (A LAFLEUR, 2016). De ce passage, il ressort que la précision globale de la classification doit être supérieure à 80% pour que la classification soit fiable. Pour notre cas, cette précision dépasse 90% de la classification pour toutes les deux images classifiées, ce qui nous a permis de confirmer que nous sommes largement dans la marge de précision globale exigée pour les deux images utilisées. Cela signifie que 92,70% de la classification sont fiables pour l'année 1996 contre 93,17% pour l'année 2021. Ces valeurs proviennent des matrices des confusions réalisées après classifications pour les 2 années considérées.

De même, le coefficient de Kappa est utilisé pour l'analyse de la précision de la classification.

2.4.3.2. Coefficient de Kappa

Le Coefficient de Kappa est une mesure statistique pour valider les résultats de la classification supervisée. Il est calculé en même temps que la précision globale de classification. Il est déterminé par l'outil statistique du logiciel utilisé pour la classification (ENVI 5.0).

Le tableau suivant nous montre les valeurs du coefficient de Kappa et leurs significations.

Tableau 2.5: Coefficient de Kappa

Valeurs de l'Indice de Kappa	Accord de précision
0-20	Mauvais
0,21-0,40	Médiocre
0,41-0,60	Bon
0,61-0,80	Fort
0,81-1	Excellent

Source : https://www.reseau-naissance.fr

Les valeurs du coefficient de Kappa sont comprises entre 0 et 1 comme l'indiquent les données du tableau 10. Plus la valeur trouvée est proche de 1, plus la fiabilité de la classification est excellente. Pour notre cas, les coefficients sont 0.9109 et 0.9186 respectivement pour les années 1996 et 2021.

CHAPITRE III : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

3.1. Analyse des résultats de la classification

Les résultats qui font l'objet d'analyse et d'interprétation émanent de la classification supervisée de deux images utilisées pour mettre en évidence l'évolution de l'occupation du sol de la zone d'étude. Après la classification supervisée, nous avons obtenu deux cartes thématiques pour chaque année considérée par combinaison des logiciels ENVI 5.0 et QGIS. A partir des classes thématiques utilisées, nous avons opéré une restitution statistique grâce aux outils de ENVI 5.0 qui nous ont permis de réaliser des tableaux matriciels qui complètent les cartes thématiques effectuées. Ensuite, nous avons fait une comparaison des résultats obtenus par compilation des données de ces deux années afin d'appréhender la dynamique spatio-temporelle de la zone d'étude. Les résultats obtenus ont été interprétés pour dégager une idée générale sur la période comprise entre 1996 et 2021.

Nous avons réalisé les calculs statistiques des classes thématiques pour trouver les nombres des pixels classifiés, les superficies concernées et l'évolution qui en découle. Cela a été possible grâce l'outil « post classification » du logiciel ENVI 5.0. Les résultats se présentent sous forme d'une matrice de confusion des données de l'outil « confusion matrix » du même logiciel. A partir des ces résultats, le même outil a été utilisé pour réaliser une nouvelle matrice dite matrice de transition qui permet d'appréhender les changements au sein des classes. C'est la méthode permettant de décrire d'une manière condensée, sous formes de matrices carrées, les changements d'état des éléments composant le paysage pendant une période donnée (MKWA NGAMBA, J., 2010).

La matrice de confusion est composée des pixels à l'état initial et ceux à l'état final. Elle renseigne également sur la distribution spatiale à ces deux états respectivement pour l'année 1996 et 2021. Les points suivants montrent toutes ces situations ainsi que l'état des lieux des cartes thématiques obtenus à la fin de la classification.

3.2. Présentation des résultats cartographiques d'occupation du sol

Pour réaliser les cartes thématiques, nous avons d'abord utilisé le logiciel ENVI5.0 pour faire la classification et les résultats se pressentent sous forme d'un croquis. Ensuite, nous avons exporté les résultats sous forme d'images Rasters dans le logiciel QGIS qui nous a permis de mettre toutes les informations en rapport avec l'habillage de la carte. A ce stade, nous avons défini le système de projection pour les deux cartes : il s'agit de WGS84 UTM/zone 35s.

3.2.1. Occupation du sol en 1996

A la fin de la classification et de traitement, nous avons obtenu la carte suivante.

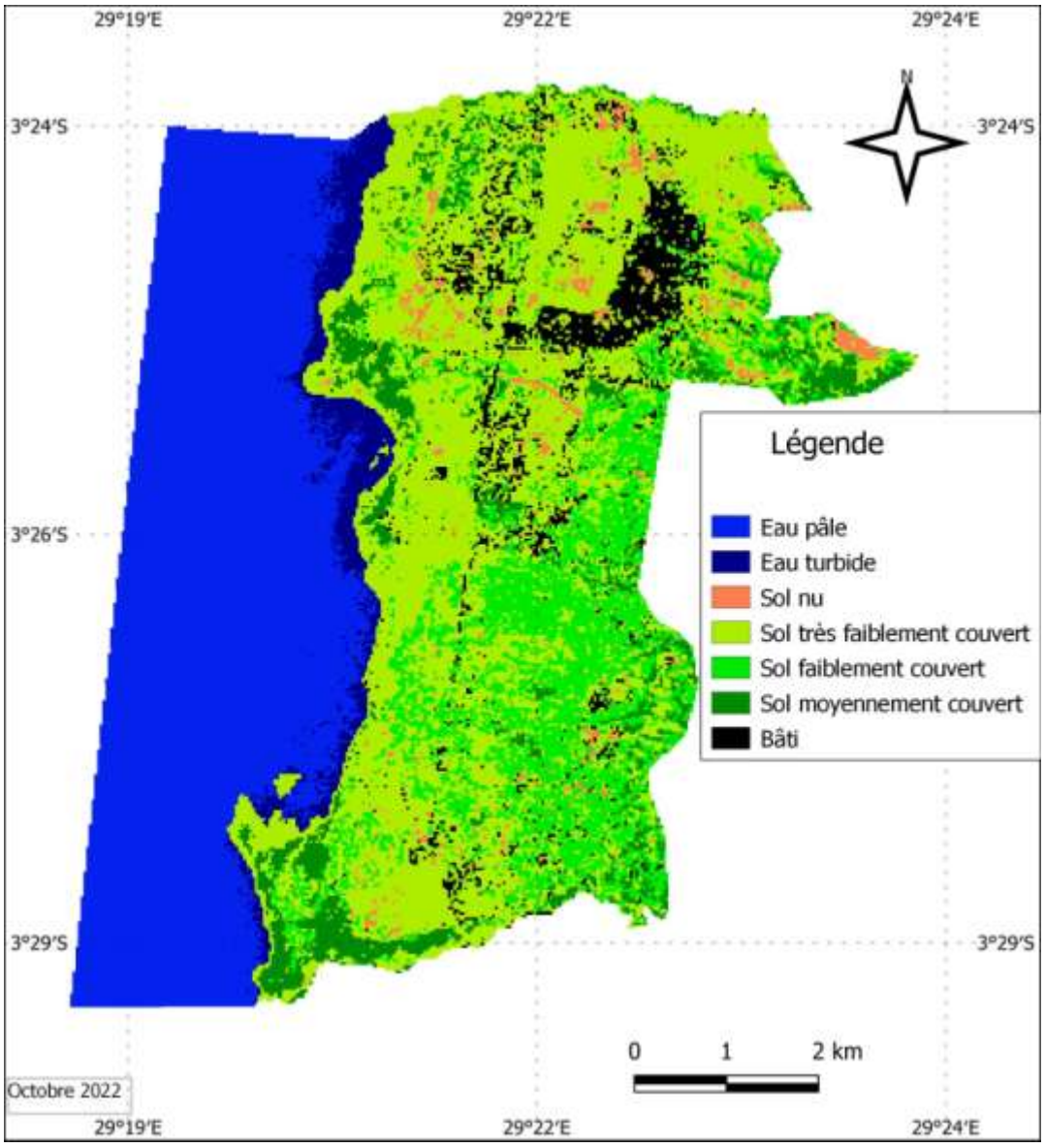


Figure 3.1: carte d'occupation du sol de la zone d'étude en 1996

Source : Auteur

En analysant la carte (figure 3.1), nous constatons qu'en 1996, la zone bâtie représente une faible portion, ce qui montre qu'il y avait encore des espaces vides. La concertation du bâti s'observe vers le Nord-Est de la zone d'étude. Ailleurs, il ne se remarque que du bâti dispersé surtout vers le Sud. Les classes de sol très faiblement couvert, sol faiblement couvert et sol moyennement couvert représentent de vastes étendues des espaces non bâtis. Cela montre que jusque lors, les activités agricoles occupaient une grande partie ou encore que ces espaces pourraient recevoir des nouveaux bâtiments.

Enfin, la classe de sol non couvert (sol nu) est identifiable de façon éparpillée sur la carte. Cette dernière peut aussi recevoir des bâtiments si elle est située dans la zone aménageable ou encore être mise en culture en saison de pluie si les conditions le permettent.

3.2.2. Occupation du sol en 2021

De même pour cette image, la classification résulte du logiciel ENVI5.0 et les résultats de la classification sont représentés sur la carte ci-après.

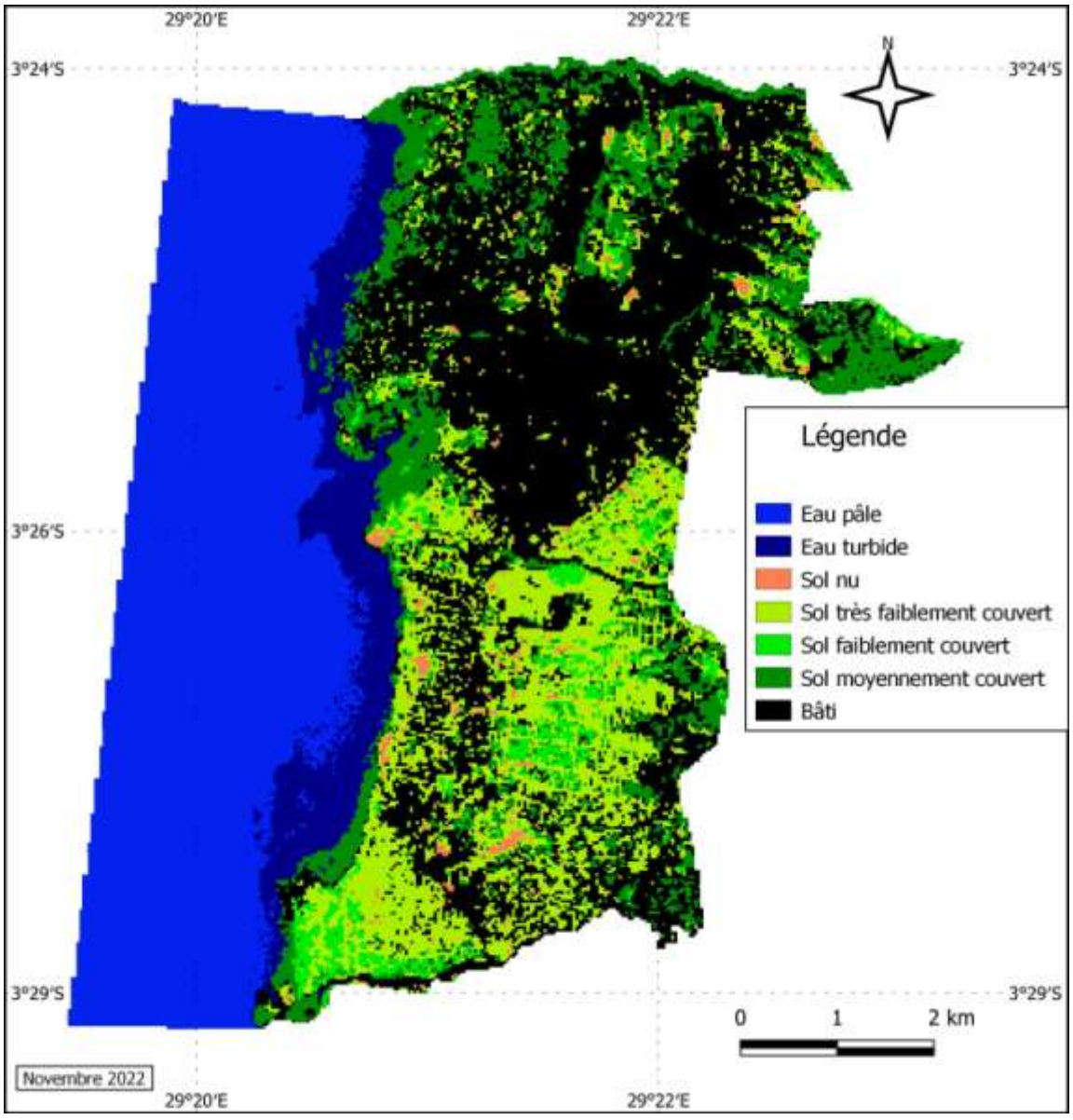


Figure 3.2: carte d'occupation du sol de la zone d'étude en 2021

Source : Auteur

L'occupation du sol de la zone d'étude a connu des modifications remarquables pendant une période de 25 ans (figure 3.2).

Pour mieux mener notre analyse, nous avons considéré les mêmes classes thématiques que pour la carte précédente pour représenter la carte de 2021. Il est évident que les classes devraient être inchangées du fait que nous allons nous servir de ces mêmes classes pour dégager une évolution d'occupation du sol pour permettre d'analyser s'il y a eu des changements à l'intérieur des classes.

En analysant la carte, nous remarquons que la surface bâtie occupe une place importante au Nord et est concentrée dans les zones Musaga, Kanyosha et Kinindo tandis que sur les extrêmes périphéries -Est et Sud, le bâti n'est pas très concentré. Toutefois, les classes de sol nu, sol très faiblement couvert, sol faiblement couvert et sol moyennement couvert sont toujours remarquables sur la carte, ce qui signifie que les espaces non bâtis sont encore disponibles. Enfin les classes de l'eau pâle et eau turbide du lac Tanganyika sont aussi visibles, il reste à savoir s'il y a eu des modifications importantes à leurs seins, mais il se remarque déjà que la surface de l'eau turbide est plus vaste qu'en 1996. L'analyse des données quantitatives des classes thématiques est la meilleure façon de distinguer avec exactitude les évolutions qui ont été observées au cours de cette période.

3.3. Interprétation des résultats statistiques de la classification

Après la classification qui nous a permis de trouver les résultats cartographiques précédents, il est incontournable de passer à la vérification de la classification et par conséquent de ses données statistiques. Cette vérification se fait par interprétation des résultats sous forme de tableaux matriciels obtenus à la fin de la classification.

3.3.1. Matrice de confusion des résultats de la classification de l'image de 1996

Le tableau ci-après nous présente les données quantitatives résultant de post classification.

Tableau 3.1: Matrice de confusion des résultats de la classification de 1996

		situation de Validation									
		Eau pâle	Eau turbide	Sol nu	Sol très faiblement couvert	Sol faiblement couvert	Sol moyennement couvert	Bâti	**Total**	**Erreur de commission**	**Degré Précision**
situation de Classification	Eau pâle	38							**38**	**0/38 (0%)**	**38/38 (100%)**
	Eau turbide		35						**35**	**0/35 (0%)**	**35/35 (100%)**
	Sol nu			29					**29**	**0/29 (0%)**	**29/29 (100%)**
	Sol très faiblement couvert			3	34	7	3	3	**50**	**16/50 (32,0%)**	**34/50 (68,00%)**
	Sol faiblement couvert					24			**24**	**0/24 (0%)**	**24/24 (100%)**
	Sol moyennement couvert					3	38		**41**	**3/41 (7,32%)**	**38/41 (92,68%)**
	Bâti							32	**32**	**0/32 (0%)**	**32/32 (100%)**
	Total	**38**	**35**	**32**	**34**	**34**	**41**	**35**	**249**		
	Erreur d'omission	**0/38 (0%)**	**0/35 (0%)**	**3/32 (9,37%)**	**0/34 (0%)**	**10/34 (29,41%)**	**3/41 (7,32%)**	**3/35 (8,57%)**		**7,63%**	
	précision de production	**38/38 (100%)**	**35/35 (100%)**	**29/32 (90,63%)**	**34/34 (100%)**	**24/34 (70,59%)**	**38/41 (92,68%)**	**32/35 (91,43%)**			**92,37%**

Source : Auteur

Les données du tableau 3.1 montrent l'emplacement des pixels selon leurs classifications.

Le constat est que les pixels bien classés sont en diagonale tandis les autres font objet d'erreurs de commission et d'omission. De ce qui précède, nous remarquons que seuls les pixels de classes thématiques d'eau pâle, eau turbide et sol très faiblement couvert ont été bien classifiés à 100%. La classe du bâti regorge une précision de 91,43% tandis que le sol nu et sol faiblement couvert sont bien classifiés à 90,6% et 70,59% respectivement. Le sol moyennement couvet est bien classés à 92,68%. Cela permet de tirer l'idée sur l'erreur des pixels mal classés qui sont représentés dans la ligne d'erreur d'omission. Il s'agit de la différence entre le 100% de la classe par la précision de la réalisation de la classification.

Par le même tableau, en colonne des totaux, nous déduisons le total des pixels classifiés dans chaque classe thématique (Tableau 3.1).

A partir de cette colonne, on tire l'idée sur le degré de précision globale de la classification. Ainsi, la précision a été de 100% pour 5 classes tandis qu'elle regorge d'erreurs de commission et d'omission pour les deux classes qui restent. L'erreur globale de la classification est de 7,63% tandis que la précision globale est de 92,37% et est de loin supérieure à la précision recommandée pour que la classification soit fiable. Une classification est fiable si et seulement si la précision globale est supérieure à 80%. De cela alors, notre classification est bonne car elle respecte les normes.

Les erreurs de commission et d'omission découlent du rapport entre le nombre de pixels correctement classifiés et le nombre de pixels de validation. Elles sont calculées par l'outil post classification en même temps que la matrice de confusion et permettent de juger la fiabilité de la classification. C'est à partir de ce rapport que l'on constate si l'image est bien classifiée ou non. Ces erreurs influencent beaucoup sur la précision de la classification, elles ne doivent pas atteindre 20% pour une bonne classification. Une fois que ces erreurs sont élevées, il est mieux de reprendre la classification.

3.3.2. Matrice de confusion des résultats de la classification de l'image de 2021

La matrice de confusion de 2021 a été réalisée grâce à l'outil Post-classification de ENVI5.0 et se présente dans le tableau ci-après.

Tableau 3.2: Matrice de confusion des résultats de la classification de 2021

		situation de Validation									
		Eau pâle	Eau turbide	Sol nu	Sol très faiblement couvert	Sol faiblement couvert	Sol moyennement couvert	Bâti	**Total**	**Erreur de commission**	**Degré Précision**
situation de Classification	Eau pâle	63							**63**	**0/63 (0%)**	**63/63 (100%)**
	Eau turbide		61						**61**	**0/61 (0%)**	**61/61 (100%)**
	Sol nu			34					**34**	**0/34 (0%)**	**34/34 (100%)**
	Sol très faiblement couvert				44			12	**56**	**12/56 (21,43%)**	**44/56 (78,47%)**
	Sol faiblement couvert				2	36			**38**	**2/38 (5,26%)**	**36/38 (94,74%)**
	Sol moyennement couvert		4			4	50		**58**	**8/58 (13,79%)**	**50/58 (86,21%)**
	Bâti		1		1		4	94	**100**	**6/100 (6%)**	**94/100 (94%)**
	Total	**63**	**66**	**34**	**47**	**40**	**54**	**106**	**410**		
	Erreur d'omission	**0/63 (0%)**	**5/66 (7,58%)**	**0/34 (0%)**	**3/47 (6,38%)**	**4/40 (10%)**	**4/54 (7,41%)**	**12/106 (11,32%)**		**6,83%**	
	précision de production	**63/63 (100%)**	**61/66 (92,42%)**	**34/34 (100%)**	**44/47 (93,62%)**	**36/40 (90%)**	**50/54 (92,59%)**	**94/106 (88,68%)**			**93,17%**

Source : Auteur

Le tableau 3.2 présente les résultats matriciels de la classification de l'image de 2021 où les données sont en ligne et en colonne. Nous constatons que les pixels des classes thématiques de l'eau pâle et sol nu ont été classifiés à 100% sans erreur d'omission ni de commission. Les précisions sont variables pour les classes de sol très faiblement couvert (93,62%), sol faiblement couvert (90%), sol moyennement couvert (92,59%), bâti (88,68%) et l'eau turbide (92,42%). L'erreur de précision globale est de 6,83% contre un degré de précision global de 93,17% toujours supérieur au seuil de 80% recommandé pour juger la classification fiable. Ce qui nous permet de conclure que la classification est bonne car elle respecte les normes et ces résultats nous permettent alors d'analyser la dynamique spatio-temporelle (1996-2021). Cette précision dépend de la qualité d'images, de la technique utilisée et de l'outil de traitement.

Les erreurs de commission et d'omission élevées ($\geq$ 20%) émanent d'une mauvaise précision des pixels classifiés, la proportion du rapport de pixels de calibration et ceux de validation est faible.

Cette situation traduit qu'il est nécessaire de reprendre la classification pour rehausser la précision et diminuer les erreurs car pour une bonne classification, la précision doit être supérieure à 80% de la classification.

3.4. Analyse de la dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol entre 1996 et 2021

Pour détecter les variations d'occupation spatiale entre les années 1996 et 2021, il est indispensable de réaliser une matrice de transition et d'en déduire les évolutions des pixels et celles des superficies.

3.4.1. Evolution d'occupation du sol entre 1996 et 2021

Les données utilisées pour détecter les changements sont issues du même logiciel utilisé pour classification, via l'outil « Change detection statics » de post-classification. Les résultats sont repris dans les tableaux suivants.

Tableau 3.3: Matrice de transition entre 1996 et 2021

		Situation finale en 2021							
		Eau pâle	Eau turbide	Sol nu	Sol très faiblement couvert	Sol faiblement couvert	Sol moyennement couvert	Bâti	**Total**
situation initiale en 1996	Eau pâle	20281	283	0	137	0	26	0	**20727**
	Eau turbide	1830	1564	1	841	4	186	8	**4434**
	Sol nu	0	8	73	395	94	17	22	**609**
	Sol très faiblement couvert	2	25	399	5163	3307	475	336	**9707**
	Sol faiblement couvert	2	22	70	702	696	422	18	**1932**
	Sol moyennement couvert	111	402	125	3976	1618	1626	248	**8106**
	Bâti	47	122	460	11520	3604	1553	2751	**20057**
	Total	**22273**	**2426**	**1128**	**22734**	**9323**	**4305**	**3383**	
	changement par classe	**1992**	**862**	**1055**	**17571**	**8627**	**2679**	**632**	
	Différence	**-1546**	**2008**	**-519**	**-13027**	**-7391**	**3801**	**16674**	

Source : Auteur

Les données de ce tableau ci-haut montrent la combinaison de deux situations pour 2 années différentes. Il s'agit de la situation initiale ou de départ comptant pour l'année 1996 et de la situation finale pour l'année 2021. Les totaux en lignes représentent la situation globale de départ tandis que ceux en colonnes montrent la situation finale de la classification. Pour chaque classe s'observent des changements et c'est dans ces totaux qu'on analyse les variations opérées à l'intérieur d'une classe ou entre les classes au cours de la période. Pour notre cas, les changements s'observent dans toutes les classes, comme le prouvent les données du tableau.

Afin d'appréhender rapidement les changements opérés, le tableau synthèse dérivé du tableau précédent est mieux indiqué.

Tableau 3.4: Evolution entre 1996 et 2021

	Année		Evolution	
	1996	2021	Evolution des pixels	Taux (en %)
Eau pâle	22273	20727	**-1546**	**-6,94**
Eau turbide	2426	4434	**2008**	**82,77**
Sol nu	1128	609	**-519**	**-46,01**
Sol très faiblement couvert	22734	9707	**-13027**	**-57,30**
Sol faiblement couvert	9323	1932	**-7391**	**-79,28**
Sol moyennement couvert	4305	8106	**3801**	**88,29**
Bâti	3383	20057	**16674**	**492,88**

Source : Auteur à base du tableau 3.3

De ce tableau précédent, nous avons remarqué que les pixels de la classe de l'eau pâle ont connu une diminution de 1546 pixels soient -6,94% tandis que ceux de l'eau turbide ont enregistré un gain de 2008 pixels soient 82,77%. La comparaison des cartes des figures 3.1 et 3.2 illustre cette situation. Cette situation s'explique par les rejets des déchets solides et liquides non traités dans le lac Tanganyika. La quantité des déchets augmente en fonction de la densification des maisons tout le long du lac sans système d'épuration ou de traitement avant de les rejeter dans le lac. Le sol nu a connu une diminution de 519 pixels soient -46,01%. Le sol très faiblement couvert a diminué de 13027 pixels soient -57,30% tandis que le sol faiblement couvert enregistre une perte de 7391 pixels soient -79,28%.

Le sol moyennement couvert a augmenté de 3801 pixels soient +88,29% alors que le bâti quant à lui enregistre une augmentation exponentielle de 16674 pixels soient un gain de +492,88% et cela entre 1996 et 2021.

Cette dernière classe a été la première à subir une mutation profonde au cours de cette période. Les changements au niveau du sol nu, sol très faiblement couvert et sol faiblement couvert sont dus au fait que ce sont des sols localisés dans des parties à bonne condition pour recevoir le bâti. Ces espaces ont été viabilisés pour être bâti ou bâti anarchiquement d'où alors ces classes enregistrent des diminutions remarquables en faveur du bâti ce qui est conformes aux variations qui s'observent au niveau des pixels.

Les personnes à la recherche des parcelles se dirigent vers les périphéries urbaines où l'on trouve encore des espaces vides aux prix abordables. Ainsi, la densification des maisons s'intensifie dans les quartiers non viabilisés de Ruziba, Kamesa, Gikoto etc. et dans les quartiers viabilisés (Nyabugete et Kizingwe-Bihara). Cette situation peut être analysée visuellement à travers une comparaison des cartes thématiques réalisées après classification. Bien que certaines classes puissent causer des ambiguïtés, elles sont levées par interprétations des données quantitatives de ce tableau.

3.4.2. Analyse de l'évolution des superficies entre 1996 et 2021

L'analyse des changements des superficies est rendue possible par l'usage de l'outil « Change detection statics » (Tableau 3.5).

Tableau 3.5: Superficies en ha entre 1996 et 2021

		Situation finale en 2021							
		Eau pâle	Eau turbide	Sol nu	Sol très faiblement couvert	Sol faiblement couvert	Sol moyennement couvert	Bâti	**Total**
situation initiale en 1996	Eau pâle	1825,29	25,47	0	12,33	0	2,34	0	**1865,43**
	Eau turbide	164,7	140,76	0,09	75,69	0,36	16,74	0,72	**399,06**
	Sol nu	0	0,72	6,57	35,55	8,46	1,53	1,98	**54,81**
	Sol très faiblement couvert	0,18	2,25	35,91	464,67	297,63	42,75	30,24	**873,63**
	Sol faiblement couvert	0,18	1,98	6,3	63,18	62,64	37,98	1,62	**173,88**
	Sol moyennement couvert	9,99	36,18	11,25	357,84	145,62	146,34	22,32	**729,54**
	Bâti	4,23	10,98	41,4	1036,8	324,36	139,77	247,59	**1805,13**
	Total	**2004,57**	**218,34**	**101,52**	**2046,06**	**839,07**	**387,45**	**304,47**	**5901,48**
	changement par classe	**179,28**	**77,58**	**94,95**	**1581,39**	**776,43**	**241,11**	**56,88**	
	Différence	**-139,14**	**180,72**	**-46,71**	**-1172,43**	**-665,19**	**342,09**	**1500,66**	

Source : Auteur

Les superficies analysées sont exprimées en hectare. Notre zone d'étude couvre une superficie totale de 5901,48ha composée de la bande du lac de 2264,49ha et de la terre émergée qui représente plus de la moitié de la superficie soit 3636,99ha qui équivaut à plus de 60% de la bande étudiée. Au cours de la période de 1996 à 2021, les changements en termes de superficies ont affecté toutes les classes thématiques. Les évolutions sont variables dans les classes et entre les classes. La réalisation du tableau synthèse à base de ce tableau 15 montre clairement les changements observés entre le stade initial et le stade final.

Tableau 3.6: Evolution en superficie (en hectare) entre 1996 et 2021

	Evolution des superficies en hectare			
	1996	2021	Evolution en ha	Taux (en %)
Eau pâle	2004,57	1865,43	**-139,14**	**-6,94**
Eau turbide	218,34	399,06	**180,72**	**82,77**
Sol nu	101,52	54,81	**-46,71**	**-46,01**
Sol très faiblement couvert	2046,06	873,63	**-1172,43**	**-57,30**
Sol faiblement couvert	839,07	173,88	**-665,19**	**-79,28**
Sol moyennement couvert	387,45	729,54	**342,09**	**88,29**
Bâti	304,47	1805,13	**1500,66**	**492,88**

Source : Auteur à base du tableau 3.5

D'après les données du tableau 3.6, il ressort que toutes les classes thématiques ont subi des dynamiques spatiales entre 1996 et 2021. Pour les unes, les superficies ont augmenté tandis qu'elle diminue pour les autres.

La superficie de l'eau turbide a connu une progression de 180,72ha soit 82,77% en défaveur de l'eau pâle en général qui a perdu une superficie de 139,14ha soit -6,94% de l'initiale. Le gain et la perte ne sont pas proportionnels pour ces classes, ce qui s'explique par le fait qu'en 2021 le lac a monté de niveau et a envahi une partie de la zone côtière. Cela a été observé à Kibenga où une bande côtière bâtie ou couverte par des végétaux a été immergée augmentant ainsi la zone turbide.

La variation la plus spectaculaire s'observe dans la classe du bâti où sa superficie a passé de 304,47ha à 1805,13ha soit un accroissement de 1500,66ha ce qui représente une augmentation de 492,88%. La superficie occupée par le bâti a plus que quadruplé. Une augmentation s'observe encore au niveau du sol moyennement couvert avec 342,09ha soit 88,29% d'accroissement. Toutes les autres classes qui restent ont enregistré des évolutions négatives. La classe du sol très faiblement couvert a régressé de 1172,43ha soit -57,30% tandis que le sol faiblement et sol nu ont perdu 665,19ha et 46,71 ha soient -79,28% et -46,01% respectivement. Les superficies de sol nu, sol très faiblement couvert, sol faiblement couvert ont diminué en faveur du bâti. De nouveaux logements sont en train d'être construits dans plusieurs parties de la zone d'intérêt accroissant ainsi la surface bâtie.

Certes, la raison n'est autre que le centre ville est presque saturé ou encore les parcelles y sont très chères. Seules les périphéries nord et sud (zone d'étude) qui disposent encore des espaces sont convoités et aménagés et, par conséquent, la surface bâtie s'accroît rapidement. Les figures suivantes illustrent cette situation.

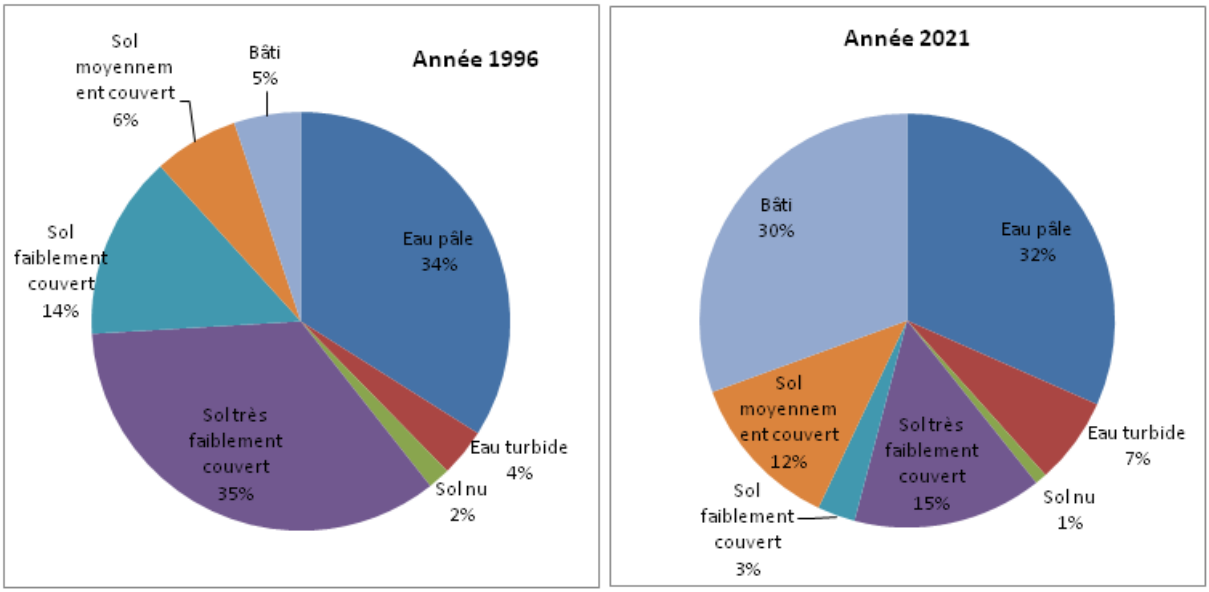


Figure 3.3: Comparaison des superficies en ha entre 1996 et 2021

Source : Auteur à partir des données du tableau 3.6

De ces figures, il est à remarquer que la superficie du bâti a augmenté passant de 5% en 1996 pour atteindre 30% en 2021 tandis que celle du sol moyennement couvert a réalisé un gain de 6% en passant de 6% à 12% de la superficie total. L'eau turbide a progressé de 3%, partant de 4% pour atteindre 7%.

Par contre, toutes les autres classes thématiques qui restent n'ont fait que baisser leurs superficies comme le montrent les données du tableau 3.6. Le sol très faiblement couvert a diminué de 20% en passant de 35% à 15% tandis que le sol faiblement couvert a perdu 11% de sa superficie initiale. Enfin, l'eau pâle a régressé de 2% car elle était de 34% en 1996 et est de 32% en 2021. Ces informations renforcent celles déjà expliquées dans les points précédents, sur les changements qui se sont produits dans les classes thématiques faisant l'objet d'analyse au cours de la période comprise entre 1996 et 2021.

3.5. Discussion des résultats

La détection des changements au sein des classes thématiques a nécessité l'utilisation combinée des logiciels d'analyse des images satellitaires ainsi que QGIS pour réaliser les cartes thématiques. Et puis, nous avons fait l'analyse de la corrélation de la dynamique spatio-temporelle de la zone d'étude.

3.5.1. Corrélation entre l'extension urbaine et le changement des classes d'occupation du sol

L'analyse des cartes résultant de la classification de la période comprise entre 1996 et 2021 montre une évolution des superficies dans les classes thématiques. Les autres classes de terres émergées ont en général régressé en matière de superficie au détriment de la surface bâtie.
La diminution du sol très faiblement couvert (-57,30%), sol faiblement couvert (-79,28%) et sol moyennement couvert (-40,01%) se fait au profit de surface bâtie ce qui explique le gain important du bâti (+492,88%).

Ces résultats convergent avec ceux des autres auteurs qui ont travaillé sur l'évolution des villes à base des images satellitaires. Ainsi, DECHAÏCHA et ALKAMA (2020) ont montré que la ville de Bou-Saada (Algérie) a connu une extension de la surface urbanisée avec un important étalement de la surface bâtie, contre une perte progressive de la surface de la palmeraie. De même, nos résultats coïncident avec ceux de NIYONKURU (2010) qui dans son résumé (de thèse) de l'étude réalisé sur les bas-fonds du Bugesera par télédétection. Ses résultats montrent une augmentation de la superficie des bas-fonds cultivés entre 1984 et 2007 de l'ordre de 8% et une diminution des eaux libres de 0, 3% à l'échelle régionale tandis que ces taux atteignent respectivement 11% et 7,2% à l'échelle locale (environ du lac Gacamirinda et Rwihinda), d'une part. Et d'autre part, ils divergent avec nos résultats sur la surface couverte.

Les résultats finaux de la post-classification montrent une évolution positive surtout de la classe du bâti qui corroborent l'information de la revue de la littérature du premier chapitre où nous avons parlé d'une extension urbaine de Bujumbura qui affecte la partie périphérique du sud.

La superficie de sol moyennement couvert a augmentaté en passant de 387,45ha à 729,54ha qui s'explique par les changements de la saison.

La saison sèche aurait commencé tardivement ou encore la saison pluvieuse aurait été longue, ce qui a fait qu'une végétation moyenne soit abondante et surtout le long du lac et des rivières, ce qui traduit la variation positive au sein cette classe thématique.

Cette zone dispose des espaces encore vides qui peuvent être mis en culture, étant donné que les sols de la plaine sont généralement très fertiles et faciles à mettre en valeur, suite à sa topographie plane. Jusqu'à présent, la partie comprise entre les rivières Kizingwe et Mugere dispose des espaces pouvant être mis en culture, surtout pendant la saison pluvieuse. Le manioc et le maïs sont les plus observés dans cette partie, or le manioc peut garder une forte réflectance dans le spectre du vert jusqu'en juillet. Les résultats montrent que la superficie de l'eau turbide a augnenté de 180,72ha et a entraîné par coséquent la diminution de la superficie de l'eau pâle.

Nos résultats corroborent certains travaux similaires déjà réalisés. NDIKUBWAYO (2019) a montré que la bande côtière du lac a connu une augmentation considérable de la classe d'eau turbide au détriment de l'eau pâle. La différence des superficies n'est pas proportionnelle entre les deux classes c'est-à-dire entre gain et perte. Au cours de l'année 2021, le niveau du lac a augmenté et a regagné de l'espace sur la rive du lac Tanganyika qui était couverte par la végétation ce qui a ainsi augmenté la turbidité des eaux côtières.

L'augmentation de la turbidité de l'eau du lac s'explique aussi par le fait que les rivières qui se jettent dans cette zone du lac ciblée pour notre étude descendent des contreforts des Mirwa. Cette région des Mirwa est surpeuplée et continue à recevoir des nouvelles installations des habitations ce qui diminue la perméabilité du sol et accentue par conséquent la torrentialité des rivières et crée des ravins. Les collines de cette région sont dénudées et soumises à l'effet de l'érosion intensive. Les couches du sol arrachées ainsi que les produits des éboulements des berges, des glissements de terrain et de surcreusement de bas-fond des rivières et ravins sont acheminés vers le lac. L'accélération des activités d'extraction des matériaux de construction sur les collines et dans les rivières ne fait qu'accentuer l'action de l'érosion et par conséquent la turbidité du lac.

La turbidité du lac augmente encore avec la décomposition des végétaux immergés, les rejets des déchets, des produits chimiques et d'autres éléments polluants, en provenance des ménages riverains du lac Tanganyika.

La bande côtière est aussi colonisée par des sables issus de l'érosion ou amenée par des individus qui aménagent des plages et qui essayent de gagner de l'espace en repoussant progressivement l'eau. Ce qui justifie alors l'existence des plages en sables qui réfléchissent en bande de sol nu ou bâti si c'est construit pour des activités de loisirs.

3.5.2. Corrélation entre l'évolution de la population et la diminution de l'espace à bâtir

Les résultats de post-classification sur la période de 1996 à 2021 montrent que le domaine bâti a progressé en passant d'une superficie de 304,47ha en 1996 à 1805,13ha en 2021 soit un accroissement de 1500,66ha. Cet accroissement est très important et cadre bien avec l'augmentation des pixels de la classe du bâti qui représente 492,88% d'évolution.

Nos résultats corroborent la revue de la littérature où nous avons montré que la population urbaine en général et en particulier celle de la zone d'étude augmente très rapidement depuis les années 90. De même, les résultats convergent avec l'évolution de la population telle que dégagée par ISTEEBU pour les années 1990 et 2008.

Ces résultats convergent également avec ceux de NDIKUBWAYO (2019) qui a montré dans sa zone étude, qu'il y a eu une augmentation rapide du bâti dans le nord-est de Bujumbura au cours des deux dernières décénies. Il a travaillé sur les bassins-versants des rivières Mutimbuzi et Ntahangwa et a constaté après, post-classification, que certaines classes ont connu des augmentations et que d'autres ont diminué.

La diminution des espaces vides en faveur du bâti se fait dans le but de répondre à la demande très aiguë des espaces à bâtir, ce qui a poussé le gouvernement à prendre la mesure de faire progresser la limite sud de la ville passant de la rivière Kizingwe à la rivière Mugere. Certes, au cours de cette période, l'espace était presque vide comme l'illustre la figure 3.1 de résultat de la classification de 1996. Au cours de cette année, l'espace bâti était très restreint. Seul Musaga disposait d'un nombre important du bâti. Au cours de cette année, la population était évaluée à 30746 habitants, ce qui coïncide avec l'espace bâti.

A compter de cette période, la population n'a jamais cessé de s'accroître jusqu'à 175588 habitants, ce qui traduit un accroissement de 144842 habitants en 30 ans seulement tels que le prouvent les données des tableaux 1.3 et 1.5.

Cette situation traduit que, plus les années avancent, plus l'espace disponible pour le nouveau bâti diminue. Cette augmentation du bâti explique pourquoi les classes de sol très faiblement couvert, sol faiblement couvert et sol nu ont diminué car qu'ils sont faciles à aménager.

L'agrandissement de l'espace bâti est dû aux demandes des parcelles qui se multiplient du jour au jour, au sein des services de l'urbanisme et qui sont supérieures à l'offre.

Ces résultats convergent avec ceux de DIENG et KEITA (2017) qui ont fait preuve d'un changement du paysage urbain de Dakar au cours des quatre décennies à travers la reconversion spatiale des formations naturelles et des zones de culture au profit du bâti.

Cette partie, comme pour toute la ville, est en pleine croissance démographique alimentée surtout par l'exode rural et par les citoyens de centre ville (Rohero, Bwiza, Nyakabiga, Buyenzi,) où il n'y a plus d'espace à bâtir et sont obligés d'aller dans ces zones périphériques où il y a encore des espaces. La croissance du bâti continue jusqu'à l'heure actuelle où de nouveaux quartiers aménagés par les services d'urbanisme sont en train d'être construits. Les cas les plus importants sont les quartiers Nyabugete et Kizingwe-bihara dont la viabilisation est finie et sont en phase de construction. Cela signifie que les espaces bâtis continuent à augmenter et ceux vides risquent de s'épuiser d'ici quelques années, vues le rythme actuel de mise en valeur. De même, des personnes à faibles revenus continuent à occuper les parties non viabilisées de Ruziba, Busoro, Kamesa, Gikoto, Kibenga etc. à la périphérie de la zone d'étude, accélérant encore la concentration du bâti.

Les résultats du présent travail confirment les informations de la revue de la littérature. Les données quantitatives de la classification et la post-classification des images montrent clairement l'ampleur de la dynamique d'occupation du sol et ont permis de dégager les statistiques en rapport avec l'évolution des superficies.

Les résultats que nous avons obtenus corroborent ceux des autres auteurs. LAFLEUR (2015) a fait une étude évolutive de la mangrove de la baie de coracol (Nord-Est, Haïti) et perspectives de conservation. Il a utilisé des images Landsat de 1990 et 2014 et a conclu que l'évolution de la mangrove est positive selon les résultats qu'il a obtenus.

Enfin, en analysant les différents résultats de notre travail et après leurs confrontations avec ceux des autres auteurs, nous sommes persuadé que nous avons abordé une méthodologie qui permet d'aboutir aux résultats escomptés sur un tel travail d'analyse de l'évolution d'occupation du sol d'un milieu urbain et périurbain à l'aide de la télédétection.

CONCLUSION

Les périphéries de la ville de Bujumbura en général et en particulier la périphérie sud, comprise entre les rivières Muha et Mugere sont soumises à de profondes mutations. Cette partie sud de la ville, dispose encore des espaces constructibles et fait l'objet de la viabilisation en cours ce qui attire les citadins à la recherche des parcelles. L'objectif de notre étude est de montrer la dynamique spatio-temporelle de la zone comprise entre les rivières Muha et Mugere afin de montrer le rôle des images satellitaires dans le suivi de l'évolution de l'occupation du sol urbain au sud de la ville de Bujumbura. Cet objectif a conduit à réaliser une analyse de la dynamique spatio-temporelle des classes thématiques que nous avons considérées dans cette étude.

Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé deux images satellitaires des capteurs Landsat5 TM pour l'année 1996 et Landsat8 OLI-TIRS pour l'année 2021, téléchargées sur un site web de USGS. La superficie couverte par les images brutes est très vaste et est de loin supérieure à notre zone d'intérêt, d'où alors ovons découpé les images pour rester avec la partie concernée par cette étude. Dans le découpage des images, le traitement et la classification, des logiciels QGIS et spécialement ENVI ont été utilisés. Lors de la classification, comme notre zone d'étude est limitée à l'ouest par le Lac Tanganyika, nous avons intégré une zone côtière du lac tanganyika.

Ces images avaient été prises dans une même période, dans un même mois de juillet et dans les mêmes conditions d'éclairement, ce qui permet de détecter les variations, par une analyse comparée. Dans l'analyse des images, nous avons principalement utilisé la combinaison de deux logiciels (ENVI 5.0 et QGIS 3.16.3). Ces images ont été codées en RVB pour obtenir des compositions colorées qui permettent de distinguer les couleurs des constituants de l'image. Le codage a été effectué sur base de 3 bandes pour chaune des images permettant un traitement semblable parce que les les capteurs n'ont pas les mêmes bandes. Etant donné que la zone d'étude est de loin inférieure à la taille du fauché, les images ont été découpées pour les rendre conformes aux dimensions de la zone d'intérêt.

Après prétraitement et traitement des images, nous avons effectué la classification supervisée de chaque image. Cette classification a été réalisée à partir des classes thématiques définies qui renferment les pixels les plus vraisemblables de l'image classifiée.

Lors de la classification, les pixels considérés doivent être supérieurs à 30 pour chaque classe thématique et pour toutes les images, mais aussi doivent être validés. Le degré de précision de la classification est supérieur à 90% pour les deux images classifiées.

Les résultats des classifications des images nous ont permis de mettre en évidence l'évolution de l'occupation spatiale. A l'aide de ces résultats, nous avons constaté que notre zone d'étude a connu des évolutions positives et négatives pour les classes thématiques constituées. Les régressions ou progressions au sein des classes ont été montrées par l'analyse des pixels ou par l'analyse des changements des superficies. Les classes qui ont diminué sont celles de sol très faiblement couvert qui a perdu 13027 pixels soit -1172,43ha sol faiblement couvert qui a régressé de7391 pixels soit -665,19ha et le sol nu qui a diminué de 519 pixels soit -46,71ha.

Les changements au niveau du sol nu, sol très faiblement couvert et sol faiblement couvert sont dus au fait que ce sont des sols localisés dans des parties à bonne condition pour recevoir le bâti. Ces espaces ont été viabilisés pour être bâti ou bâti anarchiquement d'où alors ces classes enregistrent des diminutions remarquables en faveur du bâti conformément aux variations qui s'observent au niveau des pixels.

Les résultats montrent qu'une variation la plus importante s'observe dans la classe du bâti où sa superficie a passé de 304,47ha à 1805,13ha soit un accroissement de 1500,66ha ce qui représente une augmentation de 492,88%. La classe de sol moyennement couvert a augmenté de 3801 pixels soit 342,09ha. Cette augmentation du bâti coïncide avec l'évolution de la population dans la zone d'étude que nous avons montrée dans la revue de la littérature. Les données quantitatives sur l'évolution démographique le prouvent, ce qui explique l'évolution positive du bâti.

Dans la périphérie sud de la ville de Bujumbura la surface bâtie continue à augmenter du fait que cette bande dispose des espaces encore vides et faciles à aménager. Cette augmentation du bâti explique pourquoi les classes de sol très faiblement couvert, sol faiblement couvert et sol nu continuent à diminuer. Cette diminution des espaces vides en faveur du bâti se fait dans le but de répondre à la demande très aiguë des espaces à bâtir. Le rythme de croissance de la population urbaine entraîne la conquête des espaces pouvant abriter des nouvelles maisons pour répondre à la demande sans cesse croissante des logements dans la ville. Bujumbura, longtemps classée ville principale du Burundi, est toujours attractive.

Or, seules les périphéries disposent des espaces pouvant recevoir des logements d'où alors la surface bâtie augmente rapidement dans le sud qui fait objet de notre étude. Ainsi, avec ces résultats, toutes nos hypothèses sont confirmées.

A part la mise évidence l'évolution spatiale entre 1996 et 2021, un aperçu sur l'évolution de l'eau côtière du lac Tanganyika a été fait. Sur ce point, nous avons montré que la turbidité du lac Tanganyika augmente tandis que l'eau pâle a diminué. Les raisons majeures sont les affluents qui proviennent des montagnes fortement érodées et leurs comportements torrentiels sur leurs parcours ainsi que les rejets des déchets urbains non traités. Mais aussi la densification des maisons sans système d'épuration des eaux usées ou de traitement des déchets ménagers qui rejettent directement ces derniers dans le Lac.

Bref, au vu des résultats obtenus, la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol de notre zone d'étude suit une évolution très rapide. La classe du bâti augmente très rapidement au détriment des autres classes de la partie de la terre émergée.

Bien que nous ayons abouti aux résultats que nous venons de présenter sur la contribution de la télédétection dans l'etude de la dynamique spatio-temporelle de la ville de bujumbura : cas de la zone comprise entre les rivières muha et mugere, nous ne pouvons pas prétendre l'avoir épuisé. Dans le but de compléter ce travail et dans le souci de tendre vers une analyse optimale, une recherche plus approfondie permettrait de bien détecter les évolutions des plus petites unités de l'espace. Ultérieurement, d'autres études à base des images multidates à très haute résolution spatiale seraient nécessaires pour dégager les changements de l'occupation du sol dans les parties de la ville soumises à des mutations plus importantes du fait de leur atout sur l'aménagement.

Afin de répondre à de l'expansion rapide du bâti dans les périphéries de la ville de Bujumbura, notre suggestion est de favoriser et encourager les constructions en hauteur. Ces types des logements peuvent abriter plusieurs personnes en un même bâtiment à la place de ces étalements horizontaux consommateurs de l'espace.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Ouvrages et Articles

1. ANDRIAMALALA, C. A. (2007), *Etude écologique pour la gestion des mangroves à Madagascar. Comparaison d'une mangrove littorale et d'estuaire à l'aide la télédétection*, 283 p.

2. COLOZ, R. et COLLET (2001), *Précis de télédétection* Volume 3 : traitement numérique d'image de télédétection. Presses de l'Université du Québec et l'Agence universitaire de la francophonie, Sainte-Foy et Montréal, , 386p.

3. DECHAÏCHA, A. et ALKAMA, D. (2020)*, Suivi et quantification de l'urbanisation incontrôlée: une approche basée sur l'analyse multitemporelle des images satellitaires LANDSAT. Cas de la ville de Bou-Saada (Algérie),* Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, pp. 159–172.

4. DECHAÏCHA, A., & ALKAMA, D. (2020), *Détection du changement de l'étalement urbain au bas-sahara algérien : apport de la télédétection spatiale et des sig. Cas de la ville de Biskra (algérie)*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, (222), 43–51.

5. DENGSHENG, L. et Alii (2010), *Land-Use and Land- Cover Change Detection*. ACT Publication No. 11-02. 272-289 p.

6. DENIS, A. (2016), *Travaux Pratiques de Télédétection Spatiale*. Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique, 84p.

7. DIENG, M. A. et KEITA M. (2017) : *Télédétection et SIG dans l'analyse spatio-temporelle de la dynamique urbaine de Dakar, Sénégal*, RECTAS, Obafemi Awolowo University Campus, PMB 5545, Ile-Ife, Osun State, Nigeria, pp.292 – 306

8. EMRAN, A. (2005), *Génération d'une couverture de sol à partir d'une image satellite*. Projet GEF, 30 p.

9. ENONZAN, F. B. (2010), *Utilisation de la télédétection et des SIG dans la gestion durable des aires protégées : cas des forêts classées de Dogo-Ketou au Benin*. Mémoire pour l'obtention de Diplôme d'Etudes Supérieures. Mémoire Online.
10. FAO (1998). *Elaboration d'une base de données sur l'occupation du sol grâce à la télédétection et à un système d'informations géographiques*. Série Télédétection pour décideurs N° 21.

11. FOUZIA, B. et alii (2011), *Dynamique spatio-temporelle de l'agglomération oranaise (algérie) par télédétection et SIG*, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Laboratoire Géomatériaux et Environnement, EA 4508,5 Boulevard Descartes, 77454 Marne-La-Vallée cedex 2, France, pp.103-113**.**

12. HAMOUDA, S. (2014), *Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol*

dans le delta de Mejerda par télédétection et SIG, 377p.

13. Hountondji, Y. et alii (2005), *Mise en évidence de la résilience de la végétation Sahélienne par télédétection basse résolution au Niger à la suite d'épisodes de sècheresse.* Université de Liège et Université de Parakou. Belgeo, Vol. 4, p. 499-516.

14. ISTEEBU (2008), *Analyse de l'état de la structure de la population*, Volume 3 , Tome 6. Bujumbura, 87p.

15. ISTEEBU (2008), *Recensement général de la population et de l'habitat du Burundi 2008 - Synthèses des résultats définitifs*. Bujumbura, 24p.

16. KONAN M. et YAO, E. L. (2012), *Utilisation de la télédétection pour le suivi de la dynamique des formations végétales dans le périmètre d'exploitation forestière (PEF)* n°12530. Ministère des Eaux et Forêts / Côte d'Ivoire, 44 p.

17. LAFLEUR, A. (2015), *Etude évolutive de la mangrove de la Baie de Caracol (Nord-Est, Haïti) et perspectives de conservation*. Université de Liège, Belgique, 55p.

18. MAHAMOUD A. M. (2017), *Cartographie de l'occupation du sol de la Grande Comore*, Université d'Antananarivo, 79p.

19. MIKWA NGAMBA J. F. (2010), *Evaluation par télédétection des effets de la déforestation et de la dégradation des forêts à Kisangani : Cas de la région forestière de Masako. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kisangani*, 62 P.

20. NDAYIKENGURUKIYE G. (2017), *Apport de la télédétection dans le suivi de la dynamique des aires protégées : Cas du parc national de la Kibira* , Université de liège, Liège, Belgique, 46p.

21. NDAYIRUKIYE, S., *(*2002) : *Bujumbura centenaire 1897-1997 Croissance et défis*, Paris, Harmattan, 375p.

22. NDIKUBWAYO, E. (2019), *Contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain de la partie nord de la mairie de Bujum*bura, *Burundi*, Université Catholique de Louvain 82p.

23. NIYONKURU, A. (2010), *Les bas-fonds du Bugesera (Burundi) : de l'inventaire au suivi par télédétection***,** université de Toulouse 2 leMirail, in Résumé**.**

24. République du Burundi & PNUD (2014), *Bujumbura 2045 – Plan directeur novateur pour guider le développement futur de la capitale du Burundi*. Bujumbura, 91p.

25. Escallier, R. (1998), *La croissance des populations urbaines en Afrique. Quelques éléments d'introduction*, l'urbanisation en Afrique - Urbanization in Africa, Université de Nice, Nice Cedex, pp. 177-182

26. SINDAYIHEBURA, B. (2005), *De l'Imbo au Mirwa ; Dynamique de l'occupation du sol, croissance urbaine et risques naturels dans la région de Bujumbura,* Université de Toulouse II-Le Mirail , Thèse de dctorat, 336p.

27. Thi Thanh Hien Pham, (2005), *Détection des changements de l'occupation des terres de la zone littorale : cas du district de Tiên Hai (Vietnam).* Mémoire de maîtrise / Université de Sherbrooke – Canada, 106 p.

28. TYCHON, B., (2018), *Applications de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la gestion de l'environnement*. Université de Liège - Campus Arlon, 30p.

2. Site Web Internet

1. https://earthexplorer.usgs.gov/ (Consulté plusiers fois)

2. FAO, 1998, cité par https://fr.wikipedia.org, (consulté le 15/102022)

3. https://lewebepedagogique.com (consulté 10/8/2022)

4. https://www.rncan.gc.ca, (consulté le 15/102022)

4. https://www.yaga-burundi.com/2019/bujumbura-histoire-que-vous-ignoriez (Consulté 10/8/2022)

5. https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-image-satellitale-4977 (Consulté le 08/3/2023)

6. https://www.telesatellite.com (Consulté le 08/3/2023)

7. https://www.techno.science.net (consulté le 08/3/2023)

8. https://www.techno-science.net/definition/2718.html

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau

Tableau 1 : Eléments descriptifs de l'image Landsat 5 du 30/7/1996

Attribut d'ensemble de données	**Valeur d'attribut**
Identificateur de produit Landsat L1	LT05_L1GS_173062_19960730_20200911_02_T2
Identificateur de scène Landsat	LT51730621996212JSA00
Date d'acquisition	30/07/1996
Catégorie de collecte	T2
Numéro de collecte	2
Mode capteur	SAM
Chemin WRS	173
Ligne WRS	62
Scène partielle complète	Pleine
Date de création du produit L1	11/09/2020
Heure de début	1996:212:07:29:27.2200000
Temps d'arrêt	1996:212:07:29:54.2274400
Identificateur de station	JSA
Indicateur jour/nuit	Jour
Modèle de points de contrôle au sol	-1
Couverture nuageuse terrestre	4.00
Scène Couverture nuageuse L1	4.00
Version points de contrôle au sol	-1
Anomalies du capteur	Aucun
Qualité d'image	9
Gagner du changement	N
Version du logiciel de traitement	LPGS_15.3.1c
Élévation du soleil L1	45.11595520
Soleil Azimut L1	60.04588392
Type de données L1	TM_L1GS
Identificateur de capteur	TM
Satellite	5
Type d'éphéméride	Prédictif
Lignes réfléchissantes	6981
Échantillons réfléchissants	7781
Lignes thermiques	6981
Échantillons thermiques	7781
Projection cartographique du produit L1	UTM
Zone UTM	35
Données	WGS84
Ellipsoïde	WGS84
Taille de cellule de grille réfléchissante	30.00
Grille Cellule Taille Thermique	30.00
Fichier de paramètres d'étalonnage	LT05CPF_19960701_19960930_02.01
Scène Centre Lat DMS	2°54'22.90"S
Scène Centre Long DMS	29°03'55.62"E
Coin supérieur gauche Lat DMS	1°59'26.12"S

Coin supérieur gauche DMS long	28°24'43.20"E
Coin supérieur droit Lat DMS	2°13'47.82"S
Coin supérieur droit long DMS	30°03'28.44"E
Coin inférieur gauche Lat DMS	3°34'55.13"S
Coin inférieur gauche DMS long	28°04'18.80"E
Coin inférieur droit Lat DMS	3°49'18.01"S
Coin inférieur droit Long DMS	29°43'12.14"E
Latitude du centre de la scène	-2.90636
Longitude du centre de la scène	29.06545
Coin supérieur gauche Latitude	-1.99059
Longitude du coin supérieur gauche	28.41200
Coin supérieur droit Latitude	-2.22995
Longitude du coin supérieur droit	30.05790
Coin inférieur gauche Latitude	-3.58198
Angle inférieur gauche Longitude	28.07189
Angle inférieur droit Latitude	-3.82167
Angle inférieur droit Longitude	29.72004

Tableau 2 : Eléments descriptifs de l'image Landsat 5 du 19/7/2021

Données d'ensemble d'attribut	**Valeur d'attribut**
Identificateur de produit Landsat L1	LC08_L1TP_173062_20210719_20210729_02_T1
Identificateur de scène Landsat	LC81730622021200LGN00
Date d'acquisition	19/07/2021
Catégorie de collecte	T1
Numéro de collecte	2
Chemin WRS	173
Ligne WRS	62
Nadir/Hors Nadir	NADIR
Angle de roulis	0.000
Date de création du produit L1	29/07/2021
Couverture nuageuse terrestre	1.54
Scène Couverture nuageuse L1	1.54
Heure de début	2021-07-19 08:14:09.920652
Temps d'arrêt	2021-07-19 08:14:41.690652
Identificateur de station	LGN
Indicateur jour/nuit	DAY
Modèle de points de contrôle au sol	778
Version points de contrôle au sol	5
Modèle géométrique RMSE	5.695
Modèle RMSE géométrique X	3.513
Modèle RMSE géométrique Y	4.483
Qualité d'image	9
Version du logiciel de traitement	LPGS_15.5.0
Altitude du soleil L0RA	53.08442221
Azimut solaire L0RA	48.80263126

Modèle TIRS SSM	FINAL
Type de données L1	OLI_TIRS_L1TP
Identificateur de capteur	OLI_TIRS
Satellite	8
Lignes panchromatiques	15521
Échantillons panchromatiques	15221
Lignes réfléchissantes	7761
Échantillons réfléchissants	7611
Lignes thermiques	7761
Échantillons thermiques	7611
Projection cartographique du produit L1	UTM
Zone UTM	35
Données	WGS84
Ellipsoïde	WGS84
Grille Cellule Taille Panchromatique	15.00
Taille de cellule de grille réfléchissante	30.00
Grille Cellule Taille Thermique	30.00
Nom du fichier de paramètre de biais OLI	LO8BPF20210719074220_20210719092113.01
Nom du fichier de paramètre de biais TIRS	LT8BPF20210716133439_20210724121142.01
Fichier de paramètres d'étalonnage	LC08CPF_20210701_20210930_02.01
Nom du fichier RLUT	LC08RLUT_20150303_20431231_02_01.h5
Scène Centre Lat DMS	2°53'34.51"S
Scène Centre Long DMS	29°04'12.22"E
Coin supérieur gauche Lat DMS	1°50'43.22"S
Coin supérieur gauche DMS long	28°02'31.34"E
Coin supérieur droit Lat DMS	1°50'34.58"S
Coin supérieur droit long DMS	30°05'35.95"E
Coin inférieur gauche Lat DMS	3°57'04.14"S
Coin inférieur gauche DMS long	28°02'38.29"E
Coin inférieur droit Lat DMS	3°56'45.60"S
Coin inférieur droit Long DMS	30°05'56.51"E
Latitude du centre de la scène	-2.89292
Longitude du centre de la scène	29.07006
Coin supérieur gauche Latitude	-1.84534
Longitude du coin supérieur gauche	28.04204
Coin supérieur droit Latitude	-1.84294
Longitude du coin supérieur droit	30.09332
Coin inférieur gauche Latitude	-3.95115
Angle inférieur gauche Longitude	28.04397
Angle inférieur droit Latitude	-3.94600
Angle inférieur droit Longitude	30.09903