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

Etude des effets de l'occupation anarchique des sols sur la disponibilité des terres agricoles : Cas des Provinces de Bubanza, Bujumbura Mairie et Bujumbura Rural

Hakizimana, Pierre; Sous la direction du : Dr Arch. Kubwarugira Gamaliel

2024-09
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2341

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

Université du Burundi
Faculté de Sciences de l'Ingénieur

ETUDE DES EFFETS DE L'OCCUPATION ANARCHIQUE DES SOLS SUR LA DISPONIBILITE DES TERRES AGRICOLES : Cas des provinces de Bubanza, Bujumbura Mairie et Bujumbura Rural

MEMOIRE

Présenté par

HAKIZIMANA Pierre

Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Membres du Jury

- **Dr Ir NIYONZIMA Nestor : Président**
- **Dr Arch. KUBWARUGIRA Gamaliel : Directeur**
- **Doctorant KABANYEGEYE Henri : Lecteur principal**
- **Dr. Ir Lt-Col. NIBIGIRA Léonidas : Membre**

Bujumbura, Septembre 2024

MEMBRES DU JURY

- **Dr. Ir NIYONZIMA Nestor : Président**
- **Dr. Arch. KUBWARUGIRA Gamaliel : Directeur**
- **Doctorant KABANYEGEYE Henri : Lecteur principal**
- **Dr. Ir Lt-Col. NIBIGIRA Léonidas : Membre**

DEDICACE

A Dieu Tout Puisant

A ma chère épouse Agnès NIYOKWIZERA,

A mes fils MUHIZI Fresnel Don-Pierre

NIJEMBAZI Mporé HAKIZIMANA,

Et MBABÁZI Nshūmbūsho HAKIZIMANA

A mes filles NIYó- Royi Karorina,

NIYó- Sara Honnête

et NIYó- Igizubuntu BUKURU

A mes parents

A madame NDAYIKEZA Josiane,

Je dédie ce travail.

HAKIZIMANA Pierre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes tant morales que physiques qui ont contribué à la réalisation de ce travail du début jusqu'au bout, plus particulièrement à :

- Dieu le Tout Puissant pour m'avoir accordé une bonne santé du début à la fin de la formation académique.
- Ma chère épouse et mes enfants pour leur patience lors de mon absence physique,
- Mes parents, mes sœurs et frères
- Directeur de mémoire Dr. Architecte Gamaliel KUBWARUGIRA, promoteur et directeur de ce Mémoire. Sa rigueur scientifique, sa détermination, ses conseils prodigués sans cesse, ses critiques et remarques constructifs ainsi que sa disponibilité malgré différentes responsabilités autres que ce mémoire ont fait preuve d'importance capital attribué à ce travail.
- Aux enseignants de l'école primaire, secondaire qui m'ont formé et ceux du premier et du deuxième cycle de l'Université du Burundi particulièrement ceux de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur pour leur management qui nous a permis de terminer le cursus de formation avec succès.
- Mes camarades de classe du deuxième cycle pour leur aimable collaboration intellectuel et encouragement moral.
- Tous ceux qui ont contribué sous différentes formes par leur gré ou sans le savoir

Que tous ici trouvent l'expression de ma sincère gratitude.

RESUME

Ce travail se focalise sur l'étude de la dynamique spatio-temporelle de la consommation des terres cultivables dans une partie de la plaine de l'imbo prise comme zone d'étude. Cette dernière est limitée à l'ouest par le lac Tanganyika, au Nord par la rivière Mpanda. Au sud elle englobe toute la commune de Kabezi et à l'Est, elle est limitée par la ligne de partage des eaux de la crête Congo-Nil ; incluant une portion de la Province Muramvya.

Son objectif est de montrer l'allure à laquelle la couverture végétale (terres cultivables ou non) de la zone ci-haut mentionnée a subi des changements régressifs depuis 1986 jusqu'en 2023. Dans ce travail, nous avons essayé d'estimer combien subira la zone en perte de la flore projetée pour les autres 37 ans (2060) si aucune autre stratégie ne serait envisagée afin de préserver les terres arables. Pour ce faire, des images Landsat à moyenne résolution spatiales (30m) de 1986, 1994, 2002, 2015 et 2023 ont été utilisées. Le choix de ces dates a été dicté par de grands évènements qui ont apporté des changements remarquables en matière d'occupation du sol et des évènements socio- politiques au Burundi comme la politique de villagisation sous la II^{ème} République de Bagaza, la crise de 1993,vers la fin de la guerre civil en 2002 et vers une reconstruction socio-économique jusqu'en 2023. Cela s'ajoute le fait que les clichés des satellites et leur netteté ne recouvrent pas la zone d'intérêt suivant un pas de temps régulier et la disponibilité des données agricoles. Pour traiter ces Images; selon l'importance de l'étude, quatre classes d'occupation du sol ont été analysées : la classe du bâti, de la végétation (cultures et forêts), d'eau et celle des sols nus. Pour en étudier l'évolution, une classification supervisée a servi à déceler des changements dans cette zone. Les résultats montrent que depuis 1986 jusqu'en 2023, le bâti aurait augmenté de 677,2% par rapport à la superficie initiale de 1986 ; et la végétation aurait connu une régression de 13.5%. Les plans d'eau n'ont pas connu de changement notoire. Les sols nus ont diminué grâce à la diminution des feux de brousse causés par la guerre civile. La perte en terres arables et/ou végétalisées serait estimée à 27% depuis 1986 jusqu'en 2060 d'où il est utile de recommander des constructions en hauteur et/ou sur des zones non ou moins favorable à l'agriculture.

Mots-clés : Occupation du sol, télédétection, classification supervisée, Landsat, terres agricoles, dynamique spatio-temporelle.

ABSTRACT

This work focuses on the study of the spatial-temporal dynamics of de consumption of arable land in the part of Imbo plain taken as the study area. This one is limited to the west by Lake Tanganyika, to the North by Mpanda River. To the south, It encompasses the entire commune of Kabezi. To the East, it is limited by the watershed of Congo-Nil ridge; thus including a small part Muramvya Province.

Its objective is to show the rate at which the land cover (including cultivable land or not) of the mentioned area has undergone regressive changes from 1986 until 2023. In this work we tried to estimate how much area of vegetation will be transformed in built land in next 37years (2060) if no other strategy is considered in order to preserve arable land. To achieve this, Landsat images at medium spatial resolution (30meters) from 1986, 1994, 2002, 2015 and 2023 were used. This choice of these dates was dictated by major events which brought remarkable changes in land use and sociopolitical events in Burundi such as the villagization policies of President Bagaza under the second Republic, the crisis of 1993, the beginning of the end of civil war in 2002, and towards socio-economic reconstruction until 2023. Another cause of the choice is the fact that the satellite images and their sharpness do not cover the area of interest following a regular time step and the availability of agricultural data. To process these images; depending on the importance of the study, four classes of land use were analyzed: the class of buildings, vegetation (crops and forests), water and bared soil. To study their evolution, a supervised classification was used to detect changes in land use and land cover in this area of study. The results show that from 1986 until 2023, the built-up area would have increased by more than 677.2% compared to the initial surface area of 1986. Therefore, vegetated land would have decreased by more than 13.5% since 1986 to 2023. The bodies of water haven't experienced any notable change. Bared land has also decreased thanks to the reduction in bush fire caused by the civil war. The loss of arable land or vegetated land is estimated at more than 27% from 1986 to 2060, so that I would recommend favoring floor constructions and in areas not favorable to agriculture.

Key words: Land use, remote sensing, supervised classification, Landsat, agriculture land, spatial-temporal dynamics

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACE ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ..... **viii**
LISTE DES FIGURES ..... **ix**
SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **x**
AVANT- PROPOS ..... **xii**
Chapitre 1. INTRODUCTION GENERALE **1**
1.1 Introduction 1
1.2 Problématiques et question de recherche 2
1.2.1 Problématiques 2
1.2.2 Question de recherche 3
1.3 Objectifs de la recherche 3
1.3.1 Objectif global 4
1.3.2 Objectif spécifiques 4
1.4 Hypothèses 5
Chapitre 2. DOCUMENTATION ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE **6**
2.1. Historique sur la télédétection 6
2.2 Etude des changements d'occupation des sols dans la zone d'étude par télédétection 7
2.2.1 Définition de la télédétection 7
2.2.2 Prétraitement et Interprétation 7
Chapitre 3. MILIEU D'ETUDE, METHODOLOGIE ET MATERIELS UTILISES **18**
3.1 Milieu d'étude 18
3.1.1 Situation géographique 18
3.1.2 Historique spatio-temporelle de la ville de Bujumbura 18
3.1.3 Situation actuelle de la ville de Bujumbura 19
3.1.4 Délimitation spatio-temporelle de l'étude 20
3.1.5 Evolution démographique dans la zone d'étude. 22
3.1.6 Climat et Relief 24
3.1.7 Pédologie et Cartographie de la disponibilité des principaux éléments nutritifs du sol 26

3.1.8 Les grands types de cultures cultivées 29
3.1.9 Les menaces des zones végétatives perceptibles dans la zone d'études 30
3.2 Méthodologie 31
3.3 Données et Matériels utilisés 33
3.3.1 Données utilisées 33
3.3.2 Matériels utilisés 34
3.4 Traitement des données par classification supervisée et évaluation des résultats 36
3.4.1Traitement des données par classification supervisée 36
3.4.2 Evaluation et validation de la classification supervisée 37
Chapitre 4. PRESENTATION, INTERPRETATION DES RESULTATS ET IMPACTS SUR LES RECOLTES 39
4.1. Présentation des résultats 39
4.1.1 Cartographie d'occupation du sol après classification des images 39
4.2 Présentation Qualitative et quantitative des changements au niveau des classes 46
4.2.1 Présentation qualitative des changements spatiaux par classe 46
4.2.2 Présentation quantitative des changements au sein des classes 53
4.2.3 Dynamique de transition 53
4.3 Impacts sur des récoltes de grands types de cultures des provinces abritant la zone d'étude 57
Chapitre 5. DISCUSSION DES RESULTATS ET LIMITES DE LA RECHERCHE ... 61
5.1 Discussion des résultats 61
5.1.1 Vérification de la classification 61
5.1.2 Evolution de l'occupation du sol dans la zone d'étude de 1986 à 2023 61
5.2. Les limites de ce travail 63
Chapitre 6. CONCLUSION ET RECOMMANDATION 65
6.1. Conclusion 65
6.2. Recommandations 66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 68
ANNEXE 71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différentes combinaisons selon la classe d'occupation du sol à analyser 11
Tableau 2: Différents degrés d'accord de la valeur de l'indice de Kappa 15
Tableau 3 : Caractéristiques des images téléchargées..... 33
Tableau 4 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 1986 47
Tableau 5 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 1994 47
Tableau 6 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 2002 48
Tableau 7 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 2015 48
Tableau 8: Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 2023 49
Tableau 9 : Evolution spatiale des classes d'occupation du sol de 1986 à 2002 50
Tableau 10 : Evolution spatiale des classes d'occupation du sol de 2002 à 2023 50
Tableau 11 : Evolution spatiale globale des classes d'occupation du sol de 1986 à 2023..... 51
Tableau 12 : Matrice de transition entre1986 et 1994..... 54
Tableau 13: Matrice de transition entre 1994 et 2002..... 54
Tableau 14: Matrice de transition entre 2002 et 2015..... 55
Tableau 15: Matrice de transition entre 2015 et 2023..... 55
Tableau 16: Matrice de transition généralisée de 1986 à 2023 56
Tableau 17: Evolution des récoltes totales en tonnes des provinces Bubanza, Bujumbura Rural et Muramvya..... 57
Tableau 18:Evolution des récoltes de la Province Bujumbura Rural proche de la Mairie 58
Tableau 19: (a,b): Relation entre les pertes en terre végétales et les récoltes 58
Tableau 20: Rapports de proportionnalité entre tendances spatiales et tendances récoltes 59

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Influence de la résolution spatiale de l'image sur les résultats de la classification..... 9
Figure 2: Couleur naturelle de la zone d'études de 2023, combinaison RGB 432 12
Figure 3:Evolution de la ville de Bujumbura jusqu'en 1983 19
Figure 4 : Carte de la ville de Bujumbura 2023 20
Figure 5 : Localisation de la zone d'étude 22
Figure 6: Projection de la population de 2008 à 20260 proportionnellement à la contribution des provinces concernées. 23
Figure 7: Carte des pentes de la zone d'étude 25
Figure 8: Zones qui seraient réservées à l'agriculture 28
Figure 9: Diagramme Méthodologique 32
Figure 10: Couleur naturelle de la zone d'étude 2023, combinaison 432 35
Figure 11: Carte d'occupation du sol 1986 40
Figure 12: Carte d'Occupation du sol 1994 42
Figure 13: Carte d'occupation du sol 2002 43
Figure 14: Carte d'Occupation du sol 2015 44
Figure 15: Carte d'Occupation du sol 2023 45
Figure 16: Répartition des superficies des classes en Km^2, 1986 52
Figure 17: Répartition des superficies des classes en Km^2, 2002 52
Figure 18: Répartition des superficies en Km^2 des classes, 2023 52

SIGLES ET ABREVIATIONS

BCG	Bureau de Centralisation Géomatique
CCT	Centre Canadien de Télédétection
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETM^+	Enhanced Thematic Maper
FSI	Faculté des Sciences de l'Ingénieur
GIS	Geographic Information System
GIZ	Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit
IGEBU	Institut Géographique du Burundi
INSBU	Institut Nationale des Statistiques du Burundi
ISTEEBU	Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi
KML	Keyhole Markup Language
LU/LC	Land Use/Land Cover
MIELS	Ministère des Infrastructures, de l'Equipement et des Logement Sociaux
OHP	Office de l'Huile de Palme
OLI	Operational Land Imager
ONU	Organisation des Nations Unies
PFNPRGC	Plateforme Nationale de Prévention des Risques et Gestion des Catastrophes
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
QGIS	Quantum Geographic Information System
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SCP	Système de Coordonnées Projetées
SIG	Système d'Information Géographique
SRDI	Société Régionale du Développement de l'Imbo

TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
UB	Université du Burundi
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System (Système Géodésique Mondial)

AVANT- PROPOS

Cette étude a été réalisée en vue de l'obtention d'un grade de Master en Génie Civil, Aménagement et Maitrise des Projets. Elle consiste à montrer l'impact des occupations anarchiques des sols, mauvaise gestion des terres urbaines et périurbaine sur la disponibilité des terres arables dans la zone étudiée.

A nos jours, que ce soit au Burundi et dans le monde, la question d'une bonne gestion des terres surtout urbaines et périurbaines se fait sentir. Des terres qui jadis étaient réservées à l'agriculture peuvent être occupées par des constructions, mettant en péril la végétation en général et l'agriculture périurbaine en particulier. Ce rétrécissement des terres agricoles génère souvent des impacts comme par exemple la chute des récoltes qui conduit à l'insécurité alimentaire, la dégradation de l'environnement, etc. C'est pour cela que ce sujet a été choisi vu notre domaine d'étude traite aussi l'Aménagement urbaine.

Dans cette étude, les données sont collectées auprès des satellites Landsat de différentes générations (Landsat 5, 7 et 8), capteurs des images de la zone d'étude. Ces dernières ont été traitées par classification supervisée afin d'en sortir des thématiques montrant l'agrandissement de la classe du bâti au détriment de la végétation.

Chapitre 1. INTRODUCTION GENERALE

1.1 Introduction

Le continent Africain connait ces derniers temps une démographie en flèche des taux de fécondité non négligeable comparativement au reste du monde entier (Leridon,2015, Sene 2017, Dumon 2010). La projection de l'Organisation des Nations Unies indique que cette population a été de 1.4milliards en 2022. La même source prévoit la population africaine de 2050 à 2.7 milliards et de 4.3milliards en 2100. L'Afrique et l'Asie s'urbanisent plus rapidement que les autres régions et, avec l'Amérique latine, ils représentent plus de 90 pour cent de la croissance urbaine mondiale (Bay. 2020). Comme le signale le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD, 2016 cité par Bay. A 2020), d'ici 2050, le taux d'urbanisation dans ces pays atteindra 63.4 pour cent. Il y'aurait donc quasiment autant de population dans les villes qu'il en a aujourd'hui sur toute la planète (Vallin, 1993 et cité par Bay. A 2020).

Le Burundi est aussi dans cet ensemble avec une démographie galopante. Sur ce cas, la population des années 1990 était de 5 292 793 habitants, en 2008 était de 8053574 habitants (ISTEEBU, 2008) et selon la même source, cette population burundaise a été projetée à 12 044 164 habitants pour l'année 2019. Des villes enregistrent en particulier, des montées en peuplement dues aux fonctions administratives et économiques qu'offrent ces dernières. A cela s'ajoutent, dans de nombreux pays en développement, des pressions démographiques en villes suite aux exodes rurales accentuées par le taux de chômage alarmant. Ce dernier était de 1% de la population active pour l'année 2020 (Banque Mondiale, 2020)

Cela doit nécessairement avoir des répercussions sur la demande en hébergement qui pousse vers la création spontanée des agglomérations voire des bidonvilles au sein des milieux a vocation urbaine. Des études sur la sauvegarde de l'environnement en général en Mairie de Bujumbura et ses environs ; les catastrophes naturels (Sindayihebura, 2005), (Ndikubwayo, 2019) sont là mais rares sont celles focalisées directement sur les impacts subis par les terres agricoles et leurs tendances dans des milieux surplombant Bujumbura, capitale économique du Burundi. Le Gouvernement a aussi commencé à recommander quelques méthodes dont la construction en hauteur, des logements

sociaux (Conseil des Ministres du 7 Juin 2023) pour la limitation de la consommation des terres agricoles. Dans ce travail, ces impacts sur des terres arables et leur gestion pour contrer l'étalement urbain dû aux constructions allant jusque dans des milieux qui jadis occupés par l'agriculture sont à analyser. Des conclusions et des recommandations à la fin de l'étude seront émises afin d'essayer de diminuer ces tendances et faire recours à d'autres stratégies pour une gestion durable des terres qui sont une ressource indispensable des citoyens burundais.

1.2 Problématiques et question de recherche

1.2.1 Problématiques

La pression de la population sur les ressources naturelles en général et sur la terre en particulier se traduit par une baisse de la fertilité de la terre, générant ainsi une baisse des rendements des cultures, (Malthus, 1798 cité par Jouve, P. 2006)**.** A ces conséquences s'ajoute la consommation des terres agricoles par le bâti. Cette population croissante, quoique elle-même peut constituer un facteur favorable à l'intensification agricole dans un pays non industrialisé (Ester Boserup, 2014), peut aussi nuire à cette dernière par ses interactions avec la nature, allant des simples effets aux impacts néfastes sur les terres arables. A nos jours, dans notre zone d'étude, s'observe un étalement urbain suite à l'occupation anarchique des sols. Cette urbanisation incontrôlée confronte le Burundi à plusieurs problèmes environnementaux dont la dégradation des sols végétalisés et leur rétrécissement, la perte de la biodiversité, la pollution de l'eau etc. Les milieux urbains et périurbains le sont en particulier. Dans la zone concernée, surtout à Bujumbura, le phénomène de consommation d'espace est réel et perceptible. Par observation, on peut remarquer l'émergence du bâti en construction ou en finition en Mairie de Bujumbura qu'en zone périphériques. Selon l'Institut National des Statistiques au Burundi (INSBU), la connaissance de l'occupation du sol autrefois axée exclusivement sur le territoire agricole s'étend aujourd'hui aux utilisations non agricoles (INSBU, Annuaire Statistique du Burundi, 2021). Cela affecte par après des productions agricoles et la sécurité alimentaire vu que le Burundi est un pays dont plus de 90% de la population vit de l'agriculture (ISTEEBU, 2015). Celle de cette zone d'étude n'échappera pas non plus à cette réalité.

L'élargissement des zones urbaines vers des milieux périphériques de la ville de Bujumbura, la tendance vers des créations des agglomérations quelques fois d'une façon non règlementée, en violation des codes d'urbanisme et d'aménagement territoriaux conduisent aux transformation des espaces verts et autres terres auparavant allouées à l'agriculture(cas de Carama qui était rizicole dans le temps) en milieu bâti. Les textes légaux recommandant les nouvelles stratégies en matière d'occupation du sol pour préserver les terres agricoles ont été mis en place (Communiqué du Conseil des Ministres 7Juin 2023) mais n'excluent pas la revue de leur mise en application car la réalité de terrain (visites effectuées dans Tenga local, Commune Mutimbuzi, province Bujumbura) montre que les terres agricoles (rizières et palmeraies) sont en pleine reconversion au profit des constructions. Tous ces problèmes et lacunes dans le domaine de l'urbanisation qui fait que le Burundi en général aille vers une occupation anarchique des sols au détriment des terres agricoles, constituent la problématique particulière de cette recherche dans la zone d'étude renfermant la capitale économique, Bujumbura.

1.2.2 Question de recherche

La montée en superficie bâtie, de façon antagoniste avec les superficies cultivables et/ou espaces végétalisés, a occasionné une diminution de ces derniers au cours des années considérées dans cette zone d'étude. Comme cela aurait probablement impacté la disponibilité des terres agricoles, son influence sur la quantité des récoltes. Cette diminution de superficie végétative est due au non-respect des lois d'occupation du sol qui sépare des zones à des fins agricoles à celles à construire. Tout ce qui précède constitue la question de recherche de ce travail.

1.3 Objectifs de la recherche

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la misse en évidence des mutations spatio-temporelles des sols végétalisées et/ou agricoles vers des zones construites et imperméabilisées. Des impacts sur des rendements agricoles seront à vérifier, s'il y aurait une influence de la superficie des sols végétalisées sur des rendements des années prises pour mener cette étude. Cette perspective justifie la méthodologie adoptée, celle de la classification supervisée des clichés satellitaires en vue d'en dégager cette superficie. Des conclusions qui en découleront permettront d'émettre quelques recommandations afin de pouvoir raviver le réveil de consciences sur des diverses

pratiques en faveur de la végétation qu'il faut afin de parier à des défis qui en découleraient.

1.3.1 Objectif global

L'objectif global de ce travail est de contribuer à la gestion optimisée de terres agricoles dans les zones urbaines et périurbaines, pour se conformer à un plan d'aménagement de la ville à l'image du Burundi à l'horizon 2060. Cet horizon se confronte avec la vision d'un pays émergent en 2040 et développé en 2060 initiée par le Gouvernement en place dont l'intensification de l'urbanisation et la promotion des logements décents pour désengorger le monde rural tout en réduisant la pression sur le foncier agricole (Vision de l'Etat du Burundi d'un pays émergent en 2040 et développé en 2060) est l'un de ses objectif. Avoir une bonne configuration urbaine au paysage de confort entre le bâti et la végétation en général ; et la complémentarité avec le respect des terres agricoles sont souhaitables également. Dans des lieux surplombant la capitale économique du Burundi, la sauvegarde des terres à vocation agricole contribuera à la sécurité alimentaire. Signalons que des prix des vivres aux marchés des centres urbains ne cessent de monter, du fait que l'approvisionnement se fait sur long trajet.

1.3.2 Objectif spécifiques

- Mettre en évidence la mutation de l'occupation du sol dans la zone d'étude, en l'occurrence le bâti et la végétation entre 1986 et 2023 par des cartes issues de la classification supervisée d'images satellitaires ;

- Montrer de façon quantifiée, des terres qui étaient végétalisées/et ou agricoles, qui sont aujourd'hui conquises par le bâti ;

- Evaluer les effets de cette dynamique du point de vue économique;

- Mettre en évidence les zones à vocation agricole dans cette zone étudiée ;

- Proposer des recommandations pour l'exploitation des sols dans cette zone d'Etude et autres voies de sorties et/ou d'atténuation en vue de la bonne gestion des terres comme ressource du bien-être social dans la zone d'intérêt qu'ailleurs pour le développement durable.

1.4 Hypothèses

Pour une bonne orientation de cette recherche, les hypothèses suivantes ont été mises en avant :

- Il y a une diminution diachronique de superficie végétative au cours des années considérées dans cette zone d'étude.
- La diminution de la superficie végétative a impacté des récoltes au cours des années considérées dans la zone d'étude.
- Les mesures proposées par des institutions habiletés en matière de planification urbaines ne sont pas décentralisées localement.
- La non implication de l'administration locale dans la lutte contre l'étalement urbain est un facteur favorisant l'occupation anarchique des sols.
- Il y a de la rigueur en matières de planification urbaines pour la mise en place et en application des lois et textes y relatifs ?

Ces hypothèses nous aideront, après des résultats de la présente étude et analyse approfondie des littératures, à confirmer ou infirmer l'objet de ce travail.

Chapitre 2. DOCUMENTATION ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Historique sur la télédétection

La vision aérienne de l'organisation du milieu terrestre a débuté au milieu du **XIX^{e}** siècle. En effet, dès 1859, Tournachon photographiait d'un ballon le village de Petit Bicêtre, en banlieue de Paris. Un an plus tard, les Américains King et Black rééditait l'exploit au-dessus de la ville de Boston (Anonyme ,1983). Les planificateurs utilisent les photographies aériennes depuis le début des années 1920 afin d'identifier l'organisation, la structure et les fonctions urbaines et suivre l'évolution de ce milieu.

La mise en orbite du satellite américain LANDSAT 1 en 1972 fut à l'origine d'une nouvelle révolution dans l'analyse de l'organisation spatial du milieu terrestre. Alors, les images satellitaires sont considérées comme une source de données extrêmement utile dans des domaines tels que la foresterie, la géologie et l'océanographie. En milieu urbain, la télédétection satellitaire a tardé à s'implanter parce que la précision des images de première génération (MSS de LANDSAT) n'était pas adéquate pour un environnement aussi hétérogène qui contient souvent des objets de petite dimension. La venue des images satellitaires de la nouvelle génération (TM de LANDSAT et HRV de SPOT), disponibles depuis peu de temps, offre une plus grande précision et ouvre donc de nouvelles perspectives pour les études en milieu urbain. D'autre part, le développement des systèmes de traitement d'images et de cartographie numérique permet de mieux exploiter le contenu en information de ces images soit en les rendant plus faciles à interpréter visuellement, soit en permettant des analyses statistiques ou des classifications dites automatiques. (Desjardins,R.&Cavayasm F.51991)

Dans la littérature, des autres auteurs ont procédé par photo interprétation et ont abouti aux résultats fiables en matière de planification urbaine. De ce qui précède, avec les théories et pratiques acquises en matière d'aménagement et organisation de l'espace, en Système d'information géographique (SIG), nous avons choisi la méthode dans cette recherche. Des revues bibliographiques sur les travaux similaires déjà réalisés nous ont permis de bien analyser les tendances d'occupation du sol de notre zone d'étude. Les renseignements historiques et anthropologiques ont été recueillis grâce à cette revue bibliographique. Aussi, lors de la discussion des résultats, une analyse comparative tournera autour des résultats de ces travaux. Un des précurseurs aménagistes et urbanistes ; comme Ebenezer

Haward pour des cités jardins ; Eco quartiers nous a aussi motivé pour se lancer dans cette recherche et la formulation de quelques recommandations.

2.2 Etude des changements d'occupation des sols dans la zone d'étude par télédétection

2.2.1 Définition de la télédétection

La télédétection est une technique permettant d'observer la terre à distance et d'obtenir différentes informations. Elle est appliquée en Aménagement du territoire, en agriculture,…

« La télédétection englobe tout le processus de qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter ou à analyser et ensuite mettre en évidence cette information » CCT

2.2.2 Prétraitement et Interprétation

2.2.2.1 Prétraitement des images

Les images téléchargées constituent des données brutes qui par conséquent nécessitent différentes opérations de prétraitement. Cette étape est cruciale pour le travail faisant appel à la télédétection car la réussite du traitement menant aux bons résultats dépend des prétraitements et comment ils ont été menés. Ces opérations consistent à l'amélioration des données brutes, les images satellitaires afin d'augmenter leur lisibilité. Dès lors, l'interprétation des données sera facile pour en extraire une information utile (TABOPDA, 2010).

Dans ce travail, les prétraitements faits concernent notamment:

- Formation des composites colorées ou mosaiquage d'image : Elle se fait par l'assemblage des bandes multi spectrales. Cette combinaison se fait ; avec le logiciel ArcGis 10.8 grâce à l'outil Arctoolbox-Data managment tools-raster-Raster processing-composite band. Cette opération qui aboutit à une seule image de plusieurs bandes rend la manipulation plus facile afin que les traitements se fassent simultanément sur l'ensemble des bandes regroupées (DENIS, 2016 cité par NDIKUBWAYO, 2019).

- L'extraction de la zone d'étude de l'ensemble de données vecteur dites « shapefiles » obtenues auprès des institutions habiletés. Comme ça on ne va rester qu'avec la partie constituant notre zone d'intérêt.
- Le découpage de la zone d'étude du même format (raster) que la composite formée, en fonction de la couche de forme (vecteur) dite « shapefile », la zone d'étude ciblée. Vue que les données images reçues des sites respectives couvrent de grandes superficies, cette opération vise à ne rester qu'avec la composite de la forme que la zone d'intérêt. Sinon ; la manipulation serait trop difficile voire inutile en fonction de l'objet de recherche. Le même logiciel et l'outil Arctoolbox ont servi pour cette opération.
- Amélioration de la qualité d'image de Landsat 7 : Depuis 2003 ; les images de Landsat 7 présentent des lignes dites scanlines rendant impossible la bonne visualisation et difficile à en tirer une information fiable. Des corrections sont faites dans QGIS via l'option « remplir les vecteurs nulles ».
- L'amélioration de la résolution spatiale : pour la plupart des images téléchargées ; la résolution spatiale était de 30mx30m. Cette dernière n'est pas partout fiable selon le domaine et les classes choisies pour étude. Elle ne serait fiable que pour l'étude généralise des objets de grande taille, d'emprise au sol supérieure ou égale à 30mx30m. Or ; cibler la classe du bâti ; par exemple une maison de 15mx24m dans une parcelle de 30m sur 30m induirait des erreurs de généralisation ; par exemple toute la parcelle serait considérer comme bâtie alors que l'autre partie serait végétalisée. Cela conduit directement à fausser les résultats des autres classes après la classification. Pour parier éventuellement à ce défaut, l'amélioration de la résolution spatiale pour l'adapter selon l'objectif de la recherche est faite par un traitement de type pansharpen afin d'augmenter leur résolution spatiale à 15m (Ministères des forêts, de la faune et des parcs de Québéc, 2015). Cette opération se fait dans Arcgis via l'outil Arctoolbox. La résolution de comparaison et dont prendra la valeur la couche raster composite en sortie sera celle de la bande panchromatique ; $8^{ème}$ bande, de 15m.

  Les figures ci-dessous montrent la nécessité du prétraitement visant l'amélioration de la résolution spatiale.

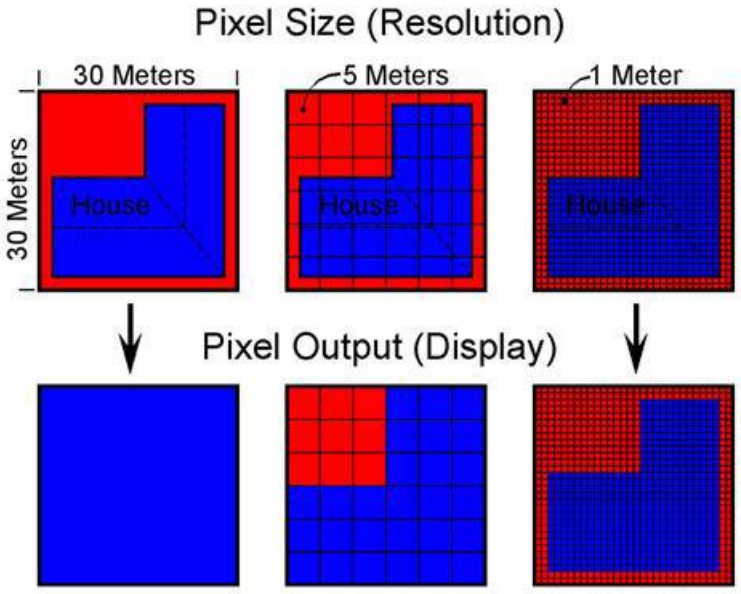


Figure 1: Influence de la résolution spatiale de l'image sur les résultats de la classification

Source : http://www.satimagingcorp.com/

- La projection de l'image dans le système de coordonnées de Référence : Quant à cette opération, Elle concerne les deux types de données, premièrement la couche vecteur puis la couche composite raster. Elle a pour but de pouvoir avoir en sortie après classification, une carte d'occupation du sol du même système de coordonnées de référence pour faciliter la manipulation et quelques calculs de la table attributaire en sortie. La projection choisie est celle Universal Transverse Mercator (UTM).

2.2.2.2 Interprétation

Le comportement de différentes classes les plus considérées en télédétection face au contact avec la source de la lumière est diffère d'une classe à une autre. Rappelons que dans ce travail, les classes qui seront considérées sont celles du bâti, de l'eau, de la végétation et celle du sol nu. Ici, différents comportements de ces classes en contact du soleil (source d'énergie principale en télédétection spatiale pour une acquisition d'information des capteurs), sont présentés:

- Bâti : Lorsque la source lumineuse frappe une zone bâtie, en émettant les longueurs d'onde(rouge, vert, bleu et infra rouge), sur les toits des maisons, il y a réflexion totale de toutes les longueurs d'onde ou encore réflaction spéculaire totale du rayonnement

électromagnétique. C'est pourquoi nous voyons généralement sur les images satellitaires la couler blanche car la totalité de l'énergie arrivée sur ce toit a été réfléchie en totalité. Donc ; nous voyons le blanc qui est la lumière naturelle.

- Eau / lacs: Lorsque les rayonnements électromagnétiques entrent en interaction avec les plans d'eaux, les longueurs d'ondes les plus fortes sont absorbées notamment le rouge et l'Infrarouge (R+IR) et il y a réflaction du brun et du vert. C'est pourquoi, sur l'image satellitaire on aura tendance de voir du brun et quelques tendances à voir du vert surtout quand il y a présence des algues.
- Végétation : Lorsque la source lumineuse frappe une végétation verte en émettant les longueurs d'onde(rouge, vert, bleu et infra rouge), la végétation absorbe le rouge et le bleu et il y a réflexion de longueurs d'onde réfléchie par les feuilles : le vert+ infra rouge. Cette association de longueur d'onde réfléchie se traduit en couleur marron après la combinaison des bandes RGB en 321 pour image issue des capteurs TM.
- Sols nus : pour le cas des sols nus, avec les mêmes paramètres, il y aura absorption par le sol de longueurs d'ondes bleus et réflexion du rouge, vert et Infrarouge. D'où le sol apparaitra sur l'image satellitaire en couleur marron qui est la combinaison du rouge et du vert.

N.B : les deux combinaisons dites initiales pour la vue de l'image naturelle ne seront prises en considération que pour l'échantillonnage de l'eau et du bâti seulement.

Sinon, une confusion entre la couleur marron montrant la végétation et celle marquant les sols nus entachera les résultats. Pour ce faire, une autre combinaison est envisagée.

Pour les capteurs autres que TM, la combinaison de base peut se faire avec 432.Avec cette combinaison, les différentes classes ci-haut évoquées peuvent changer d'apparence sur l'image satellitaire en traitement.

Signalons qu'il existe toute une série de combinaison selon les capteurs et la classe d'occupation du sol qu'on veut mettre en évidence. Dans la plupart des cas ; pour mettre en évidence les sols nus on considérera la même combinaison que celle faite pour localiser la présence des plans d'eaux. Le tableau suivant montre les différentes combinaisons couramment opérées et l'interprétation de différentes classes.

Tableau 1 : Différentes combinaisons selon la classe d'occupation du sol à analyser

Classe visée	Landsat 5(Bandes utilisées)	Landsat 7(Bandes utilisées)	Landsat 8(Bandes utilisées)
Couleur naturelle	321	432	432
Fausse couleur (urbain)	432	764	764
Terre/eau		564	564
Couleur infrarouge (végétation, cultures)	453/742		543/562/652/654

- **Vue naturelle des images traitées selon des combinaisons effectuées**

Signalons que combinaison 321 va se faire pour les images de Landsat 5 et celle de 432 va s'opérer pour des images de Lansat 7 et 8. Les différentes classes vont se présenter sous des aspects différents de ceux évoqués en haut. La zone du Bâti va apparaitre en bleu très clair, alors que les plans d'eau prendront soit un bleu foncé pour eau profonde ou peu turbide a bleu vert pour eau à faible profondeur ou de forte turbidité. La végétation sera ciblée grâce à sa couleur proche de l'infrarouge. Elle est rouge vif (forêt) et rouge plus terne (mangrove). Quant aux sols nus, ils se feront remarquer par une couleur rouge rosé. La figure suivante sert d'exemple des vues d'images satellitaires de la zone étudiée à l'état naturel.

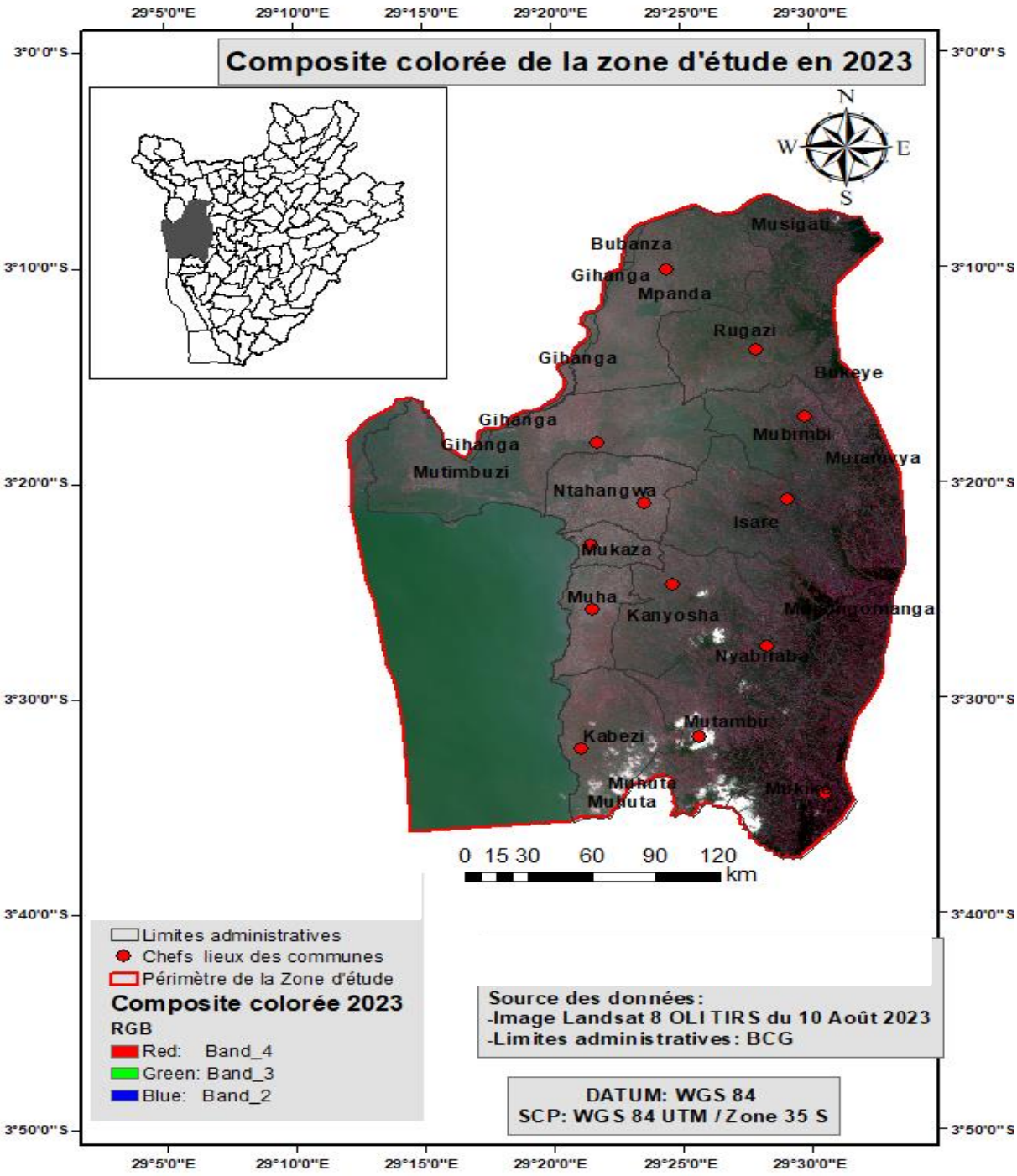


Figure 2: Couleur naturelle de la zone d'études de 2023, combinaison RGB 432

Ici, Avec la combinaison 432, les différentes classes vont se présenter sous des aspects différents de ceux évoqués en haut. La zone du Bâti va apparaitre en bleu très clair, alors que les plans d'eau prendront soit un bleu foncé pour eau profonde ou peu turbide au bleu vert pour eau à faible profondeur ou de forte turbidité. Les espaces végétales seront ciblées grâce à

la couleur proche de l'infrarouge. Elle est rouge vif (forêt) et rouge plus terne (mangrove). Quant aux sols nus, ils se feront remarquer par une couleur rouge rosé.

2.2.2.3. Déroulement de la classification supervisée

Pour réaliser une classification supervisée d'une image satellitaire sous-entend une bonne connaissance de l'occupation réelle du sol de la zone de l'image à l'époque où elle a été prise (DENIS, 2016 cité par NDIKUBWAYO 2019).

Comme une bonne partie de la zone à étudier est bien connue suite aux visites effectuées et aux contacts effectués avec des personnes anciennes de quelques endroits ciblés, en plus de l'exploration sur Google Earth, pour des images de 2005 à 2023 ; la classification supervisée en classes thématiques choisies a été la méthode utilisée afin d'en ressortir des tendances d'occupation des sols en zone d'étude.

Pour se faire, sur l'image raster prétraitée ; dans la fenêtre « classification des images » du logiciel ArcGis, la formation des polygones échantillons sur l'image est l'étape primordiale de la classification. Ces polygones sont des groupes homogènes de pixels qui représentent des classes intéressantes de surfaces (www.sigterritoires.fr). Des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information) forment un ensemble de données-tests (samples). La sélection de ces données tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec les régions géographiques et les types de surfaces présents dans l'image. Les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour que l'ordinateur puisse définir les classes et ensuite reconnaitre des régions aux propriétés similaires à chaque classe (www.sigterritoires.fr).

Dans ce travail , l'algorithme « Maximum Likelihood Classification » a servi pour affecter chaque pixel de l'image à la classe avec laquelle il a le plus d'affinités et par après sortir une carte thématiques représentante des classes d'occupation du sol (classes d'information) dont on a collecté des classes spectrales échantillons tests. Pour toutes les périodes considérées dans cette étude, des informations quantitatives et qualitatives constituent les résultats escomptés de ces traitements.

2.2.2.4. Evaluation et validation de la classification supervisée

Les résultats de la classification nécessitent une certaine vérification de leur fiabilité. Pour évaluer cette dernière, de nombreuses méthodes basées sur les résultats statistiques de la classification sont proposées (LAFLEUR, 2015 cité par NDIKUBWAYO 2019). Il s'agit entre autre de la matrice de confusion, l'indice de séparabilité des classes ou de la visite de terrain. Ici, la première méthode a été le choix préféré.

2.2.2.5 Création des points d'évaluation de précision

Pour effectuer une évaluation de l'exactitude de la classification, deux paramètres doivent être spécifiés : le nombre de points aléatoires et la stratégie d'échantillonnage. Cela sera rendu possible grâce à l'outil de arctoolbox , «spatial analysis tools»

- **Nombre de points aléatoires**

Avec le paramètre nombre de points aléatoires ; le nombre de points qui vont être générés sont choisis en fonction du nombre de classes. Pour le cas présent, avec quatre classes traitées (bâti , eaux, végétation, sols nus), le nombre minimum de 100 points pour chaque classe a été utilisé pour la vérification de la véracité des classifications faites.

- **Stratégie d'échantillonnage**

Il existe trois types de stratégies d'échantillonnage : aléatoire, stratifié aléatoire , Equalized stratified random. Pour ce travail, la dernière stratégie a été utilisée. Il s'agit de la création des points distribués de manière aléatoire et égale dans chaque classe. Donc, chaque classe a eu au moins, dans toutes les images classifiées, 100 points d'évaluation distribués aléatoirement.

Après la transformation de ces points en fichier KML pouvant s'ouvrir dans Google Earth ; la vérification des pixels de l'image classifiée auxquels affectés ces points à la réalité de terrain sur Google Earth , la matrice de confusion[1] est générée automatiquement à base d'une table attributaire issue d'une intersection des tables des classifications faites entre deux périodes qu'on veut comparer le changement des classes. Cette opération est faite dans Microsoft Excel. La génération de la matrice de confusion va donner des autres paramètres essentiels

[1] https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/accuracy-assessment.htm

pour la mesure de précision. Ces paramètres sont : la précision globale, indice kappa, la précision utilisateur et la précision producteur.

- ✓ La précision globale : Elle correspond au rapport entre le nombre de pixels correctement classifiés et le nombre total de pixels utilisés dans la vérification. Une classification est dite fiable et exploitable si et seulement si la précision globale est supérieure à 80% (LAFLEUR, 2015 cité par NDIKUBWAYO, 2019).
- ✓ Indice de Kappa : La statistique dite statistique d'accord fournit une évaluation globale de l'exactitude de la classification (https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/accuracy-assessment.htm). Cet indice est calculé à partir des informations d'une matrice de confusion dont les lignes montrent la précision d'utilisateur[2] et les colonnes celles du producteur[3]. C'est donc un estimateur de qualité qui tient compte des erreurs en ligne et colonnes. La valeur de la précision globale et celle de l'Indice de Kappa varient entre 0 et 1 où 1 représente une précision de 100%. Le tableau suivant montre les différentes valeurs de l'indice de Kappa et leurs degrés d'accord.

Tableau 2: Différents degrés d'accord de la valeur de l'indice de Kappa

Degré d'accord	Valeurs de l'Indice de Kappa
Excellent	≥ 0,81
Bon	0,80 – 0.61
Modéré	0,60 - 0.41
Médiocre	0,40 – 0,21
Mauvais	0,20 – 0,0
Très mauvais	

Source : EMRM, 2005 cité par LAFLEUR, 2015

Si par exemple, après toutes les opérations de classification, vérification des pixels classés représentés par les points aléatoires confrontés à la réalité de terrain (ground truth), on trouve une valeur de Kappa de 0,80 ; cela révèle que 80% des pixels de la thématique issue de la classification représentent exactement la réalité du terrain et les autres pixels de valeur 20%

[2] https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/accuracy-assessment.htm
[3] https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/accuracy-assessment.htm

seraient classés de façon erronée. Rappelons que plus la valeur de Kappa est proche de 1, plus la classification est meilleure.

- ✓ La précision de l'utilisateur : Cette valeur montre le pourcentage de la précision par classe. Pour le cas présent, parmi les quatre classes définies, on verra plus loin si les pixels de chaque classe sont bien classés ou pas.
- ✓ la précision du producteur : Quant à cette valeur, elle montre la réalité du terrain par rapport à la classification faite. Elle indique dans quelle mesure les résultats de la classification répondent aux attentes du réalisateur. Si par exemple lorsqu'un point d'évaluation de précision identifie un pixel comme étant du bâti, mais que l'image classifiée l'identifie comme une végétation. Dans ce cas ; la classe bâti ne contient pas suffisamment de pixels selon les données de référence.

Aussi, de ces deux valeurs précédentes, des erreurs de commission et d'omission respectivement représentant le pourcentage des pixels incorrectement classés dans une classe alors qu'ils pourraient être classés ailleurs et pour des pixels manquant dans une classe selon la vérité de terrain peuvent amener le réalisateur de l'étude à remettre en cause la classification faite.

2.2..2.6 Etude statistique des résultats de la classification

Après la classification et la validation des résultats, une analyse quantitative et statistique sur les thématiques de différentes périodes considérées est requise. Cette analyse porte sur les variations temporelles et spatiales de différentes classes prédéfinies. Ces changements sont décelés après le calcul des tables attributaires et la formation des matrices de transition entre périodes considérées. Des premières, les superficies sont obtenues de façon quantitative ; et de la matrice de transition sont mis en évidences par des conversions d'une telle quantité de pixels d'une classe donnée vers une ou autres classes.

- ➢ Pour les changements quantitatifs, les calculs de la table attributaire de la thématique ressortie de la classification, via l'opération ''calculate geometry'' du logiciel ArcGis 10.8, sont opérés. Une superficie de chaque classe est calculée. C'est à partir de ces valeurs calculées pour toutes les périodes que des variations sur chaque classe seront mises en évidences. De soustractions des chiffres de même classe entre deux périodes consécutives peuvent montrer soit qu'il y a eu régression ou augmentation.

- Concernant les conversions des superficies entre classes, le même logiciel ci haut mentionné fournit la matrice de transition qui, traitée dans excel 2010 par tableau croisé met en exergue de manière condensée, sous forme de matrice carrée, les changements d'état des éléments composant le paysage pendant une période donnée (Bell, 1974 ; Turner, 1994 ; Schlaepfer, 2002 cité par Mikwa, 2010 et par Ndikubwayo, 2019). Les cellules de la matrice contiennent la valeur d'une variable ayant passé d'une classe initiale *i* à une classe finale *j* pendant la période considérée. Cette matrice ne contient aucune information sur la distribution spatiale des changements, ni sur les processus et causes ayant conduit aux changements mais informe sur la proportion d'affectation d'un type i d'utilisation de sol à un état j réalisé pendant la période concernée. Elle ne tient compte que des états des éléments aux temps initial et final (Mikwa Ngamba, 2010 cité par Ndikubwayo, 2019).

  L'outil geoprocessing –intersect de arcGis 10.8 a aidé pour former une table attributaire condensée de deux périodes considérées, qui après ''calculateur des champs ou field calculator'', a donné des changements interclasses détectés.

2.2.3 Les limites de la vérification de la classification

Pour la méthode de vérification utilisée, comme les autres travaux antérieurs consultés, la visualisation des pixels sur Google Earth par les points aléatoirement créés et transformés en fichier kml, sur quelques images googles earth ont été difficilement décelables. Il s'agit des images de 1986 et 1994. Les zones bâties sont presque floues là où la connaissance du terrain n'est pas bien assurée. Une attention particulière a été apportée sur ces cas et les résultats ont été bons.

Chapitre 3. MILIEU D'ETUDE, METHODOLOGIE ET MATERIELS UTILISES

3.1 Milieu d'étude

3.1.1 Situation géographique

Le cadre géographique du présent travail s'étend sur une zone de 1553 km ^{2} soit 155300 ha y compris la partie immergée. Globalement ; c'est une partie de l'Ouest du Burundi en Afrique de l'Est, entre 29°10' et 29°46' de Longitude Est et 3°00' et 3°43' de latitude Sud. Administrativement, ce travail se déroulera sur l'entièreté de la ville de Bujumbura dite Mairie de Bujumbura, et les terres qui surplombent cette dernière. Nous citerons entre autres les communes de Isale, Kabezi, Kanyosha, Mubimbi, Mutambu, Mutimbuzi, Nyabiraba et une partie de Mukike de la province de Bujumbura autrement dit Bujumbura rural. La province de Bubanza est aussi touchée par ses communes de Mpanda, Rugazi et Bubanza. Une petite partie de la commune de Muramvya est aussi concernée. Généralement, la zone d'intérêt pour ce travail part de la crête Congo-Nil vers sa partie Ouest ainsi qu'une bonne partie la plaine de l'Imbo.

3.1.2 Historique spatio-temporelle de la ville de Bujumbura

L'exploration du site par David Livingstone et Sir Henri Morton Stanley en 1871 marque l'histoire de Bujumbura (source). Sa fondation officielle comme ville de Bujumbura se fait en 1897 par les chefs coloniaux allemands .Son extension s'est poursuivie au fur du temps passant de 0.3km^2 en 1907(PNPRGC/Burundi, 2014) à 37km^2 en 1983 selon la même source. La figure N^o 1 illustre l'évolution dans le temps et l'espace de la ville de Bujumbura

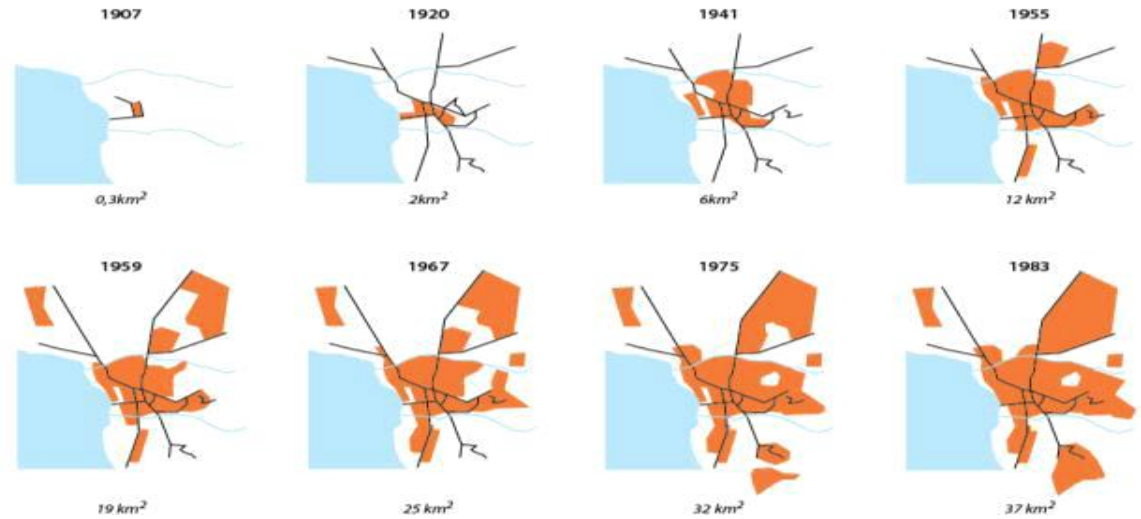


Figure 3:Evolution de la ville de Bujumbura jusqu'en 1983

Source : PNPRGC/Burundi, 2014 cité par Ndikubwayo 2019.

3.1.3 Situation actuelle de la ville de Bujumbura

A nos jours, la superficie de la ville de Bujumbura a augmenté. Comme soulevé en haut, l'accroissement général de la population, les fonctions présentes dans cette ville jadis politique et économique, sa position stratégiques près du lac Tanganyika conduiraient inévitablement vers des urbanisations conséquentes afin de répondre aux demandes accrus des parcelles. Les descentes en masses des jeunes chômeurs en quête d'emploi en ville et la guerre civile de 1993-1998 ont conduit à une demande en flèche des habitations. Vue que l'occupation du centre-ville et des parcelles bien aménagées n'étant pas favorables aux personnes à bas revenus ; ces scenarii conduisent alors ces personnes de faibles revenus vers un assaut aux zones périphériques des quartiers populaires. D'où des élargissements désordonnés de la ville de Bujumbura et l'utilisation abusive des terres arables par l'habitat spontanée en dehors des zones officiellement attribuées à cet effet. Sindayihebura (2005).

Sa superficie atteint aujourd'hui plus de 120 km^2. La figure suivante montre son envergure actuelle.

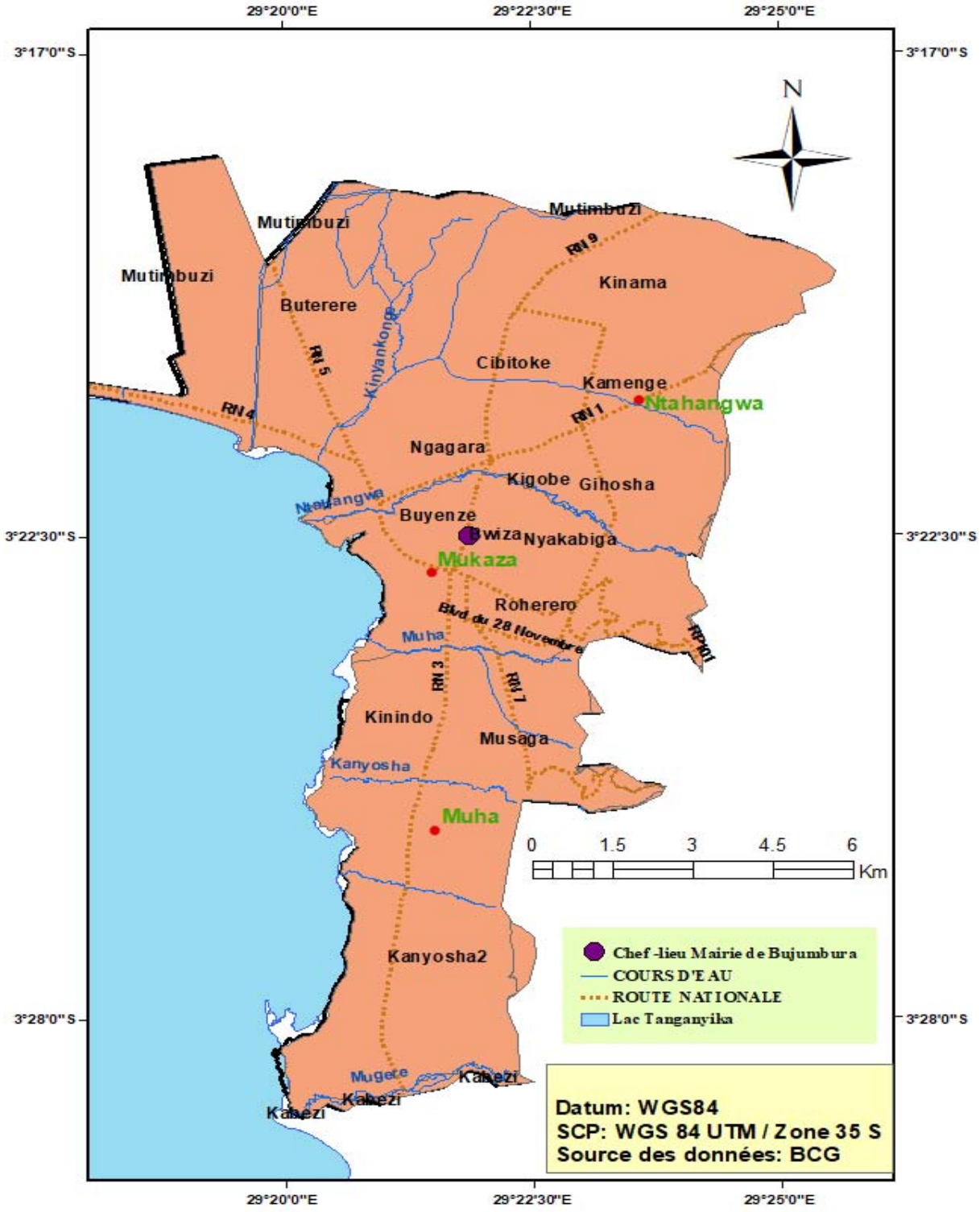


Figure 4 : Carte de la ville de Bujumbura 2023, Auteur : HAKIZIMANA Pierre

3.1.4 Délimitation spatio-temporelle de l'étude

Le travail porte sur la période de 1986 à 2023, soit sur une période d'environs 40ans. Du point de vue spatiale, la zone d'étude sera limitée à l'Ouest par le lac Tanganyika, au Nord

par la rivière Mpanda, au sud elle englobe toute la commune de Kabezi et à l'Est, elle limitée par la ligne de partage des eaux de la crête Congo-Nil. La superficie totale est de 1553.875369km^2 dont 120.4km2 pour la ville de Bujumbura, 342km^2 des eaux et le reste pour les parties de Bubanza, Bujumbura dite rural et les communes de Bukeye et Muramvya constituant le versant ouest de la crête Congo-Nil. Comme le montre la carte, point de vue géographique, le secteur concerné dans notre étude est en grande partie les communes des versants Ouest de la crête Congo-Nil, à l'ouest du pays.

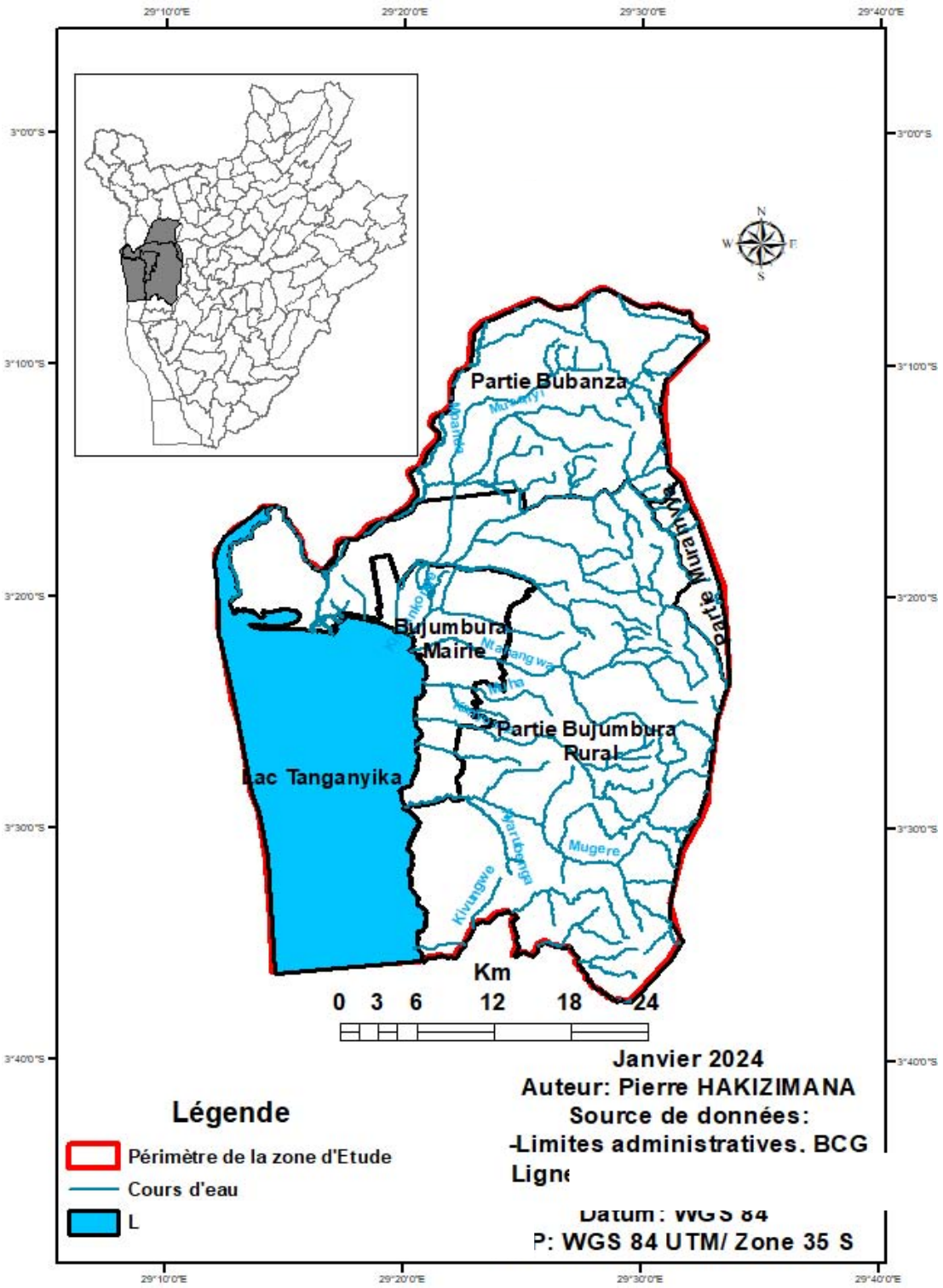


Figure 5 : Localisation de la zone d'étude **Auteur : HAKIZIMANA Pierre**

3.1.5 Evolution démographique dans la zone d'étude.

Selon les données du dernier dénombrement de la population et de l'habitat d'Août 2008(RGPH, 2008), le Burundi comptait 8 053 574 habitants femmes et hommes confondus.

Notre zone d'étude en compterait 981 938 habitats à la même date. Elle compte, en 2023, selon la formule de Pelletier & Spoorenberg une population de 1 618 654 habitants qui en 2060 est estimée à 3 935 132 habitants. Ladite formule est qualifiée adaptée pour la zone d'étude parmi des autres de la littérature. Il s'agit d'une formule basée sur l'extrapolation des tendances applicables dans l'hypothèse de la population qui change avec le même taux par unité temporelle et changement s'opérant à l'intervalle distincts (Pelletier & Spoorenberg, 2016). La formule montre que l'accroissement de la population suit une progression géométrique (Ndikubwayo, 2019). Cette formule est la suivante :

$Pt = P_0*(1+q)^n$ avec Pt: population à l'année t

P_0 : population issue du RGPH de 2008 (ISTEEBU, 2008)

n : t-2008

q : ((Po*Pt-Po)/2*po)*100 ici q = 2.4% (taux d'accroissement annuel moyen supposé constant)

La figure ci-dessous montre alors la projection de cette population à l'horizon de 2060. Signalons que les statistiques de 2008 dans notre zone d'étude ont été traitées en fonction des proportions spatiales des communes concernées par la recherche. D'où certaines communes sont sur la figure représentées en population de départ visiblement inférieure à celle présentées par le recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2008

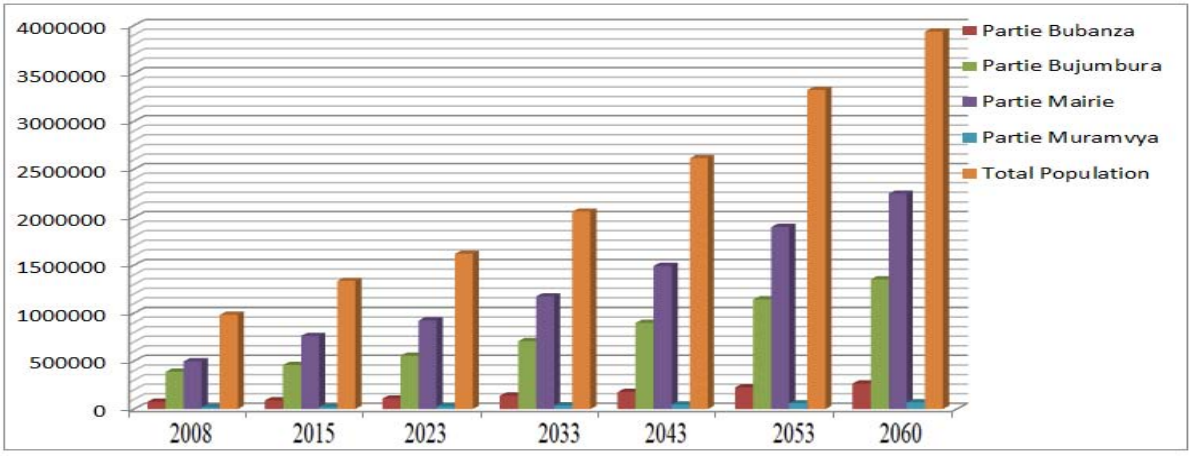


Figure 6: Projection de la population de 2008 à 20260 proportionnellement à la contribution des provinces concernées.

3.1.6 Climat et Relief

3.1.6.1 Relief

La zone qui fait objet de notre étude comme ci-haut citée, est formée par la partie de l'imbo, la crête Congo Nil et son versant Ouest. Elle s'étant sur trois zones agro écologiques dont :

- ✓ L'Imbo, qualifiée de basses terres suite à ses faibles pentes, au relief plat avec altitude comprise entre 800 et 1200m ;
- ✓ Le versant Ouest de la crête Congo-Nil domine l'Imbo avec les altitudes variant entre 1200m et 1900m, avec des terrains à fortes pentes exposées à l'érosion. Le relief de cette partie est très marquée avec des pentes variant de 70% à plus de 100% (Nzigidahera, 2012 cité par Ndikubwayo, 2019) ;
- ✓ La crête Congo Nil, prenant naissance au pied de la chaine des Virunga, au Nord du Rwanda et se poursuivant, après le Burundi, en Tanzanie, définie la ligne de partage des eaux entre deux bassins hydrographiques, celui du Congo et celui du Nil. Les pentes sont raides supérieures à 50% en moyennes. Au Sud, le relief est marqué par des hauts plateaux (Nzigidahera, 2012 cité par Ndikubwayo, 2019).Cette partie a une altitude variant entre 2000 et 2500m.

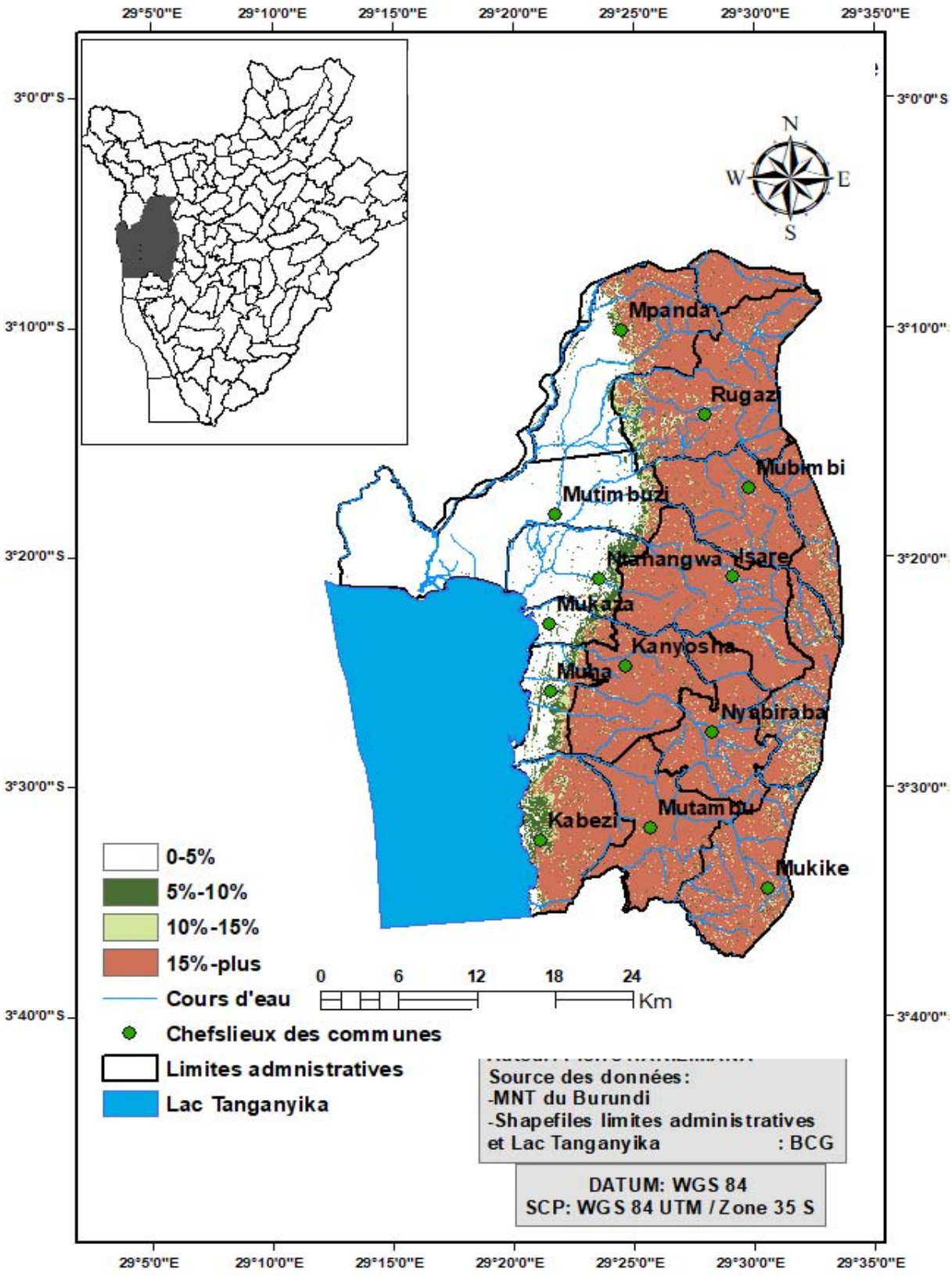


Figure 7: Carte des pentes de la zone d'étude Auteur : HAKIZIMANA Pierre

3.1.6.2 Climat

La zone d'étude est soumise à des conditions hydrométéorologiques et agro météorologiques variées comme toute autre partie du Burundi. Ces conditions sont conséquentes du dessin topographique du territoire définissant six zones éco-climatiques (Nzigidahera, 2012).

Ces trois zones agro écologiques font que la partie étudiée soit aussi composée de trois types de climat :

- ✓ Un climat relativement sec et chaud dans la partie Imbo. La température moyenne dans cette partie des basses terres est supérieure à 23 ^{0}C. La partie de l'imbo en général connait des précipitations annuelles moyennes allant de 800 à 1000 mm.
- ✓ Le versant Ouest de la crête Congo-Nil domine l'Imbo avec les altitudes variant entre 1200m et 1900m, avec des terrains à fortes pentes exposées à l'érosion. Les précipitations sont comprises entre 1100 a 1900mm de pluies annuelles.
- ✓ La crête Congo-Nil avec 1300 à 2000mm de précipitation et des températures moyennes variant de 14 à 15°C.

La zone d'étude a deux grandes saisons comme presque partout au Burundi :

- grande saison sèche : de juin à mi-septembre. C'est pendant cette dernière que les marais son exploitées pleinement, saison culturale C

- Grande saison des pluies : Cette saison de mi-février à mai constitue la saison culturale Rappelons que, de ce qui est des saisons culturales, il ya aussi celle dite saison A(mi-septembre à mi-Décembre).

3.1.7 Pédologie et Cartographie de la disponibilité des principaux éléments nutritifs du sol

3.1.7.1 Pédologie

Les différentes catégories des sols que connait le Burundi en général varient suivant la proximité des roches-mères, la pente, l'altitude, les types d'utilisation, le facteur hydrologique et le couvert végétal (Nzigidahera, 2012 cité par Ndikubwayo, 2019)). Ainsi, les caractéristiques pédologiques de notre zone d'étude constituent trois grandes zones pédologiques. Nous citerons de l'Est vers l'Ouest :

La crête Congo-nil : Cette partie est composée des ferisols, les kaolisols et les sregosols.

Les contreforts de Mumirwa : Malgré sa topographie abrupte facilement érodable, cette zone a une pédologie dominée par des ferrasols, les regosols et les ferrisols.

Une partie de la plaine de l'Imbo : Cette partie constitue plus de 90% de notre zone d'étude. De sa topographie basse, elle regorge une grande partie des sols fertiles composés par des des sols noirs argileux « igihomba » rassemblant des vertisols et les sols fortement vertiques comme les « gégosols mélaniques ». Des terisols sont en particuliers sont des terres fertiles propices au coton et à la riziculture (Sindayihebura, 2005)

Selon la même source, la zone renferme aussi des beiges limoneux dont les regosols des alluvions récentes qui sont des terres fraiches et fertiles qui conviennent aux bananeraies, aux haricots et au maïs.

A Katumba, des sols salins dits « igitumba » qui sont des sols appréciés par le bétail.

3.1.7.2 Cartographie de la disponibilité des principaux éléments nutritifs du sol

Pour analyser la fertilité du sol, les indicateurs mis en jeu sont le plus souvent le pH du sol, les quantités de l'azote totale, du calcium échangeables, du magnésium échangeable, du Potasium échangeables et du Phosphore assimilable du sol ; selon une Etude de la fertilité du sol, (ISABU, 2022). La même source poursuit que les teneurs en Carbone Organique du Sol sont faibles dans les zones à températures élevée, ce qui poussera à le négliger dans cette recherche vu que la zone d'étude est en grande partie dans la plaine de l'Imbo. Au cas contraire, la disponibilité du Magnésium à plus de 96% et de l'azote à plus de 98% dans la plaine de l'Imbo abritant la zone d'intérêtà conduit aussi à les négliger dans la superposition cartographique faite.

Alors, le phosphore assimilable et le Potassium échangeable (P,K) ainsi que le degré d'acidité qui présentent des disparités ont été mis en jeu.

Sur le schéma, les parties des provinces des provinces de Bubanza, Bujumbura Mairie, Bujumbura Rural et celle de Muramvya seront qui constituent cette zone d'étude seront respectivement désignées par A,B,C et D. Les couleurs de la légende montrent, de façon décroissante le taux d'acidité du sol et du manque de quelques principaux éléments nutritifs NPK de la zone étudiée. Les zones moins rouges sont relativement favorables à l'agriculture. Par conséquents, les décideurs en matière de la viabilisation pourraient s'en servir.

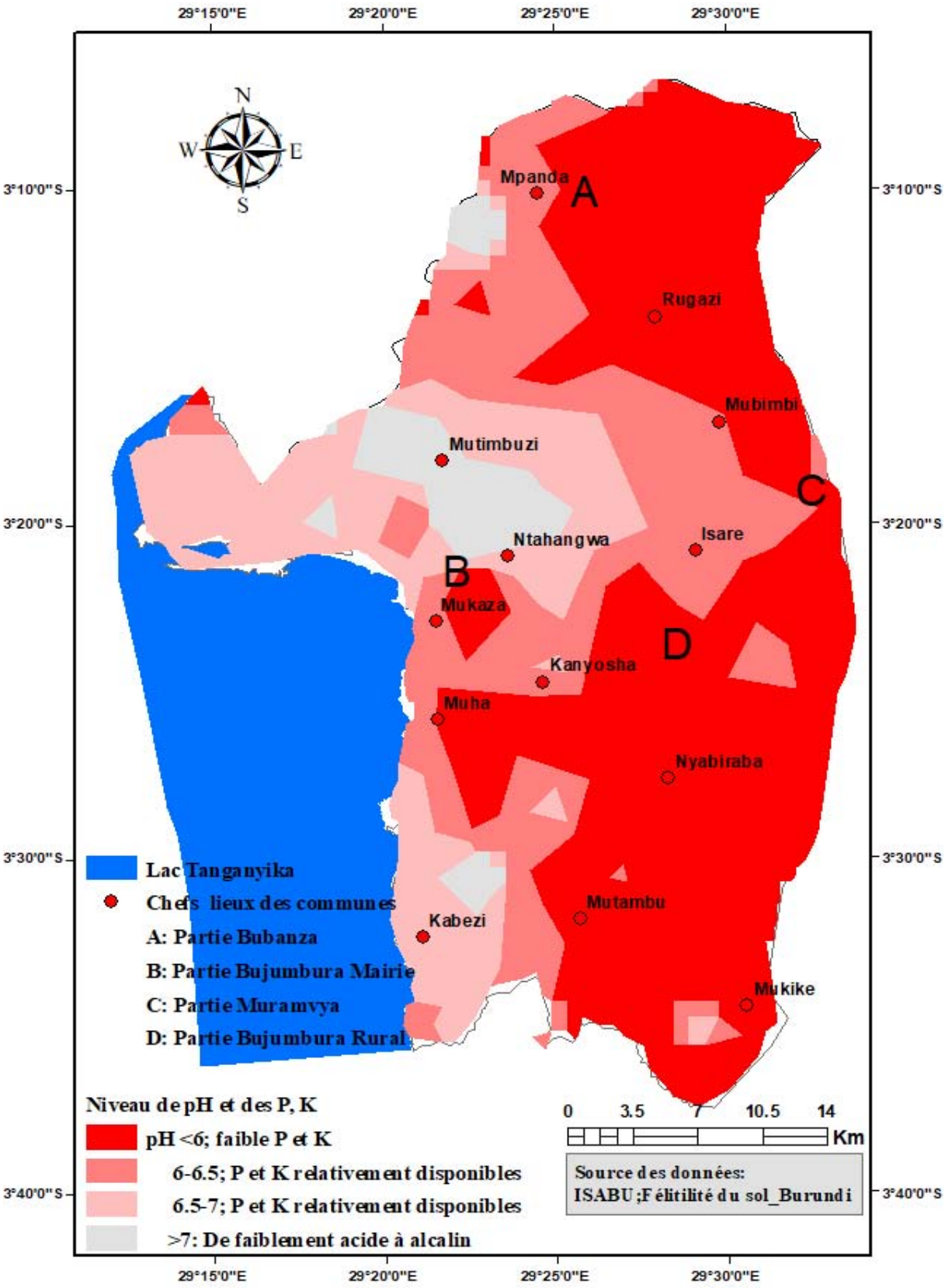


Figure 8: Zones qui seraient réservées à l'agriculture Auteur : HAKIZIMANA Pierre

3.1.8 Les grands types de cultures cultivées

Dans la plaine de l'imbo où se situe la zone d'étude, l'agriculture a été pratiquée à grande échelle. Des sociétés dites de développent régional de l'Imbo exploitaient la zones jadis à majorité rizicole (Sindayihebura, 2005). Des cultures vivrières qu'industrielles récoltées faisaient respectivement source de nourritures et de devises. Cette activité agricole se réalise en trois saisons : Saison A, saison B et saison C respectivement connues en langue nationale comme « Urutumba, Impeshi et indimo zo mu myaba». Des grands périmètres rizicoles au nord dans cette plaine, aménagés de façon moderne à Mugerero et encadrés par la SRDI dans la localité de Gihanga irrigués par les eaux de Mpanda et de Ninga sont occupés par les rizières entre Novembre et le début de la saison sèche (Sindayihebura, 2005). Néanmoins, la forte pression démographique sur les centres urbains contribue à une parcellisation croissante et anarchique des exploitations, ce qui peut avoir des répercussions sur des récoltes et ainsi sur la sécurité alimentaire au Burundi. Ici, l'analyse comparative des récoltes des périodes considérées pour cette recherche, en confrontation avec les résultats de la classification loin réalisée, servira à tracer l'impact des occupations anarchiques des sols sur ces terres agricoles.

3.1.8.1 Cultures Vivrières

Comme signalé en haut ; cette partie Ouest du Burundi a été depuis des années la zone des cultures vivrières dont le riz, le maïs, le sorgho, le haricot, le petit pois et l'éleusine. Les tubercules aussi comme le manioc, les patates douces, la colocase, et les bananeraies se cultivent dans les provinces constitutives de cette zone même si en proportions inégales. Par exemple parmi les rendements des cultures vivrières, selon les résultats de l'Annuaire agricole du Burundi 2005, le blé et les ignames ne présentent pas de chiffres pour la province de Bubanza. Le rendement en pomme de terre aussi se voit rarement dans cette province comme la culture du riz à Muramvya. Mais, cette zone a abrité depuis des temps l'une des plus nombreuses associations de production agricole à alimenter la population Burundaise en général. Même si difficile à chiffrer sans fuite, les productions vivrières selon les années prises comme cible dans cette étude seront mises en évidence pour contribuer à montrer l'importance d'une attention particulière à porter à la gestion des terres agricoles.

3.1.8.2 Cultures industrielles

Parmi les cultures industrielles, nous citerons le café (Arabica et Robusta), le Coton, le Thé, la Canne à sucre, le riz, le palmier à huile et le quinquina. Ces plantes sont d'importance capitale dans la contribution de l'économie du pays. Déstabiliser les terres qui fourniraient de tels produits par des constructions anarchiques constituerait une menace aussi pour la trésorerie de l'Etat.

- Le Thé : Cette culture quoique cultivée à Muramvya ne représente pas une dominance remarquable dans la zone d'étude. Elle n'est pratiquée que sur certaines collines de Muramvya

- Le riz : La SRD Imbo encadre des associations de riziculteurs qui exploitent un périmètre rizicole d'une superficie de 4023 hectares. Le rendement moyen sur ce périmètre est de 5.7 Tonnes/ha. A Bujumbura se trouve une rizerie pour se charger du décorticage des récoltes du riz paddy et en assure l'emballage (ISTEEBU, 2005). Ces récoltes proviennent des différentes variétés provenant exclusivement des 17 associations.

- Le palmier à huil**e :** Depuis l'année 1996 jusqu'en 1999, cette culture du palmier à huile a été encadrée par la SRD Imbo. Cultivée sur 6163 hectares ; le rendement varie jusqu'aujourd'hui entre 12 et 14 tonnes de régimes/ha/an. C'est à partir de l'année 2000 que l'Office de l'Huile de Palme(OHP) a pu disponibiliser les données statistiques précises (ISTEEBU, 2005).

- Le quinquina. : Cette culture rare au Burundi, est cultivée dans les localités de notre zone d'intérêt. Elle est localisée entre les communes de Mubimbi et Muramvya depuis 1974 jusqu'en 2020 (https://burundi-agnews.org)

3.1.9 Les menaces des zones végétatives perceptibles dans la zone d'études

Des images google earth révèlent un changement perceptible entre 1986 et 2023 au niveau de la zone étudiée (cfr les images traitées). On citera la partie centre sud-est de l'Imbo.

Plusieurs changements majeurs se manifestent entre 1986 et 1994. D'une part, la plantation de café robusta à Kivoga (Murago) est sérieusement écornée le long de la Muzazi et sur son flanc sud-ouest par les cultures variées intensives, qui se substituent également aux

restes de savane (Sindayihebura, 2005). La même source poursuit que de nombreux villages ruraux se sont créés, village de Carama.

Cette zone aujourd'hui bâtie était une bonne source de revenus agricole avant 1994, et s'est transformée progressivement en zone intensivement urbanisée vers 2005. Des canaux d'irrigations primaires et secondaires tracés entre 1986 et 1994 se facilement reconnaissables. La partie située a l'est de la RN 9 à Gasenyi et à Cibitoke est dominée par les cultures variées intensives et cultures pérennes. Les villages s'organisent autour des activités agricoles telles que la culture du riz à l'Ouest, Sindayihebura (2005).

La ville de Bujumbura qui, avant 2005 était allouée à l'agriculture rizière qui par après a subi des transformations en zone habitables. Ces dernières se sont opérées de façon non techniques. En plus de l'amincissement des superficies cultivables périurbaines, cet acte conduira des occupants de la localité vers une série de problèmes liés à l'assainissement. Des cas pareils se font voir dans la commune Mutimbuzi dans ses agglomérations de Tenga local, qui étaient de bons champs de palmeraie, de maïs, etc.

3.2 Méthodologie

La télédétection et les technologies SIG dans cette étude diachronique sur l'occupation des sols dans la zone d'étude ont pris une place importante. Cela a été rendu possible, comme ci-haut cités, grâce aux logiciels, ArcGis 10.8, QGis 3.22.3 et Google Earth pro. Avec ArcGis et QGis , le prétraitement des images satellitaires pour la bonne qualité de résolution afin d'avoir une bonne netteté, la formation et découpage des composites colorées en fonction de la zone d'étude ont été effectué. Apres le prétraitement, la classification supervisée par algorithmes de maximum de vraisemblance a été initiée. Pour la vérification de vraisemblance entre les classes(le bâti ; la végétation ; eaux et sols nus) issues de la classification supervisée, google Earth a beaucoup servi. Les points de contrôles crées dans Arcgis sur l'image classifiée et transformées via Conversion tools, en fichier KML pour pouvoir les ouvrir dans google earth. La réalité du paysage sur image google Earth de la même date que celle de l'image satellite téléchargée a été vérifiée pour en tirer la véracité utilisateur dite ‘'user accuracy'' et celle du producteur dite ‘'producer accuracy''. Ces dernières interviendront dans la validation des résultats de la classification.

Après avoir les résultats de cette classification, des données sur les rendements agricoles recueillies auprès des institutions chargées de l'agriculture et autres chargées des statistiques, pour les intervalles de temps de notre étude seront aussi analysées. Le schéma ci-dessous résume la méthodologie adoptée.

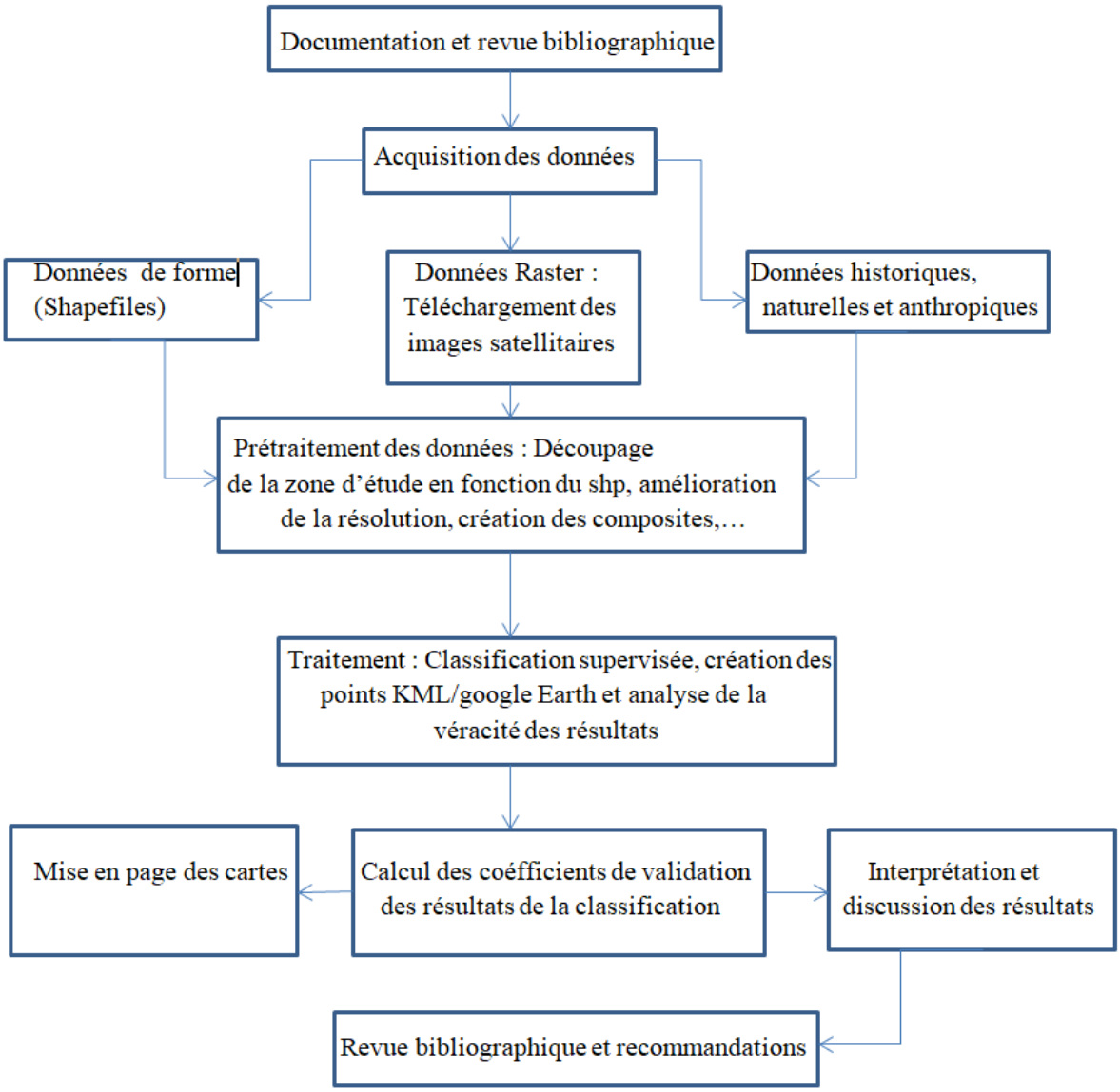


Figure 9: Diagramme Méthodologique

3.3 Données et Matériels utilisés

3.3.1 Données utilisées

3.3.1.1 Données spatiales

Pour suivre des changements spatio-temporels dans la zone d'étude, la télédétection joue un rôle incontournable. Les données de l'espace, images satellitaires constituant la zone d'étude ont comme source, pour la plupart des cas, la télédétection spatiale.

L'image satellitaire constitue l'un des modèles visuels le plus fidèle et le plus complet de l'espace géographique (Rabenilalana, 2011 cité par Ramarosonarivo, 2019). Les images satellitaires constituent une source d'informations fiables et abondantes sur l'occupation du sols et différents phénomènes se déroulant à la surface de la Terre (Caloz and Collet, 2001). C'est dans ce cadre que les images du capteur Landsat fournies par le site USGS[4] ont été utilisés pour cette études des effets de l'occupation anarchique des sols sur la disponibilité des terres agricoles ont été utilisés.

- **Choix de capteurs**

Selon les datées choisies de la recherche, les images téléchargées sont des capteurs Thematic Mapper (TM) , Enhanced Thematic Mapper (ETM) et Opérational Land Image.

Les caractéristiques des images téléchargées sont regroupées dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3 : Caractéristiques des images téléchargées

	Landsat 5	Lansat 5	Lansat 7	Lansat 8	Lansat 8
Nom du fichier	LT05_L1TP_173062_19860719_20200917_02_T1	LT05_L1TP_173062_19940725_20200913_02_T1	LE07_L2SP_173062_20050715_20200914_02_T1_SR	LC08_L1TP_173062_20150820_20200908_02_T1_SR	LC08_L1TP_173062_20150820_20200908_02_T1_SR

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

satellite	Landsat 4-5 TM C1 Level-1	Landsat 4-5 TM C1 Level-1	Landsat 5 ETM C1 Level-1	Landsat 8 ETM C1 Level-1	Landsat 8 ETM C1 Level-1
Date d'acquisition	19/07/1986	25/07/1994	05/06/2002	20/08/2015	20/08/2015
Résolution spatiale	30m	30m	30m	30m	30m
Nbre de bandes	7	7	7	8	8
Couverture Nuageuse	0-2%	0-2%	0-3%	0-1%	0-1%
Système de coordonnées	WGS_1984_UTM_Zone 35N DATUM : WGS 84	WGS_1984_UTM_Zone 35N DATUM : WGS 84	WGS_1984_UTM_Zone 35N DATUM : WGS 84	WGS_1984_UTM_Zone 35N DATUM : WGS 84	WGS_1984_UTM_Zone 35N DATUM : WGS 84
Format	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF

3.3.1.2 Autres données

Les données documentaires tels que les données anthropologiques ; géographiques, hydrométéorologiques et agro météorologiques, les couches de formes dites shapefiles ; fournies respectivement par ISTEEBU, IGEBU, BCG constituent aussi les données importantes de notre travail. Les institutions habiletés respectives ont assurées leur acquisition.

3.3.2 Matériels utilisés

Pour le prétraitement et traitement des données aux différents formats, la machine ordinateur aux logiciels ArcGis 10.8, QGIS 3.22.3, Google Earth pro et Excel ont été utilisés. Arcgis 10.8 et QGIS 3.22.3 ont été utilisés pour le prétraitement des données. Plus loin, Arcgis interviendra dans la classification, la création des points de contrôle et l'élaboration de

différentes cartes. Google Earth pro a servi pour la vérification de la réussite de la classification par des points de contrôle. Excel a été utilisé pour la constitution des tableaux croisés afin d'en faire ressortir des matrices de transitions. Grâce à ces logiciels, des cartes prétraitées de la zone étudiée ont été faites. Ici en bas se trouve un des cartes après combinaison pour une vision naturelle 432.

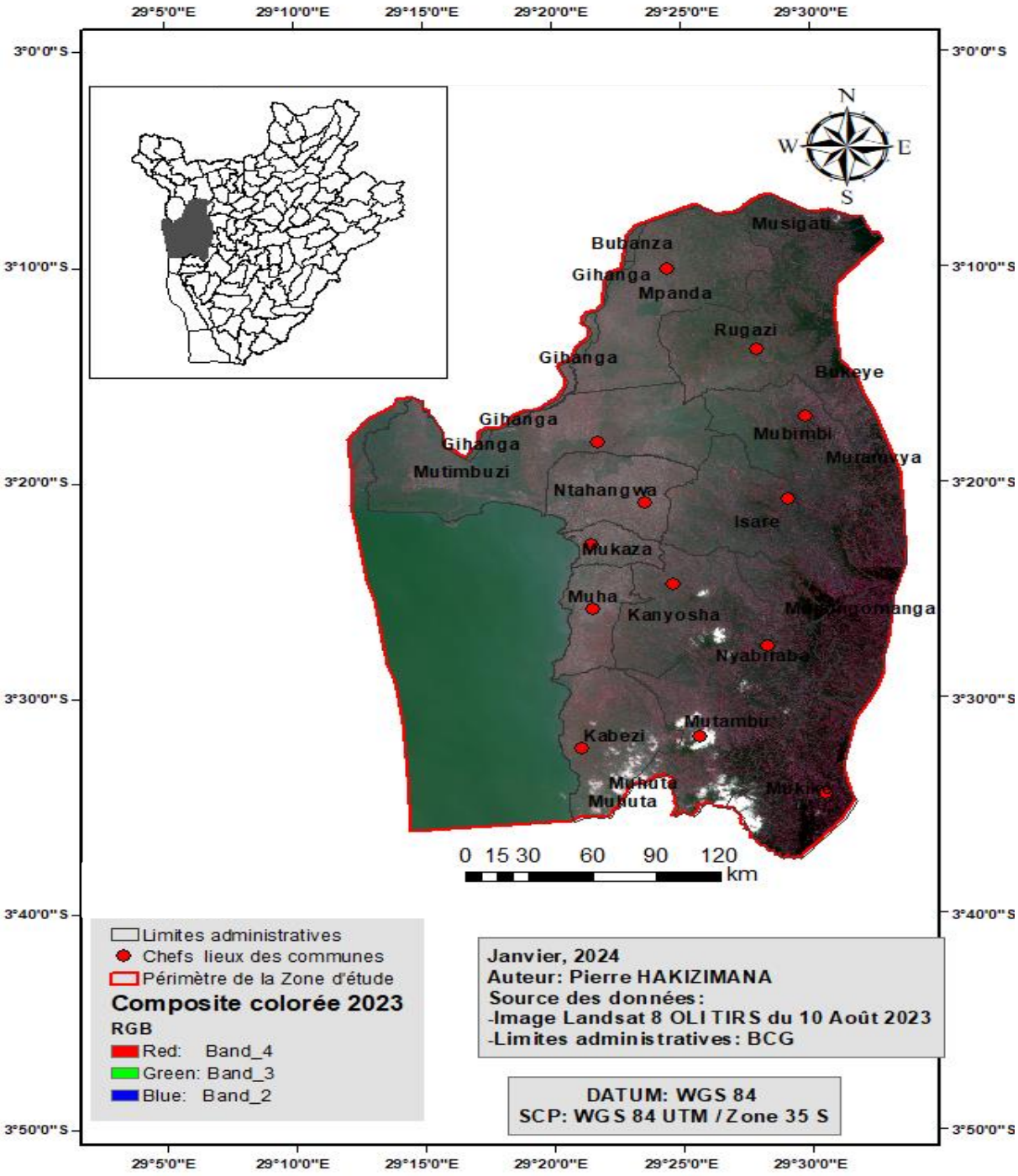


Figure 10: Couleur naturelle de la zone d'étude 2023, combinaison 432

Ici, Avec la combinaison 432, les différentes classes vont se présenter sous des aspects différents de ceux évoqués en haut. La zone du Bâti va apparaitre en bleu très clair, alors que les plans d'eau prendront soit un bleu foncé pour eau profonde ou peu turbide au bleu vert pour eau à faible profondeur ou de forte turbidité. Les espaces végétales seront ciblées grâce à la couleur proche de l'infrarouge. Elle est rouge vif (forêt) et rouge plus terne (mangrove). Quant aux sols nus, ils se feront remarquer par une couleur rouge rosé.

3.4 Traitement des données par classification supervisée et évaluation des résultats

3.4.1Traitement des données par classification supervisée

Après les opérations de prétraitement des images dont la formation de compositions colorées et des zones d'entrainement, la classification supervisée par algorithme « Maximum de vraisemblance, Maximum Likelihood Classification » a été faite. Cette classification a pour objectif ultime de faire la correspondance entre les classes spectrales [5] et les classes d'information[6], de tirer une information quantitative et qualitative des images prétraitées.

Comme la revue bibliographique l'a précédemment signalé, réaliser une classification supervisée d'une image satellitaire sous-entend une bonne connaissance de l'occupation réelle du sol de la zone de l'image à l'époque où elle a été prise (Denis, 2016 cité par Ndikubwayo 2019).

Alors, comme une bonne partie de la zone à étudier est bien connue suite aux visites effectuées et aux contacts effectués avec des personnes anciennes de quelques endroits ciblés, en plus de l'exploration sur Google Earth, pour des images de 2005 à 2023 ; la classification supervisée en classes du bâti, Végétation, Eau et Sols nus a été la méthode utilisée pour mettre en évidence des tendances d'occupation des sols en zone d'étude.

Dans ce travail , cet algorithme « Maximum Likelihood Classification » a servi pour affecter chaque pixel de l'image à la classe avec laquelle il a le plus d'affinités et par après sortir une carte thématiques représentante des classes d'occupation du sol (classes d'information) dont on a collecté des classes spectrales échantillons tests. Pour toutes les périodes considérées dans cette étude, des informations quantitatives et qualitatives constituent les résultats

[5] Groupes de pixels ayant les mêmes caractéristiques (ou presque) en ce qui a trait à leur valeur d'intensité dans les différentes bandes spectrales des données.
[6] Comme différents types de cultures, de forêt, bâti…ou différents types de caractéristiques.

escomptés de ces traitements. Ainsi, des thématiques issues de la classification ont été les premiers résultats de cette étape.

3.4.2 Evaluation et validation de la classification supervisée

Pour évaluer les résultats de la classification et leur fiabilité, parmi les autres méthodes exposées dans la littérature, la matrice de confusion a été le choix préféré. Le nombre de points (accuracy points) aléatoirement créés sur l'image classifié et ouvert sur google earth nous a amené à la constitution des matrices de confusion des années considérées.

Ces matrices ont donné par après des autres paramètres comme la précision globale, indice kappa, la précision utilisateur et la précision producteur. Tous ces paramètres obéissent les degrés d'accord, ce qui a fait que les résultats des classifications faites soient retenus.

3.4.2.1 Etude statistique des résultats de la classification

Après la classification et la validation des résultats, une analyse quantitative et statistique sur les thématiques de différentes périodes considérées est requise. Cette analyse porte sur les variations temporelles et spatiales de différentes classes prédéfinies. Ces changements sont décelés après le calcul des tables attributaires et la formation des matrices de transition entre périodes considérées. Des premières, les superficies sont obtenues de façon quantitative ; et de la matrice de transition sont mis en évidences par des conversions d'une telle quantité de pixels d'une classe donnée vers une ou autres classes.

- Pour les changements quantitatifs, les calculs de la table attributaire de la thématique ressortie de la classification, via l'opération ''calculate geometry'' du logiciel ArcGis 10.8, sont opérés. Une superficie de chaque classe est calculée. C'est à partir de ces valeurs calculées pour toutes les périodes que des variations sur chaque classe seront mises en évidences. De soustractions des chiffres de même classe entre deux périodes consécutives peuvent montrer soit qu'il y a eu régression ou augmentation.
- Concernant les conversions des superficies entre classes, le même logiciel ci haut mentionné fournit la matrice de transition qui, traitée dans excel 2010 par tableau croisé met en exergue de manière condensée, sous forme de matrice carrée, les changements d'état des éléments composant le paysage pendant une période donnée (Bell, 1974 ; Turner, 1994 ; Schlaepfer, 2002 cité par Mikwa, 2010 et par NDIKUBWAYO, 2019). Les cellules de la matrice contiennent la valeur d'une

variable ayant passé d'une classe initiale *i* à une classe finale *j* pendant la période considérée. Cette matrice ne contient aucune information sur la distribution spatiale des changements, ni sur les processus et causes ayant conduit aux changements mais informe sur la proportion d'affectation d'un type i d'utilisation de sol à un état j réalisé pendant la période concernée. Elle ne tient compte que des états des éléments aux temps initial et final (Mikwa Ngamba, 2010 cité par Ndikubwayo, 2019).

L'outil geoprocessing –intersect de arcGis 10.8 a aidé pour former une table attributaire condensée de deux périodes considérées, qui après ''calculateur des champs ou field calculator'', a donné des changements interclasses détectés.

Chapitre 4. PRESENTATION, INTERPRETATION DES RESULTATS ET IMPACTS SUR LES RECOLTES

4.1. Présentation des résultats

Les résultats présentés concernent l'étude de 'impact des occupations anarchiques des sols sur des terres agricoles dans la zone d'étude environnante de la ville de Bujumbura, depuis 1986 jusqu'en 2023. Pour aboutir à ces résultats, le traitement des images Landsat à base des SIG et de la télédétection spatiale a été utilisé.

4.1.1 Cartographie d'occupation du sol après classification des images

Afin de bien percevoir des changements d'occupation du sol ayant eu lieu dans la zone d'intérêt, la classification supervisée des images satellitaires suivant l'algorithme de maximum de vraisemblance a servi. Les thématiques des cartes issues de cette classification montrent la dynamique de l'occupation du sol pour les quatre classes prédéfinies ; le bâti, la végétation, eau et sols nus. Des figures thématiques montrent les résultats de classification des images Landsat respectivement pour les années 1986 ; 1994, 2002, 2015 et 2023.

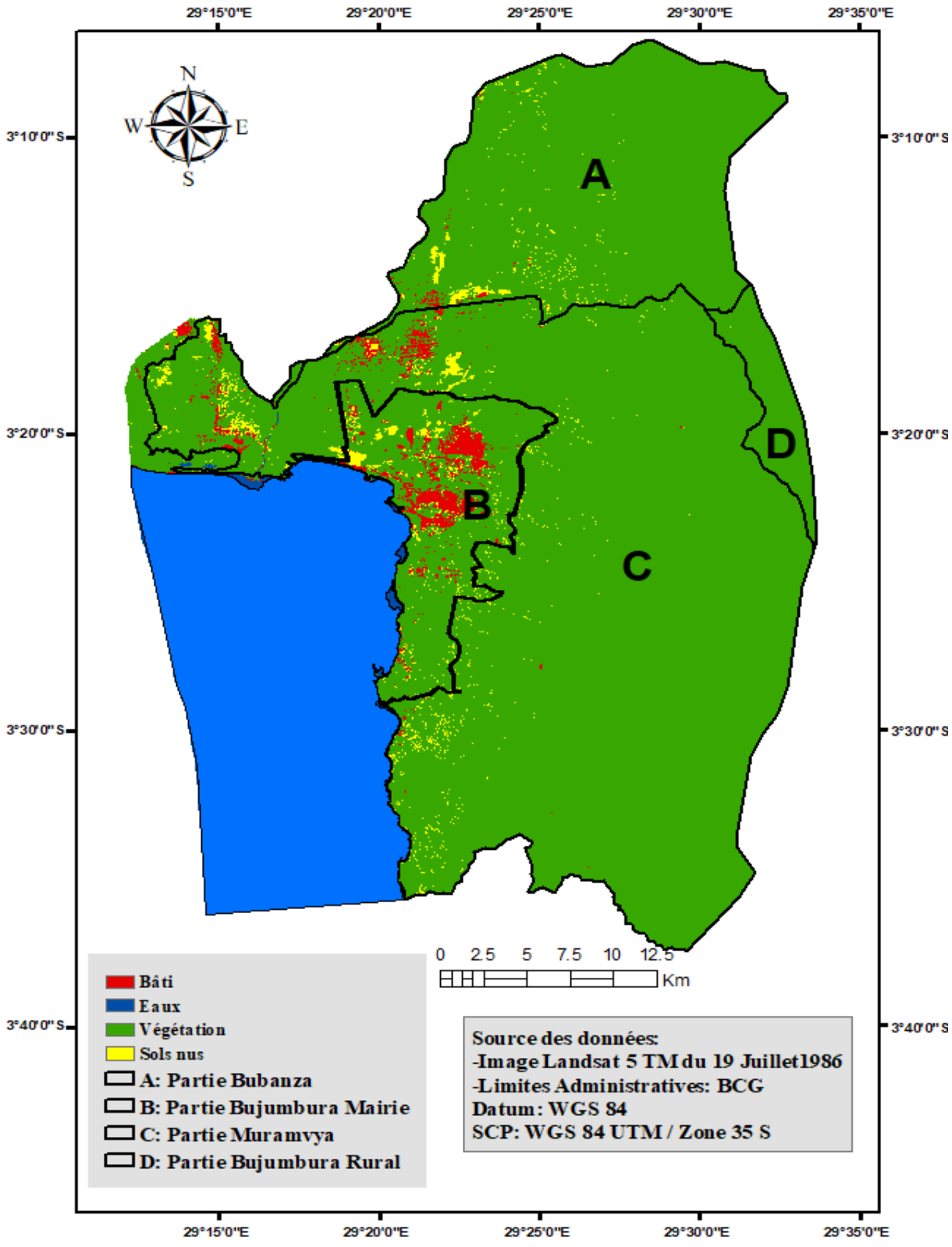


Figure 11: Carte d'occupation du sol 1986 Auteur : HAKIZIMANA Pierre

La thématique de 1986 comme les autres qui vont suivre, illustre par différentes couleur dont le rouge, le vert, le bleu et enfin le jaune clair respectivement les classes du bâti, végétation,

eau et sol nu. La date 1986 est la date de départ de notre étude et par conséquent, montre une vaste étendue de végétation et de petite étendue du bâti. Cela montre que les éléments perturbateurs des zones végétalisées étaient encore moins nombreux dans le temps. On citerait la croissance démographique source des constructions anarchiques suite à la demande accrue en hébergements, les anthropisations qui créent des zones dénudées, etc.

La présentation des résultats issus de la classification supervisée pour différentes années connaitra des thématiques variées du point de vue étendue des quatre classes ci-haut mentionnées.

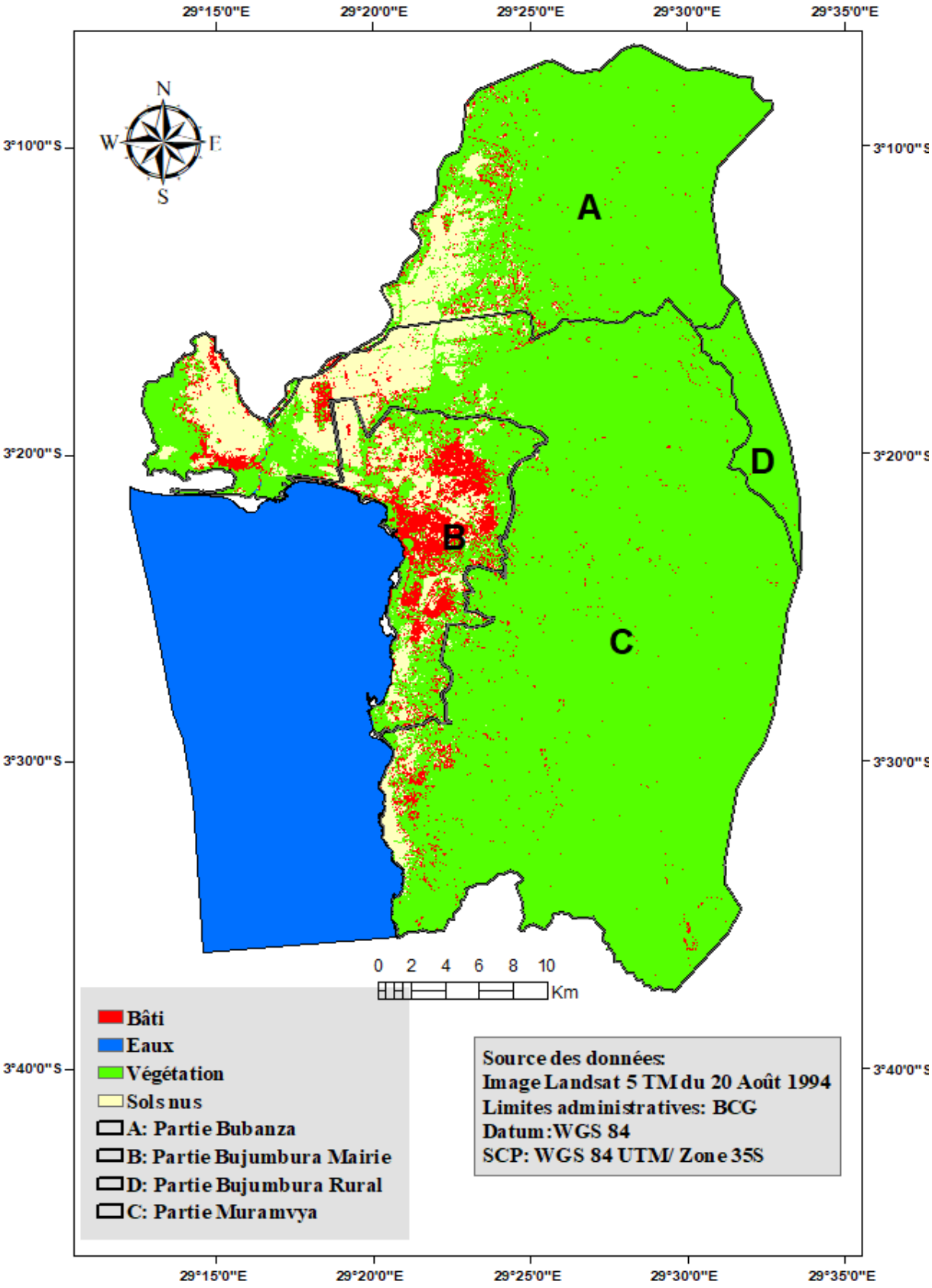


Figure 12: Carte d'Occupation du sol 1994 Auteur : HAKIZIMANA Pierre

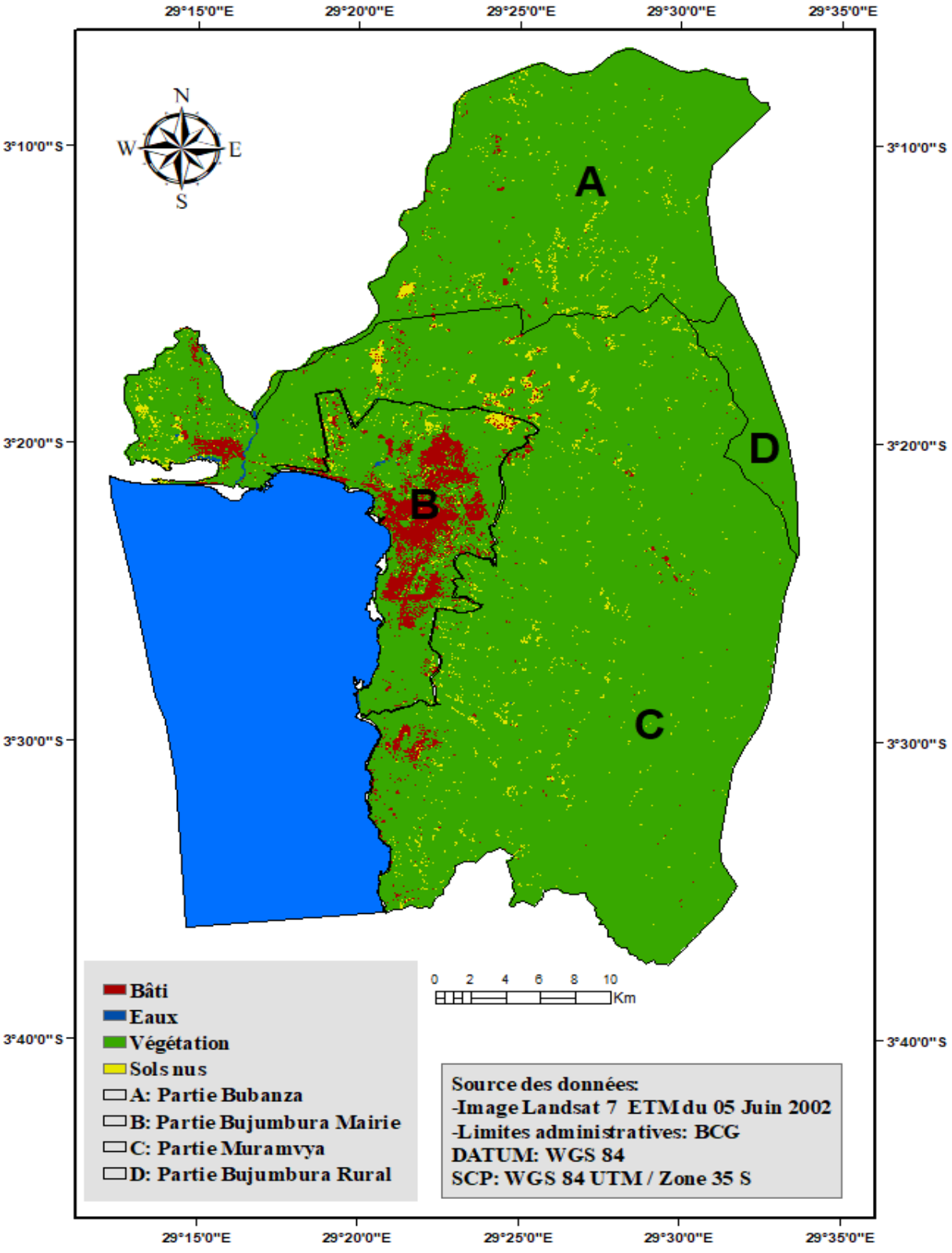


Figure 13: Carte d'occupation du sol 2002 Auteur : HAKIZIMANA Pierre

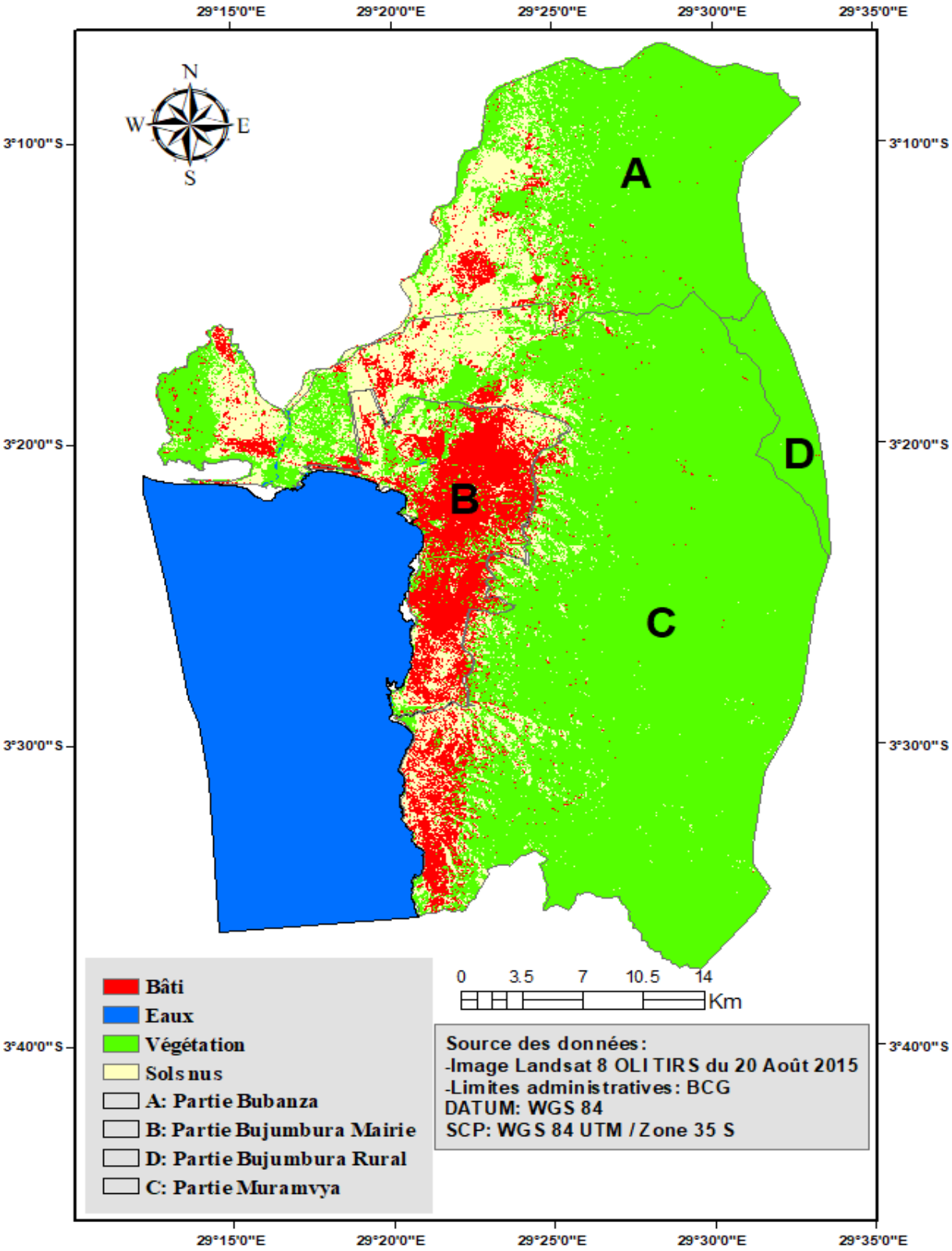


Figure 14: Carte d'Occupation du sol 2015 Auteur : HAKIZIMANA Pierre

Depuis 2002, des changements remarquables du point de vue des classes considérées sont perceptibles. Sur cette carte d'occupation du sol de 2015, se manifeste un élargissement du

bâti et rétrécissement de la zone végétalisée et/ou agricole. Cela peut se confirmer par des comparaisons des images google Earth utilisées pour vérifier la classification effectuée.

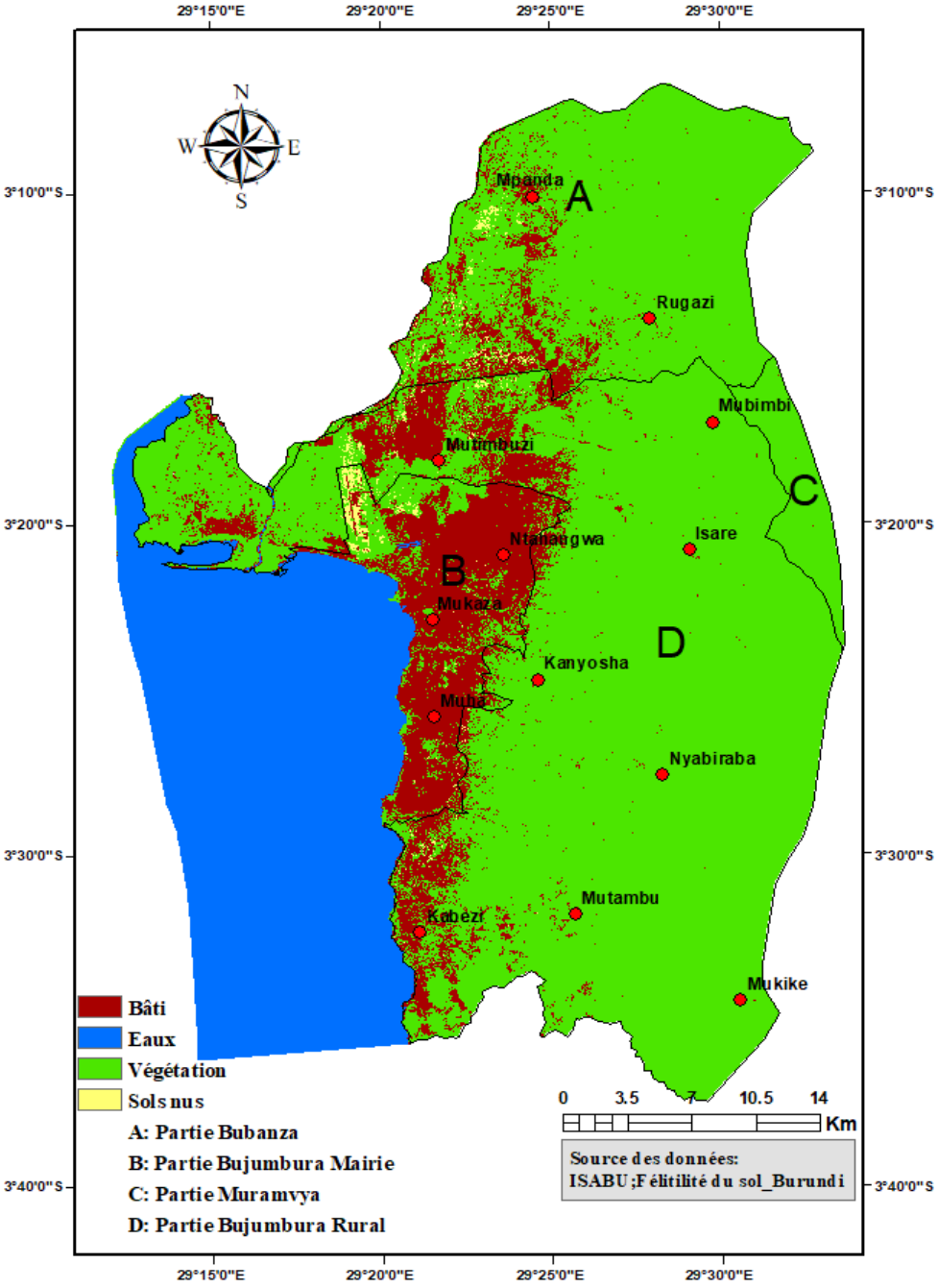


Figure 15: Carte d'Occupation du sol 2023 Auteur : HAKIZIMANA Pierre

Pour cette année 2023, l'extension de la zone construite vers les zones surplombant la ville de Bujumbura est notoire. Dans les pages suivantes, nous avons essayé de mettre en évidence l'état des lieux pour l'horizon de 40ans, donc en 2063.

4.2 Présentation Qualitative et quantitative des changements au niveau des classes

4.2.1 Présentation qualitative des changements spatiaux par classe

De façon globale, les résultats des images classifiées pour les différentes périodes montrent une excellente précision.

- ✓ La matrice de confusion issue des résultats de la classification pour l'image de 1986 donne une précision globale de 94.5% le coefficient kappa de 0,93
- ✓ La précision globale de 95% et le coefficient kappa de 0,93 sont pour l'image de 1994.
- ✓ Pour l'image de 2002, les résultats de la classification ont abouti à la précision globale de 94% et le coefficient kappa de 0.92.
- ✓ La précision globale de 98.3% et le coefficient kappa de 0.98 ont marqué les résultats la classification de l'image de 2015.
- ✓ La matrice de confusion générée par les résultats de la classification pour l'image de 2023 donne une précision globale de 96.2% et un coefficient kappa égal à 95.

Tableau 4 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 1986

		Vérité de terrain								
Classification	**Classes**	Bâti	eaux	végétation	sols nus	Total	Erreur commission	Erreur globale	Précision utilisateur	**Kappa**
	Bâti	81	0	5	14	100	0.19		0.81	
	Eaux	0	100	0	0	100	0		1	
	Végétation	0	0	99	1	100	0.01		0.99	
	Sols nus	0	0	2	98	100	0.02		0.98	
	Total	81	100	106	113	400				
	Erreur d'omission	0	0	0.07	0.13			0.06		
	Précision production	1	1	0.93	0.87				**Précision globale= 94,50**	
	Kappa									**0.93**

Tableau 5 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 1994

		Vérité de terrain								
Classification	**Classes**	Bâti	eaux	végétation	sols nus	Total	Erreur Commission	Erreur globale	Précision utilisateur	**Kappa**
	Bâti	82	1	5	12	100	0.18		0.82	
	Eaux	0	100	0	0	100	0		1	
	Végétation	0	0	98	2	100	0.02		0.98	
	Sols nus	0	0	0	100	100	0		1	
	Total	82	101	103	114	400			0	
	Erreur d'omission	0	0.01	0.05	0.12			0.05		
	Précision producteur	1	0.99	0.95	0.88				**Précision globale = 95**	
	Kappa									**0.93**

Tableau 6 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 2002

		Vérité de terrain								
Classification	**Classes**	Bâti	eaux	végétation	sols nus	Total	Erreur commission	Erreur globale	Précision utilisateur	**Kappa**
	Bâti	91	0	2	7	100	0.09		0.91	
	Eaux	0	100	0	0	100	0		1	
	Végétation	2	0	95	3	100	0.05		0.95	
	Sols nus	2	0	8	90	100	0.1		0.9	
	Total	95	100	105	100	400				
	Erreur d'omission	0.042	0	0.1	0.1			0.06		
	Précision producteur	1	1	0.9	0.86				**Précision globale=94**	
	Kappa									**0.92**

Tableau 7 : Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 2015

		Vérité de terrain								
Classification	**Classes**	Bâti	eaux	végétation	sols nus	Total	Erreur commission	Erreur globale.	Précision utilisateur	**Kappa**
	Bâti	112	0	1	2	115	0.03		0.97	
	Eaux	0	115	0	0	115	0.00		1.00	
	Végétation	0	0	113	2	115	0.02		0.98	
	Sols nus	0	0	3	112	115	0.03		0.97	
	Total	112	115	117	116	461				
	Erreur d'omission	0	0	0.03	0.03			0.02		
	Précision producteur	1	1	0.93	0.87				**Précision globale= 98**	
	Kappa									**0.98**

Tableau 8: Matrice de confusion issue des résultats de l'image de 2023

		Vérité de terrain								
Classification	**Classes**	Bâti	eaux	végétation	sols nus	Total	Erreur commission	Erreur globale	Précision utilisateur	**Kappa**
	Bâti	92	0	6	1	99	0.07		0.93	
	Eaux	0	100	0	0	100	0.00		1.00	
	Végétation	2	0	97	1	100	0.03		0.97	
	Sols nus	0	0	5	95	100	0.05		0.95	
	Total	94	100	108	97	461				
	Erreur d'omission	0.02	0	0.10	0.02	399		0.03		
	Précision producteur	0.98	1.00	0.90	0.98				**Précision globale= 95**	
	Kappa									**0.95**

Ces matrices ont été produites après vérification des points aléatoirement créés dans toutes les classes d'occupation du sol après classification. Leur confrontation à la réalité de terrain sur Google Earth ont abouti voir combien la classification a réussi. . Après l'analyse des résultats de toutes les classifications supervisées effectuées, les changements d'occupation du sol sont remarquables. Dans ce travail, le constat est que seulement trois classes dont le bâti, la végétation et les sols nus sont des thématiques qui ont connu plus de changements par rapport à la classe ''eaux'' si on ne considère pas ses changements qualitatifs (sa turbidité). Les constructions et les sols nus sont en grande partie, selon les classes définies dans cette étude, à l'origine de la menace de la végétation et/ou terres arables.

Pour mettre en évidence l'importance des choix faits sur les dates des images traitées, nous allons analyser cette évolution en trois scénarii de deux périodes distinctes : la première de 1986 à 2002, la seconde de 2002 à 2023 et enfin celle globale de 1986 à 2023

Dans ces cas, plus de détails concernant les différents records atteints des classes définies, soit en augmentant ou en diminuant spatialement au cours des 40 ans considérés dans cette étude. Il y a eu des cas où la végétation a été le plus en proie vis-à-vis respectivement des sols nus (1986-2002) et du bâti (2002-2023). Le tableau suivant montre différentes tendances en matière d'occupation du sol dans cette zone d'intérêt depuis 1986 jusqu'en 2023.

Tableau 9 : Evolution spatiale des classes d'occupation du sol de 1986 à 2002

	Superficie en km^2		Evolution		
Classes	1986	2002	sup en km2	Taux	Tendances
Bâti	25.13	44.36	19.23	76.52	Gagné d'espace
Eaux	346.34	343.52	-2.83	0.82	perdu d'espace
Végétation	1161.26	1133.71	-27.55	2.37	perdu d'espace
Sols nus	20.97	32.06	11.09	52.86	gagné d'espace

Comme ci-haut signalé, le premier cas; période de 1986 à 2002, est une période qui montre l'augmentation des sols nus avec une chute spectaculaire de la végétation. Le bâti a également augmenté mais pas considérablement. Nous verrons loin les mobiles probables de ce scénario.

Tableau 10 : Evolution spatiale des classes d'occupation du sol de 2002 à 2023

	Superficie en km^2		Evolution		
Classes	2002	2023	sup en km^2	Taux	Tendances
Bâti	44.36	195.39	151.03	340.42	Gagné d'espace
Eaux	343.52	346.89	3.37	0.98	Gagné d'espace
Végétation	1133.71	1003.05	-130.65	11.52	perdu d'espace
Sols nus	32.06	7.69	-24.37	76.02	perdu d'espace

Pour le second cas; la période de 2002 à 2023, l'augmentation du bâti est vraiment perceptible avec plus 151 km^2 seulement dans 20ans. La chute remarquable aussi de la

végétation, soit plus 130 km^2 dans la même période. Mais, le bon constat est que les classe « sols nus » s'est vue en régression de de 24.3735 km^2 en faveur des autres classes. Quant aux plans d'eaux, il n'y a pas eu beaucoup de changement durant la période de cette étude. Seulement, on peut constater que la montée en espace construite est suivie par l'élargissement des plans d'aux quoiqu'à des vitesses ralenties. Les mobiles de ses montées en superficie de l'une ou l'autre classe selon les deux tranches de période, ainsi que la diminution en superficie des sols nus vers les années 2023 seront plus loin évoqués.

Tableau 11 : Evolution spatiale globale des classes d'occupation du sol de 1986 à 2023

	Superficie en km^2		Evolution		
Classes	**1986**	**2023**	**sup en km^2**	**Taux**	**Tendances**
Bâti	25.1322	195.39	170.26	677.45	Gagné d'espace
Eaux	346.3496	346.89	0.54	0.16	Gagné d'espace
Végétation	1161.2624	1003.05	-158.21	13.62	perdu d'espace
Sols nus	20.9735	7.69	-13.29	63.35	perdu d'espace

Pour le cas ci-dessus, nous avons considérés ces deux périodes extrêmes (1986-2023) où nous pouvons constater clairement deux faits : là où le bâti a battu le record avec une augmentation en superficie jusqu'à plus de 677% jusqu'en 2023, soit 170.25 Km^2 par rapport à la superficie initiale de 1986. Le second fait est que c'est visible que les sols nus ont connu une diminution jusqu'à plus de 63%, soit plus de 13km^2 depuis 1986.Ce même tableau montre que la végétation a connu une diminution de 13.6% de manière générale équivalente d'une disparition de 158 en kilomètres carrés depuis 1986 à 2023 , une perte si alarmante pour quiconque dont les préoccupations sont la bonne gestion de la végétation en général et des terres agricoles en particulier.

En guise de rappel visuel des thématiques des cartes issues de la classification supervisée effectuée, et pour concrétiser les contenus des tableaux, ces différents cas sont représentés sur des figures suivantes.

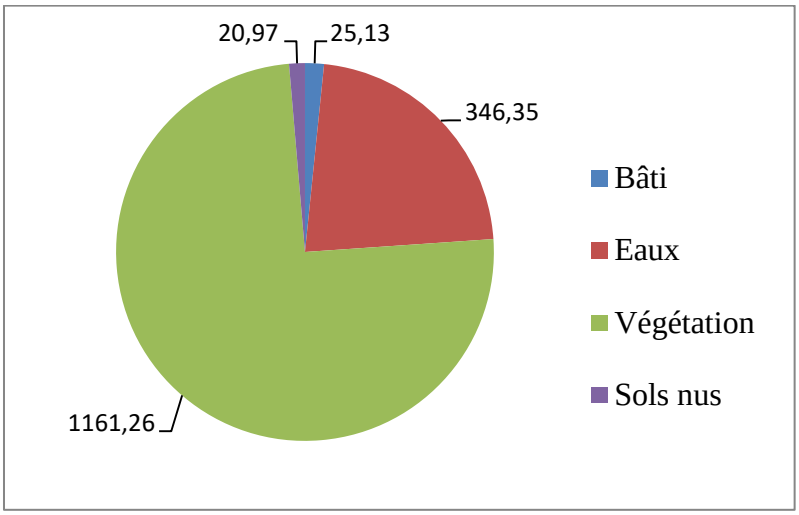


Figure 16: Répartition des superficies des classes en Km^2, 1986

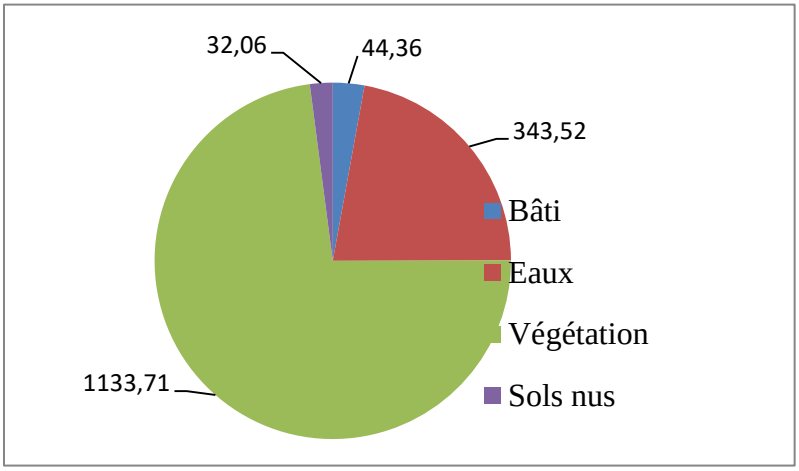


Figure 17: Répartition des superficies des classes en Km^2, 2002

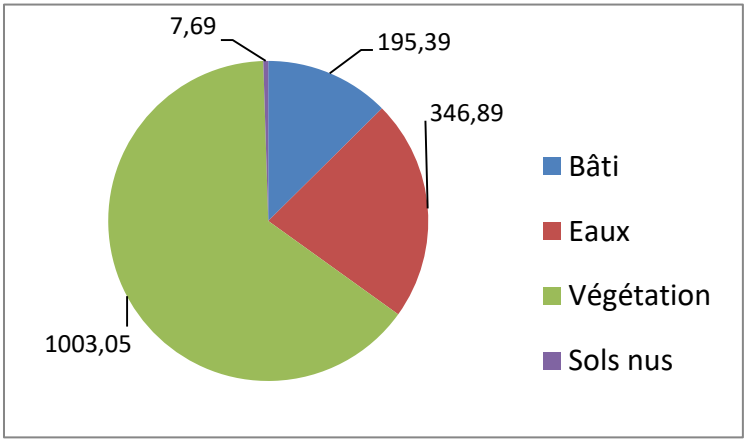


Figure 18: Répartition des superficies en Km^2 des classes, 2023

4.2.2 Présentation quantitative des changements au sein des classes

Les changements au sein des classes concernent une transition entre les pixels des différentes classes. Ces pixels peuvent être quantitativement traduits en superficie qui, au stade initial (1986) et au stade final (2023) ont muté vers une classe telle. Ces changements interclasses sont détectés à travers un tableau qui constitue la matrice de transition. Les valeurs des superficies qui n'ont pas connu de changements sont lues en diagonale.

4.2.3 Dynamique de transition

Cette analyse de transition entre classes d'occupation du sol vers d'autres types de classes portera sur la problématique de la recherche. Elle mettra en évidence les changements en pourcentage et le processus par lequel la colonisation de la végétation/ou des terres agricoles a eu lieu depuis une période telle à une autre. Les 100% correspondent à la superficie totale de la zone d'étude. Pour ce faire, des troncatures de périodes successives seront analysées. La première est depuis 1986 à 1994 ; la seconde sera celle de1994 à 2002, l'autres de 2002 à 2015 et enfin celle de 2015 à 2023. Et cela a été fait pour voir s'il y aurait d'autres mobiles impactant négativement des superficies végétatives et/ou agricoles selon les moments ayant marqué l'histoire du Burundi : nous citerons la guerre civile qui a secoué le pays depuis 1993 jusqu'en 2003 sur la perturbation de la végétation, la croissance démographique. Selon la littérature, la période d'avant l'an 2000 constituerait aussi une période d'ignorance en matière de la protection de l'environnement, ce qui expliquerait l'augmentation des sols nus constatée durant cette période.

Signalons encore que, même si quatre classes ont été considérées lors de la classification supervisée des images satellitaires, trois d'entre elles nous intéresseront le plus : celles du bâti, de la végétation et des sols nus. La classe « eaux » nous intéresse aussi mais a connu peu de changement. Les tableaux suivants, matrices de transition dont les lignes renseignent sur la situation des classes au début d'une période et les colonnes la période finale ; montrent des transitions qui se sont opérées entre les classes (mutations interclasses) durant la période de 1986 à 2023.

Tableau 12 : Matrice de transition entre1986 et 1994

LU/LC classes		1994				
		Bâti	**Eaux**	**Sols nus**	**Végétation**	**Total**
1986	**Bâti**	0.90	0.00	0.60	0.11	1.61%
	Eaux	0.06	22.16	0.00	0.07	22.29%
	Sols nus	0.21	0.00	0.60	0.54	1.35%
	Végétation	3.12	0.02	6.56	65.04	74.74%
	Total	4.29%	22.19%	7.77%	65.75%	100%

Au cours de cette période, la guerre civile a éclaté en 1993, synonyme des feux de brousse. Pour ce, 101.95 km^2 de végétation seraient réduites en sols nus de 1986 à 1994. Tandis que le bâti aurait conquis environ 48.48 km^2 de cette végétation.

Tableau 13: Matrice de transition entre 1994 et 2002

LU/LC classes		2002				
		Bâti	**Eaux**	**Sols nus**	**Végétation**	**Total**
1994	**Bâti**	1.66	0.04	0.07	2.53	4.29%
	Eaux	0.00	22.00	0.01	0.18	22.19%
	Sols nus	0.65	0.01	0.32	6.80	7.77%
	Végétation	0.55	0.07	1.67	63.47	65.75%
	Total	2.86%	22.19%	2.06%	72.97%	100%

Durant la période de 1994 à 2002, période proprement dite de la guerre où des feux de brousse continueraient à ravage les zones végétatives n'eut été un bon événement, l'adoption du code de l'Environnement de l'an 2000. Comme on peut le constater dans la matrice de confusion ci-haut, la conversion de la végétation en zone bâtie et sols dénudés a été ralentie. Seuls environ 8.52 km^2 de la végétation conquis par le bâti avec 25.93 km^2 de végétation qui seraient réduites en sols nus. Signalons aussi que c'était difficile pour la population en instabilité due à la guerre de continuer à construire, mais plutôt des démolitions seraient probables vu que la superficie de la classe « bâti » aurait chuté par rapport à celle trouvée pour le traitement de l'image de 1994.

Tableau 14: Matrice de transition entre 2002 et 2015

LU/LC Classes		2015				
		Bâti	**Eaux**	**Sols nus**	**Végétation**	**Total**
2002	**Bâti**	2.10	0.00	0.11	0.64	2.85%
	Eaux	0.03	21.92	0.00	0.16	22.11%
	Sols nus	0.21	0.01	0.00	1.74	2.06%
	Végétation	4.65	0.13	2.06	66.13	72.97%
	Total	6.99%	22.06%	2.28%	68.68%	100%

La situation de 2002 à 2015 a été caractérisée par la montée en flèche de la superficie bâtie vu qu'elle a coïncidé avec le début de la paix, élément essentiel en matière de développement. Le bâti aurait conquis plus d'espace de la part de la végétation soit plus de 72 km^2 jusqu'en 2015 et 32.07 km^2 de végétation seraient réduites en sols nus. L'autre constat est que les plans d'eaux ont aussi gagné d'espace durant cette période.

Tableau 15: Matrice de transition entre 2015 et 2023

LU/LC Classes		2023				
		Bâti	**eaux**	**sols nus**	**végétation**	**Total**
2015	**Bâti**	5.80	5.34	0.02	1.11	12.27%
	Eaux	0.06	21.97	0.00	0.02	22.05%
	Sols nus	1.01	0.00	0.19	1.08	2.28%
	Végétation	5.71	0.30	0.29	62.34	68.64%
		12.59%	22.33%	0.50%	64.58%	100%

Un cas presque similaire de celui de 2002 vers 2015 se fait voir pour la matrice de 2015 – 2023. Cette période, montre encore plus l'augmentation de façon sensible des consommations de la végétation par le bâti : plus de 88 km^2 de végétation seraient mutés en bâti. Le degré de reconversion des sols végétatifs et/ou agricoles en sol bâti a fait un mouvement antagoniste avec la situation dans la classe « sols nus » ; sa superficie a très diminué au profit respectivement de la végétation et du bâti. Cela serait le fruit de l'insistance en matière de la protection de l'environnement par des lois soumettant quelques projets en infrastructures aux études d'impacts environnementales et Sociales (Décret No 100/22 du 07/10/201). L'autre constat est que les plans d'eaux ont aussi gagné d'espace, 4.63 km^2 durant cette période, ce

qui serait dû à des inondations observées depuis 2014 (GIZ/ACCES, 2014 cité par Ndikubwayo, 2019).

Après analyse de ces tableaux, on peut dire qu'il y a vraiment un effort remarquable de protection de l'environnement sur la limitation des causes de l'augmentation sols nus. Mais, en analysant bien les résultats des images classifiées, on remarque que les efforts fournie pour sauvegarder le couvert végétal est directement consommé par le bâti.

Globalement, les changements opérés depuis 1986 jusqu'en 2023 dans la mutation interclasses d'occupation du sol sont récapitulés dans le tableau qui suit. Ce dernier montre aussi des changements qui ont eu lieu de 1986 à 2023 en kilomètres carrés.

Tableau 16: Matrice de transition généralisée de 1986 à 2023

LU/LC Classes		**2023**				
		Bâti	**Eaux**	**Sols nus**	**Végétation**	**Total Pourcentage**
1986	**Bâti**	**1.28**	**0.03**	0.01	0.29	1.62%
	Eaux	**0.14**	**22.02**	0.00	0.14	22.29%
	Sols nus	0.66	0.01	**0.05**	0.63	1.35%
	Végétation	10.50	0.28	0.43	**63.53**	74.74%
Total en Pourcentage		**12.58%**	**22.34%**	**0.50%**	**64.56%**	100%
Changement en Km^2		**175.48**	**4.94**	**6.90**	**16.43**	
Différence en Km^2		**-170.25**	**-0.68**	**13.29**	**157.65**	

Entre 1986 et 2002; les sols nus ont battu le record (Tableau 9). Cela peut s'expliquer du fait que, depuis 1993, le pays est entré en guerre civil qui a été caractérisé par de plusieurs cas de feux de brousse dans différents coins de la zone d'étude; aussi par des perturbations des activités agro forestières (reboisement). Néanmoins, durant cette période, la consommation des terres agricoles par le bâti s'est vue ralentie. La montée en superficie bâtie s'est reprise normalement vers 2004 avec la probable annonce de l'accord global de cesser le feu (Dar-es-Salam, Nov.2003)

Entre 2002 et 2023; le bâti a fortement augmenté (Tableau 4.10). Cela peut s'expliquer du fait que la paix commençait à se faire ressentir. Des chantiers de constructions ont eu le jour en même temps le retour des réfugiés, l'exode rural ont eu des répercussions sur des demandes en hébergement. Les bénéficiaires des parcelles dans en zones viabilisées ou pas ont beaucoup

construit jusqu'à ce que des zones agricoles et non viabilisées. Parmi les localités de notre zone d'études ayant senti cet avènement, les cas de Carama, Gasenyi, Winterekwa, Kanyosha et autres serviront d'exemples (Voir les cartes d'occupation du sol d'avant 2002 celles 2015 et 2023).

4.3 Impacts sur des récoltes de grands types de cultures des provinces abritant la zone d'étude

Pour analyser l'impact sur les récoltes de l'occupation anarchique des sols sur la disponibilité des terres agricoles, une revue des récoltes dans les localités qui constituent notre zone d'étude a été faite. Cette analyse se base sur des rapports des productions agricoles de trois cas dont les données nous ont été accessibles (Annuaire des statistiques agricoles du Burundi 2005 et 2016-2017). Le traitement des données sur les différents types de cultures vivrières très cultivées (les céréales, les légumineuses, les racines et tubercules ainsi que les bananes) des années 1996, 2002 et 2015 ont montré que les productions ont généralement diminué. Même si les causes en peuvent être multiples, l'orientation de quelques exploitations jadis agricoles vers des parcellisations à constructions n'est pas à exclure. Les tableaux suivants montrent ces évolutions régressives des productions agricoles sur des années considérées. Signalons que la Mairie de Bujumbura n'a pas été considérée dans cette analyse des récoltes.

Tableau 17: Evolution des récoltes totales en tonnes des provinces Bubanza, Bujumbura Rural et Muramvya.

	Céréales	Légumineuses	Racines et tubercules	Bananes	Total/Année	Evolution
Récolte 1996	68492	39024	56553	285238	449307	**0**
Récolte 2002	64660	20422	232907	265922	583911	**134604**
Récolte 2015	18847	31282	178383	62053	290565	**-293346**

Le tableau ci-dessus prend en compte la généralité de l'impact à des niveaux provinciaux. Mais, comme plus des effets dus à l'accroissement des agglomérations se propagent du centre-ville vers les zones les plus proches de cette dernière, l'analyse de l'impact sur récoltes

avec particularité est jugée indispensable sur la province de Bujumbura Rural. Des résultats montrent que la diminution des récoltes a été plus grande par rapport à celle constatée de façon générale. Le tableau suivant met en évidences cette diminution dans la province la plus représentée dans cette zone et la plus proche de la ville de Bujumbura.

Tableau 18:Evolution des récoltes de la Province Bujumbura Rural proche de la Mairie

	Céréales	Légumineuses	Racines et tubercules	Bananes	Total/Année	Evolution
Récolte Bujumbura 1996	12109	5667	74495	135571	227842	**0**
Récolte Bujumbura 2002	15256	1522	65406	123968	206152	**-21690**
Récolte Bujumbura 2015	6403	7570	54121	29437	97531	**-108621**

Dans cette province de Bujumbura Rural environnante de la Mairie de Bujumbura se voit une diminution sensible des récoltes selon les données analysées, de 1996 ; 2002 et 2015. De 1996 à 2002, la diminution enregistrée est de 21,690 tonnes de la production totale sur tous les types de cultures tandis qu'une diminution de 108,621 tonnes se fait remarquer sur 13ans, soit de 2002 à 2015. Cette diminution aurait des relations avec l'augmentation des sols bâtis en défaveur des sols végétales en plus des aléas climatiques et autres paramètres éventuels. Les tableaux a,b et c ci-dessous montrent la probable relation.

Tableau 19: (a,b): Relation entre les pertes en terre végétales et les récoltes

	Superficie en km^2		Evolution spatiale	
Classes	1986	2002	Diff.en km^2 1986-2002	Diff. en km^2 1996-2002
Bâti	25,13	44,36	19,23	**12,01**
Végétation	1161,26	1133,71	-27,55	**-13,77**

a)

	Superficie en km^2		Evolution spatiale	
Classes	2002	2015	Diff.en km^2 2002-2015	Diff. en km^2 2002-2015
Bâti	44,36	108,47	64,11	**64,11**
végétation	1133,71	1037,10	-96,60	**-96,60**

b)

Le tableau (**a)** montre les pertes en végétation estimées à (-) 13,77 km^2 et l'avancée de la superficie bâtie de (+) 12,01 km^2 depuis 1996 à 2002. Rappelons que cette période a connu une diminution de récolte globale de 21.690 tonnes.

Le tableau (**b)** montre les pertes en végétation estimées à (-) 96,6047km2 et l'avancée de la superficie bâtie de (+) 64,11km2 depuis 2002 à 2015, avec une diminution de récolte globale de 108,621 tonnes. Ces tendances spatiales respectives sont presque similaires et montrent que le bâti est une classe d'occupation du sol dans cette zone d'étude qui consomme en premier les terres cultivables car, leurs valeurs absolues de perte de la végétation et celle de gain d'espace bâtie pour une même période ne sont pas très écartées.

A ces chiffres qui montrent la tendance de conversion des terres végétales en zones bâties, nous y avons associé des diminutions des récoltes enregistrées depuis 1996 à 2015 ; celles de 1996 à 2002 et celles de 2002 à 2015. Cette comparaison a pour objectif de voir si l'allure de conversion des terres végétales et/ou agricoles en bâtie suivrait en même temps celle de gain d'espace bâtie et si elles ont une influence sur les diminutions de récoltes. C'est le tableau (c) ci-dessous.

Tableau 20: Rapports de proportionnalité entre tendances spatiales et tendances récoltes

Année	Tendances spatiale Bâti	Tendances spatiale Végétation	Tendances Récoltes(T)
1996-2002(m)	12,02	-13 ,78	21690
2002-2015(n)	64,11	-96,60	108621
Rapport (n/m)	***5,33***	***7,01***	***5,00***

c) Le rapport n/m est le rapport des tendances entre 1996-2002 et 2002-2015. Les résultats des tendances spatiales ont comme moyenne **6,17,** qui n'est pas trop loin de **5,00,** le rapport des

tendances récoltes. Donc, on peut admettre que l'augmentation des superficies bâtie au sol a une influence significative sur la disponibilité des terres agricoles et par transitivité à des effets négatifs sur les récoltes.

Chapitre 5. DISCUSSION DES RESULTATS ET LIMITES DE LA RECHERCHE

5.1 Discussion des résultats

Ce chapitre porte sur les résultats issus de différents traitements effectués à base des SIG et techniques de télédétection sur des images Landsat pour analyser des effet de l'occupation anarchique des sols sur la disponibilité des terres agricoles dans la zone d'intérêt située majoritairement dans la plaine de l'Imbo. Les images Landsat, bien que peu adaptées pour des études des paysages urbanisés où la surface d'un pixel unique peu couvrir différentes occupations du sol (Kabanyegeye et al. 2019), avec différents traitements, nous avons pu parier à ces défis. La classification supervisée, de ces images nous a amenés aux différentes thématiques mettant en évidence la dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol de 1986, 1994, 2002, 2015 et 2023 et à pouvoir déceler ses effets sur la disponibilité des terres agricoles. Pour arriver à confirmer ou infirmer les résultats et leurs effets, une vérification selon une des méthodes de la littérature a été utilisée. Dans cette partie, la discussion comparative sur l'étude de l'évolution de l'occupation du sol a été faite.

5.1.1 Vérification de la classification

Les résultats de la classification nécessitent une certaine vérification de leur fiabilité. Pour évaluer cette dernière, la matrice de confusion a été la méthode utilisée. Différents auteurs ont fait l'évaluation de la fiabilité de la classification à l'aide d'une matrice de confusion (Godard, 2005 cité par Mikwa, 2010). Des travaux similaires montrent que plusieurs auteurs ont utilisé la matrice de confusion pour la vérification de cette fiabilité: Gao& Skillcom 1998 ; Zhan et al. (2002) ; Desclée, (2006) ; Vancutsen, (2008).

La même approche a été récemment utilisée par NDIKUBWAYO

C'est alors après cette vérification que les résultats de l'étude montrent en général que les terres végétales et/ou agricoles ont subi une évolution spatiale régressive au profit de l'urbanisation parfois même spontanée.

5.1.2 Evolution de l'occupation du sol dans la zone d'étude de 1986 à 2023

La classification supervisée des images satellitaires des périodes considérées nous ont conduits aux résultats qui montrent l'avancée significative de la zone bâtie sur les terres végétales. Depuis 1986 jusqu'en 2023, sur la superficie la superficie totale de près 1553km^2,

la zone bâtie serait passée de 25km^2 en 1986 à plus de 195km^2 en 2023 soit une augmentation de 677,45%. Sur les cartes résultantes de la classification faite, ces changements sont beaucoup perceptibles dans les localités proches de la ville de Bujumbura, où la couleur rouge marquant la classe ''bâtie'' a progressé du centre-ville vers les périphéries. La superficie végétalisée selon les mêmes résultats, serait passée de plus de 1161km^2 à moins de 1003 km^2 soit une perte de -13,5% de la végétation. Cette extension du bâti qui n'épargne pas les terres jadis agricoles serait principalement dû à l'augmentation de la population en général et des politiques de planification urbaine peut être mal acquise par les exploitants ou non décentralisée dans l'administration locale. Alors, des constructions anarchiques qui s'en suivent seraient principalement à l'origine de ces effets sur la disponibilité des terres agricoles dans la zone d'étude. Signalons que, selon la même recherche, le constat est que la superficie des sols nus est en diminution depuis 2015 si on considère toute la zone d'étude. L'introduction des mesures de protection de l'environnement (Code de l'Environnement, 2000) et certaines lois (Loi No 1/09 du 25 Mai 2021 portant modification de certaines dispositions de la loi No 1/33 du 28 Novembre 2014 portant Organisation de l'administration communale section2 ; Ministère de l'environnement, l'Agriculture et de l'élevage. Document d'orientation stratégique d'aménagement des bassins versants et de lutte antiérosive, 2022) ; l'introduction des mesures d'application du code de l'Environnement en rapport avec la procédure d'Etude d'Impact Environnemental (Décret N^o 100/22 du 7 Octobre 2010). Ce décret précise également des ouvrages qui sont soumis obligatoirement à l'étude d'impact environnementale dans son annexe I & II. Alors, depuis l'année 2015 nous avons constaté des changements selon les résultats de cette étude, spécialement sur la diminution des sols nus par des mesures d'atténuation et autres proposées souvent par l'Etude d'Impact Environnementale et Sociale sur une étendue qui a subi une transformation du paysage.

Les résultats de cette étude renforcent en une partie ceux de certains travaux similaires récemment réalisés. Premièrement, Ndikubwayo (2019) dans son étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et péri-urbain de la partie Nord de la ville de Bujumbura, une partie incluse dans notre zone d'étude ; par télédétection et SIG a abouti aux résultats montrant la diminution des espaces végétalisées de -13.4% pour des espaces faiblement couverts et de -43,4% pour des zone densément couverts. Par classification supervisée, Son travail a montré l'extension de la ville de Bujumbura principalement dans la plaine avec une superficie ayant passé de 645ha à 1413ha (soit +119,1%).

Les résultats de notre travail ne sont pas loin des autres de la littérature même si des traits des zones étudiées soient différents en quelques sortes. Tous les traitements et évaluations faits montrent une pression sur la végétation en général causée par des actions anthropiques de la ville de Bujumbura vers milieux environnants ; avec influence directe sur la réduction des terres cultivable. Cette dernière a conduit à la diminution des récoltes en général selon les résultats des données ci-haut traités (Tableau 17) et par conséquent une insécurité alimentaire.

Le même constat a été soulevé par Kabanyegeye et al. (2019) dans l'étude sur la Dynamique spatiale de l'occupation du sol de la ville de Bujumbura, portion de notre zone d'étude. Par classification supervisée des images satellitaires, les résultats de leur travail ont montré une réduction des terres agricoles due à l'urbanisation de la ville de Bujumbura ayant comme conséquence la disparition de l'agriculture urbaine et a affirmé que la situation avait contribué à l'insécurité alimentaire à Bujumbura. Alors, de ce qui précède, nos résultats qui montrent la relation entre la régression des terres agricoles et la diminution des récoltes (Tableau 20) viennent renforcer de façon chiffrée ceux de Kabanyegeye et al. (2019) sur les effets de l'occupation anarchique des sols sur la disponibilité des terres agricole ainsi que les conséquences probables sur la sécurité alimentaire des occupants de la zone d'étude en particulier et en général de la population Burundaise vu que cette zone abrite une grande partie de la population et en plus de la capitale économique.

5.2. Les limites de ce travail

Notre travail n'a pas tout à fait touché son point culminant, et par conséquent ne manque pas de limites. La première limite concerne l'acquisition des données : Les données les plus fiables sont difficilement trouvables pour notre pays. Les images satellitaires à très haute résolution (Images HR) ne sont pas disponibles sur des plates-formes/sites reconnus pour certains pays y compris le nôtre. C'est le même scénario pour les couches de formes (shapefiles). Leur mise à jour ne suit pas directement les redécoupages administratifs et leur nomination. Pour visiter un quartier, sa reconnaissance sur la carte est indispensable pour bien s'orienter. Mais, il y a des quartiers non nommés sur les couches de formes et surtout en milieu urbain. Signalons aussi que le temps n'était pas suffisant pour pouvoir aller encore plus loin afin d'analyser les détails que nous aimerions faire. Ce manque de temps suffisant associé au manque de moyens financiers suffisant ne nous ont pas permis de mener par exemple des enquêtes auprès des institutions de planification urbaine pour avoir des informations claires sur les règlements d'occupation du sol et leurs mise en application. Les

enquêtes suffisantes auprès de l'administration locale dans notre zone d'étude sur la décentralisation des règlements d'occupation des sols et son intervention étaient aussi souhaitables. Mais faute de temps et moyens suffisants, cela n'a pas été fait.

Chapitre 6. CONCLUSION ET RECOMMANDATION

6.1. Conclusion

Ce travail a pour objectif global la mise en évidence des mutations spatiotemporelles des sols végétalisées et/ou agricoles vers des zones construites et imperméabilisées dans la zone d'étude située entre la ligne de partage des eaux de la crête Congo-Nil et le lac Tanganyika, et entre la rivière Mpanda au Nord et l'entièreté de la commune Kabezi au sud. La vérification des impacts de ces mutations spatiotemporelles sur des récoltes enregistrées pour des années considérées pour cette recherche constitue aussi l'objectif global de travail. Pour arriver aux résultats, le traitement des images satellitaires, images Landsat de 1986, 1994, 2002, 2015 et 2023 a été fait. Sur quatre classes d'occupation du sol pris en considération, les résultats ont montré une augmentation en flèche de la superficie bâtie avec 170,25 km^2 de plus en 2023 par rapport à celle de 1986 et suit l'augmentation de la population. La diminution de 158.20 km^2 des sols végétalisés et/ou agricoles sur une même période a été enregistrée, et est la conséquence directe de la montée du bâtie suite aux occupations anarchiques des sols, une demande croissante en hébergement dans cette localité qui abrite une ville stratégique dite capitale économique. Pour les plans d'eaux, vu que les images traitées étaient des saisons sèches, une augmentation de moins d'environ 1 km^2 qui serait due aux inondations a été aussi détectée. Les sols nus avaient connu aussi une augmentation de 11,08 km^2 de plus en 2002 qui diminuera plus tard de de 24,37 km^2 de 2002 à 2023 suite aux probables prises de consciences sur des mesures environnementales comme introduction des Etudes d'Impacts Environnementales et sociales sur quelques sites de projets de constructions.

Plus loin, nous avons vu que la tendance de diminution des sols végétalisées et/ou agricoles pourrait avoir eu des répercussions sur des récoltes. Les données que nous avons pu avoir sur les récoltes datent de 1996 à 2015. Alors, entre 1996 et 2002, une diminution de 13,77 km^2 s'est suivie d'une chute de production globale de 21690 tonnes de récoltes et, de 2002 à 2015, la diminution de 96,61 km^2 aurait entrainé une chute de 108621 tonnes des productions globales. Même si l'état des récoltes est une résultante de plusieurs facteurs, la disponibilité des sols arables n'est pas aussi à exclure. Les actions anthropiques dans cette zone montrent une perte progressive en matière de la couverture végétale en général, et influencent sur la disponibilité des terres agricole en particulier. Cette tendance se verra extrêmement alarmant d'ici 2063 dont les projections prévoient une perte cumulée de 571,526 km^2 de superficie jadis végétative si la dynamique d'occupation du sol ne change pas. Ici , on n'ajoute pas des

autres causes de perte des terres agricoles comme des érosions vu la topographie de la zone d'étude dont les pertes par an sont estimées à plus de 100t/ha/an sur le Mumirwa (MEAE ,2018 p12). Seulement, on peut s'attendre à ce qu'il y aurait une diminution de consommation de terres par anthropisation une fois les démarches entreprises par LE Gouvernement du Burundi à travers le Ministère des Infrastructures, Equipements et Logements Sociaux de construire en hauteurs selon la superficie des parcelles disponibles ; par le Gouvernement sur la décentralisation des grandes institutions vers la capital politique Gitega et en plus des recommandations proposées dans ce travails soient toujours d'actualité.

6.2. Recommandations

Après avoir analysé les résultats de différents travaux y compris le présent, des recommandations suivantes ont été formulées pour atténuer l'impact futur dus aux occupations anarchiques des sols de façon, cause majeur de la rareté des terres agricoles dans les zones à vocation urbaine en général et dans les lieux environnant la ville de Bujumbura qui fait objet de cette recherche en particulier :

- Mettre sur pied un schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme national valide et actualisé en même temps que les plans Locaux d'Aménagement,
- Suivre les bâtiments lors de la nouvelle politique par des photographie aériennes après une période fixe pour faciliter la future évaluation dans les zones en proie à des agglomérations spontanées;
- Revoir l'article 4 du code de l'Urbanisme, de l'habitat et de la construction pour impliquer aussi l'administration locale dans les structures consultatives et/ou créer un comité collinaire chargée de suivre de près si toute nouvelle construction est autorisée ;
- Préparer des modules d'enseignements dès l'Ecole post-fondamentale sur le développement durable, fondé sur la protection et la gestion de la ressource « terre » ainsi que des formations sur la réglementation y relative au sein de l'administration locale et/ou comité collinaire ;
- viabiliser éventuellement des zones à vocation urbaine pour éviter des quartiers spontanés ;
- prévoir des zones tampons pour des fins agricoles autour des villes selon leurs fertilités et adaptabilité agricole en collaboration avec le Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage;

- S'efforcer pour mettre en places des textes qui réglementent le métier et la profession en rapport avec le Génie Civil, de l'Architecture, bref l'Ordre des Ingénieurs et des Architectes ;
- Veiller à la mise en application de l'article 84[7] et 100[8] du code de l'Urbanisme de 2016,
- Mettre sur pied un urbanisme[9] claire en matière de l'occupation du sol dans les centres à vocation urbaine y compris la limitation par individu de la superficie bâtie au sol ;
- Fixer cette superficie pour chaque projet de construction laquelle, une fois dépassée, directement il faut construire en hauteur. Permettre aux personnes dont les moyens financiers ne leur permettant pas de construire eux-mêmes en étage de valoriser des espaces en haut selon une réglementation qui serait établie par une institution habileté; dans laquelle par exemple, celui qui pouvait mettre en valeur cette parcelle donnerait un des appartements au propriétaire de la parcelle.
- Décourager toute forme de corruption éventuelle et cela sur toutes les échelons à responsabilité en aménagement du territoire et la gestion des terres cibles.

[7] Nul ne peut entreprendre le lotissement d'un terrain sans autorisation préalable des services habiletés.
Le permis de lotir est délivré après consultation des représentants des services chargés des périmètres agricoles et d'expérimentation scientifique.

[8] Toute construction d'un bâtiment est soumise au permis de construire.

[9] Ensemble des mesures législatives, règlementaires, administratives, techniques, économiques, sociales et culturelles visant à concevoir, à organiser et à réaliser le développement harmonieux et cohérent des établissements humains, en favorisant l'utilisation rationnelle des sols, leur mise en valeur et l'amélioration du cadre de vie ainsi que le développement économique et social dans les centres urbains.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. « Les images satellitaires constituent une source d'information abondantes et précise sur l'occupation du sol…. » Régis Caloz& Claude Collet (2001)
2. Bayumbasire C.C. (2020) : Analyse de la dynamique du paysage urbain et periurbaine et des mutations dans l'occupation du sol : cas de la ville de Bukavu
3. Bell E. J., 1974.Markov analysis of land use change: an application of stochastic processes to remotely sensed data. Socio-economic Planning Sciences, 8: 311-316
4. Boserup, E. (2014). The conditions of agricultural growth: The economics of agrarian change under population pressure. Routledge.
5. Boudarbat, B., & Grenier, G. (2014). L'impact de l'immigration sur la dynamique économique du Québec. Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations.
6. Desjardins,R.&Cavayasm F.51991-. Possibilité et limites des images satellites TM LANDSAT en matières d'occupation du sol : le cas de Montréal(Québéc).
7. Gao, J. & D. Skillcom (1998). Capability of SPOT XS data in producing detailed land-cover maps at the urban-rural periphery. International Journal of Remote Sensing, 19: 2877-2891
8. Hind, M. A. D. A. N. I. (2024). La problématique du foncier dans la wilaya d'Alger (Doctoral dissertation, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene). Bah, M. (2023). Analyse de la croissance spatiale de la commune de Ratoma (Conakry, Guinée) de 1980 à 2022 et ses conséquences socio-économiques et environnementales.
9. ISTEEBU(2005) : Annuaire des statistiques agricoles
10. ISTEEBU(2018) : Enquête Agricole Nationale du Burundi
11. ISTEEBU(2021) : Annuaire des statistiques du Burundi
12. Jouve, P. (2006). Transition agraire: la croissance démographique, une opportunité ou une contrainte? Afrique contemporaine, 217(1), 43-54.
13. Kabanyegeye.H. (2019). Trente-trois ans de dynamique spatiale de l'occupation du sol de la ville de Bujumbura, République du Burundi.
14. Kalamou, M. M. D., Yamba, B., & LUDOVIC, A. ACQUISITION ET ÉVOLUTION DES SUPERFICIES DES TERRES AGRICOLES PAR LES MÉNAGES DANS LA RÉGION DE TAHOUA, NIGER.

15. Knight, F. (2023). Ebenezer Howard: Inventor of the Garden City. Royaume-Uni: Oxford University Press.
16. Leridon. H. (2020). Population& Société : Population Mondiale, vers une explosion ou une implosion ?
17. Malthus, T. R., & Comte, C. (1852). Essai sur le principe de population (Vol. 7). Guillaumin et ce.
18. Mikwa (2010) : Evaluation par télédétection des effets de la déforestation et de la dégradation des forêts à Kisangani (cas de la Région forestière de Masako)
19. Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage.(2018). Stratégie Agricole Nationale 2018-2027.
20. Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage.(2022). Cartographie de la fertilité des sols du Burundi.
21. 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 Bujumbura, Burundi.
22. Osseni, A. A., Gbesso, G. H. F., Idakou, G., Fandohan, A. B., Toko, I., Tente, A. B. H., & Sinsin, B. A. (2023). Reconstitution spatiale et simulation des changements futurs de l'occupation du sol dans la Réserve de Biosphère de la basse vallée de l'Ouémé (RB-BVO) au Bénin. Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 19), 1-28.
23. Oura, R. K. (2020). Urbanisation, enjeux fonciers et fragilisation de la cohésion sociale dans le périurbain de Bouaké. *Espace Géographique et Société Marocaine*, (41/42).
24. Pelletier&Spoorenberg, T.(2016) : Aperçu sur les méthodes de projection de la population
25. Ramarosonarivo, Malala(2019) : Analyse de la dynamique spatio-temporelle du paysage de la nouvelle aire protégée du lac Alaotra(2006-2018) qui a cité (Rabenilanana,2011)
26. Salomon, W. (2023). Urbanisation, agriculture et dynamique spatio-temporelle de l'anthropisation des écosystèmes forestiers en Haïti.
27. Sama, A., Ramdé, Z., Ouédraogo, P. C., Sikuzani, Y. U., Salomon, W., Dipama, J. M., & Bogaert, J. (2023). Pression anthropique et dynamique de l'occupation du sol

Autour du Corridor n 1 du Complexe éCologique Pô-Nazinga-Sissili au Burkina Faso. *Tropicultura*.

28. Sindayihebura. B.(2005).De l'Imbo au Mirwa : Dynamique de l'occupation du sol, croissance urbaine et risque naturels dans la région de Bujumbura.
29. Soumana. H. (1999). Apport de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique à la préparation d'un cadastre polyvalent : cas de la région de Niamey (Niger).
30. Vancutsem&al. (2008). The land cover map of the Democratic Republic of Congo, presses universitaires de Louvain ISBN2-87463-019-5, UCL-Geomatics,Louvain-la-Neuve.
31. Vittek, M., Brink, A., Donnay, F., Simonetti, D., & Desclée, B. (2014). Land cover change monitoring using Landsat MSS/TM satellite image data over West Africa between 1975 and 1990. *Remote sensing*, *6*(1), 658-676.
32. Zhan. Q. (2002). Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data. International Journal of Remote Sensing, 23, 3057-3078

Textes légaux

1. Loi No 1/010 portant code de l'Environnement de la République du Burundi (Code de l'Environnement, 2000)
2. Décret N^{o} 100/22 du 7 Octobre 2010 portant mesures d'application du code de l'environnement en rapport avec la Procédure d'Etude d'Impact Environnemental
3. Loi No 1/09 du 12 Août 2016 portant code de l'Urbanisme, de l'habitat et de la Construction au Burundi
4. Loi No 1/09 du 25 Mai 2021 portant modification du code de l'environnement, de la République du Burundi

Sites internet

https://earthexplorer.usgs.gov/ visité le 14 Janvier 2023

www.sigterritoires.fr visité le 02 Septembre 2023

ANNEXE

Annexe1 : Population en fonction des superficies contributives par commune de la zone d'étude

Provinces	**Communes**	**population08**	**population 2010**	**Population 2015**	**Population2021**
Bubanza	Bubanza	83678	87743	103734	130652
	Gihanga	55344	58032	68609	86412
	Mpanda	58913	61775	73033	91985
	Musigati	82207	86200	101911	128355
	Rugazi	57881	60693	71754	90373
Mairie de Bujumbura	Mairie Buja	497166	521316	616326	776258
Bujumbura Rural	Isale	78740	82565	97613	122942
	Kabezi	49079	51463	60842	76630
	Kanyosha	78823	82652	97715	123072
	Mubimbi	41689	43714	51681	65092
	Mugongomanga	27985	29344	34692	43695
	Mukike	24660	25858	30571	38503
	Mutambu	43763	45889	54252	68330
	Mutimbuzi	69525	72902	86189	108554
Muramvya	Muramvya	81257	85204	100733	126872
	total	**1330710**	**1395350**	**1649655**	**2077725**

Source : ISTEEBU, RGP 2008

Annexe 2 : Humidité relative dans la zone d'étude pour des années dont les récoltes ont été analysées

1996			**2001-2002**						**2014-2015**					
Mois	HR max	HR min	Mois	HR max	HR min	Mois	HR max	HR min	Mois	HR max	HR min	Mois	HR max	HR min
10	88	51	1	95	63	1	95	61	1	96	60	1	93	55
11	92	55	2	94	60	2	95	56	2	95	58	2	93	53
12	92	55	3	95	59	3	94	57	3	95	55	3	93	93
			4	94	56	4	94	63	4	95	54	4	92	
			5	93	55	5	94	52	5	91	49	5	92	54
			6	92	51	6	87	45	6	89	49	6	90	47
			7	90	48	7	85	44	7	84	45	7	85	43
			8	0	0	8	67	46	8	84	47	8	79	39
			9	89	51	9	68	43	0	0	0	9	84	41
			10	90	56	10	80	43	10	90	52	10	89	51
			11	92	54	11	86	62	11	94	57	11	93	57
			12	94	55	12	85	60	12	93	58	12	94	58

Source : IGEBU

Annexe3 : Images satellitaires de la zone d'Etude

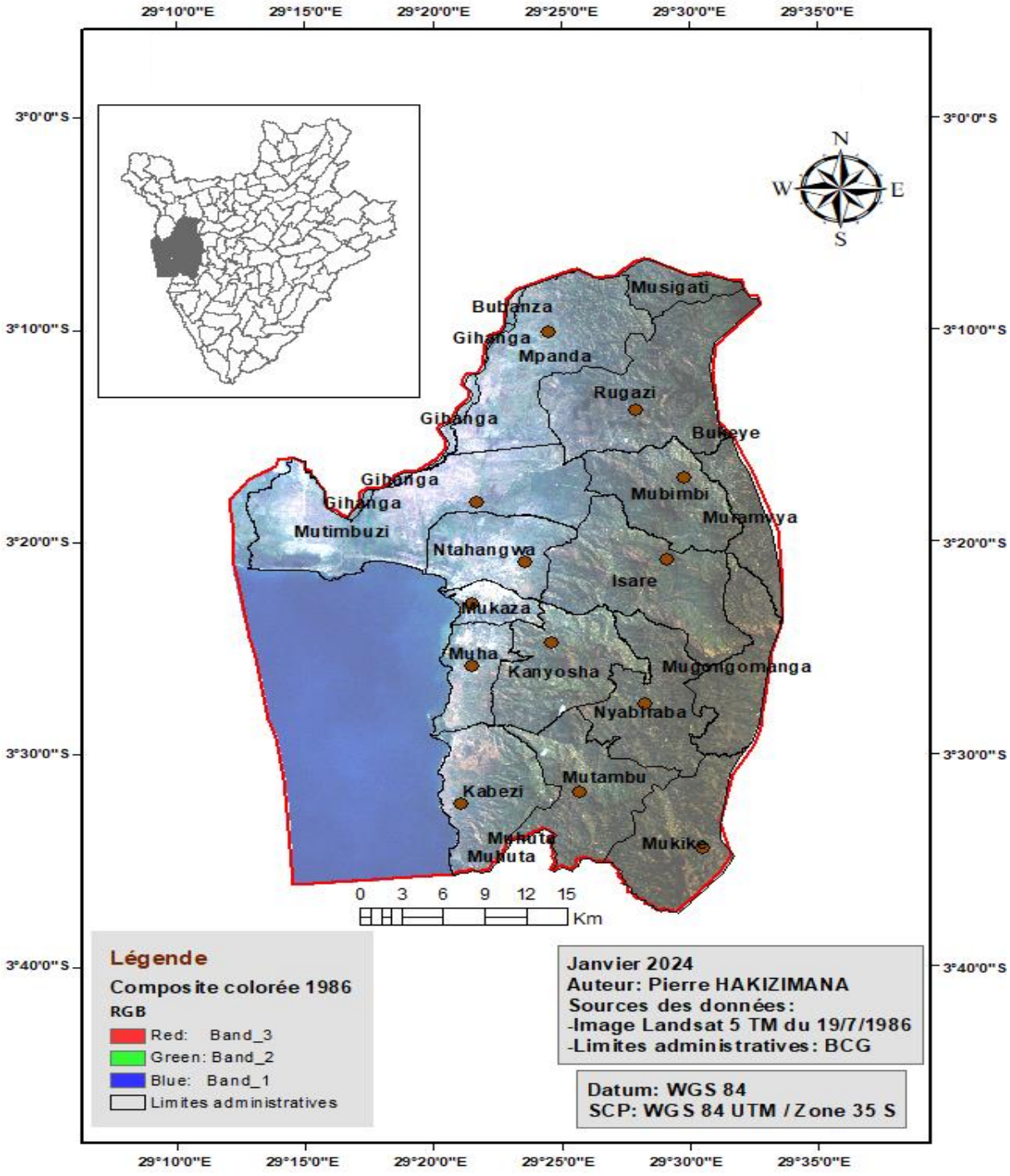


Image Satellitaire de la zone d'étude de 1986 combinaison 321 Auteur : H. Pierre

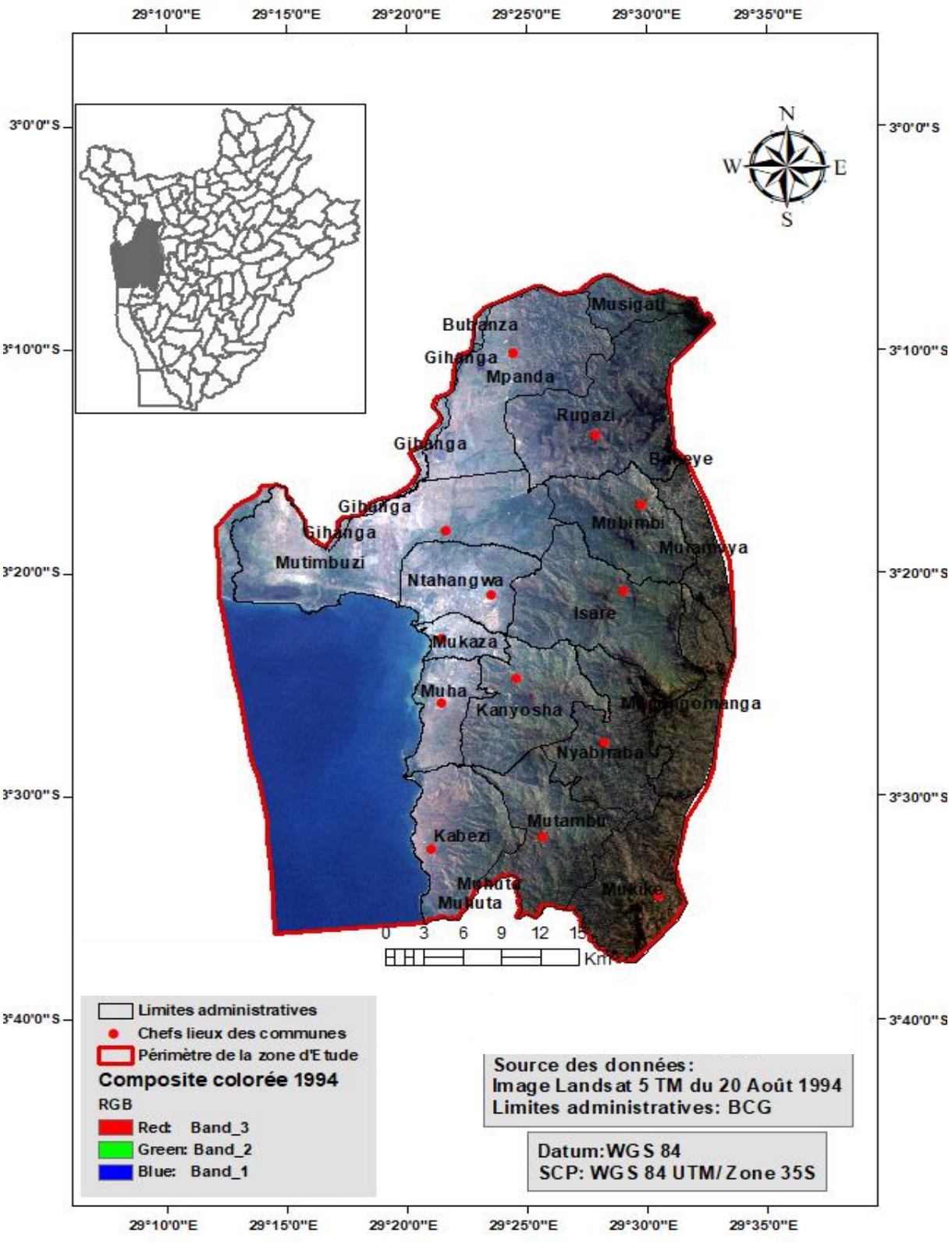


Image Satellitaire de la zone d'étude de 1994 combinaison 321 Auteur : H. Pierre

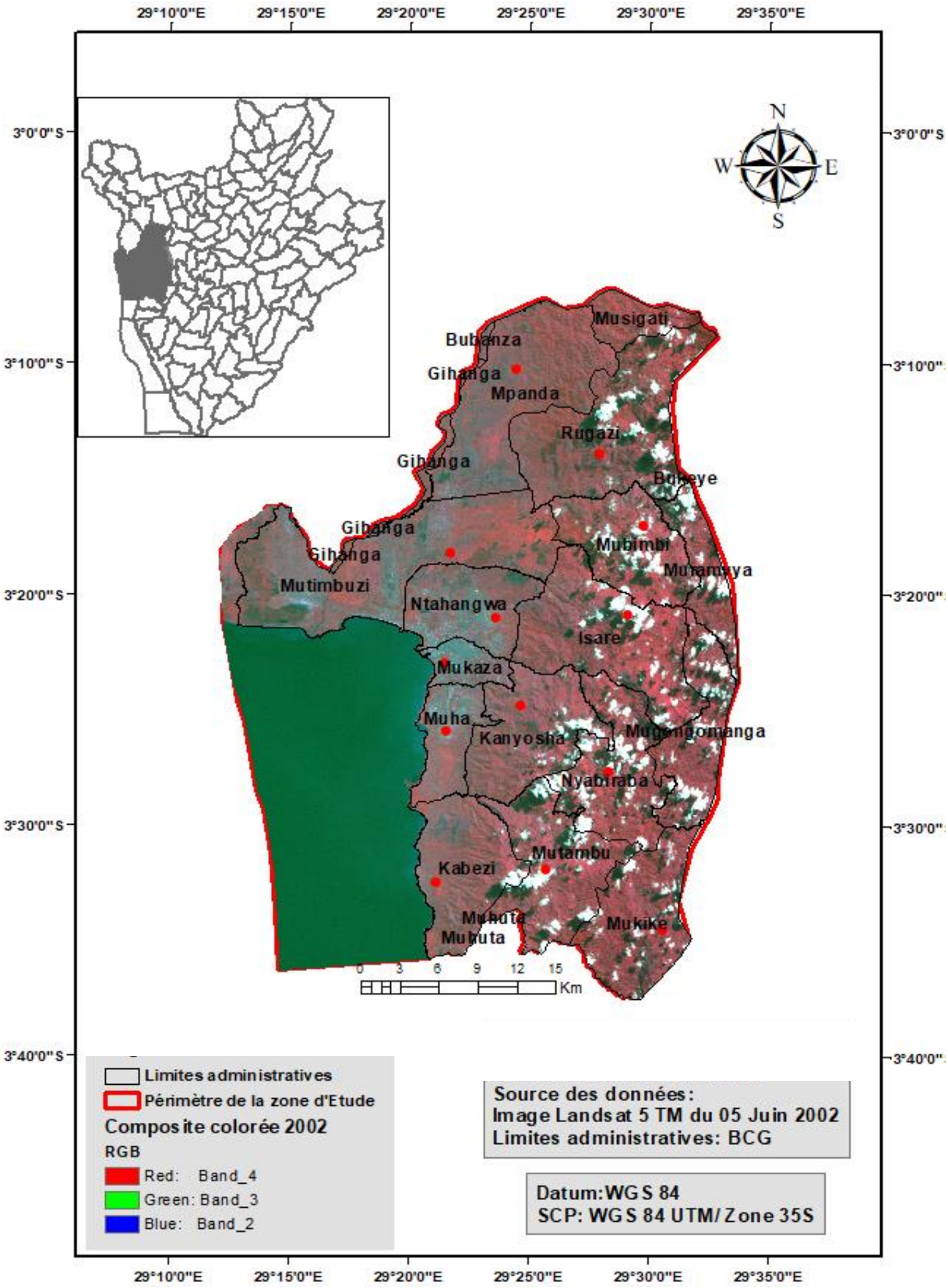


Image Satellitaire de la zone d'étude de 2002 combinaison 432 Auteur : H. Pierre

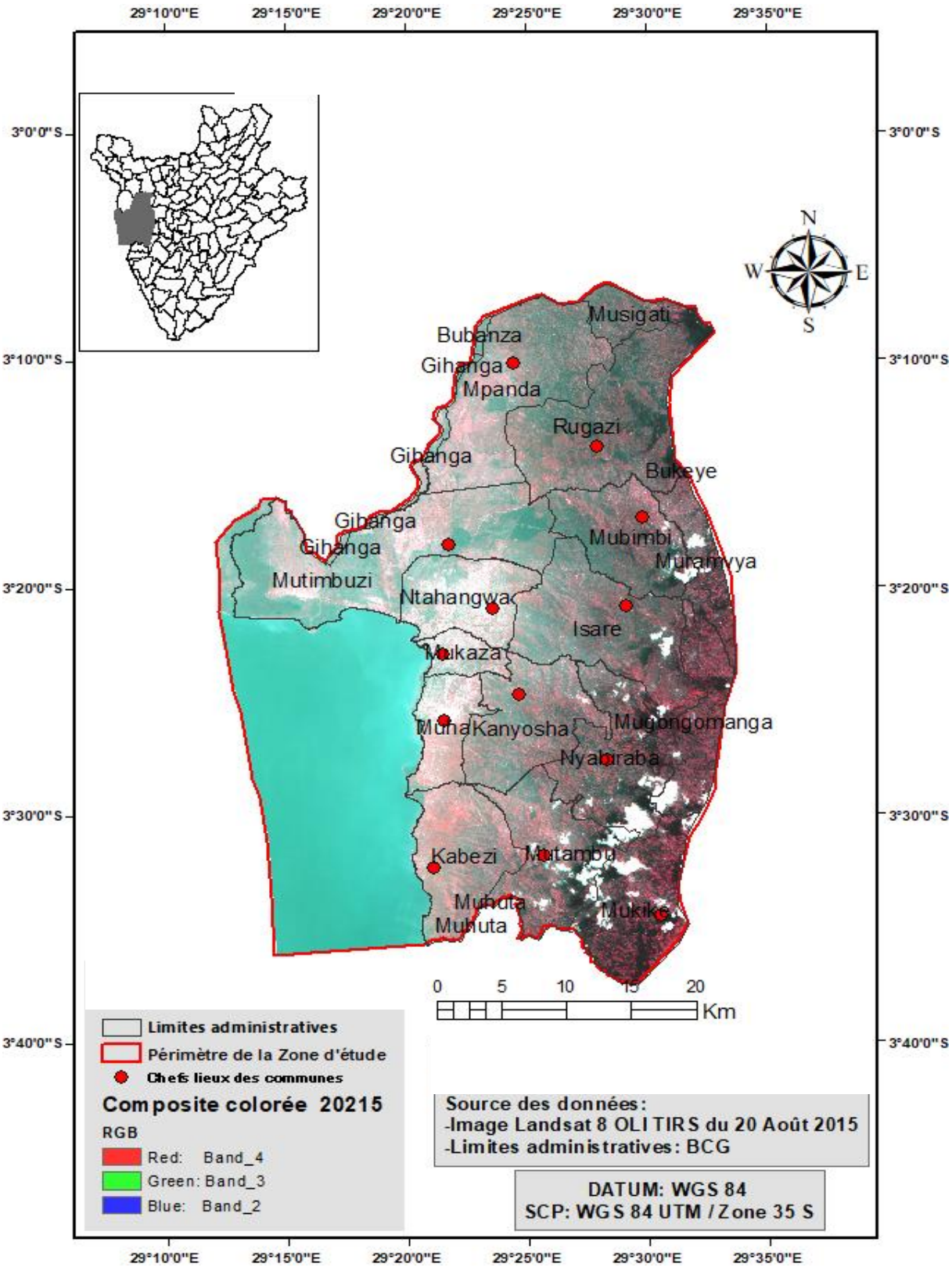


Image Satellitaire de la zone d'étude de 2015 combinaison 432 Auteur : H. Pierre

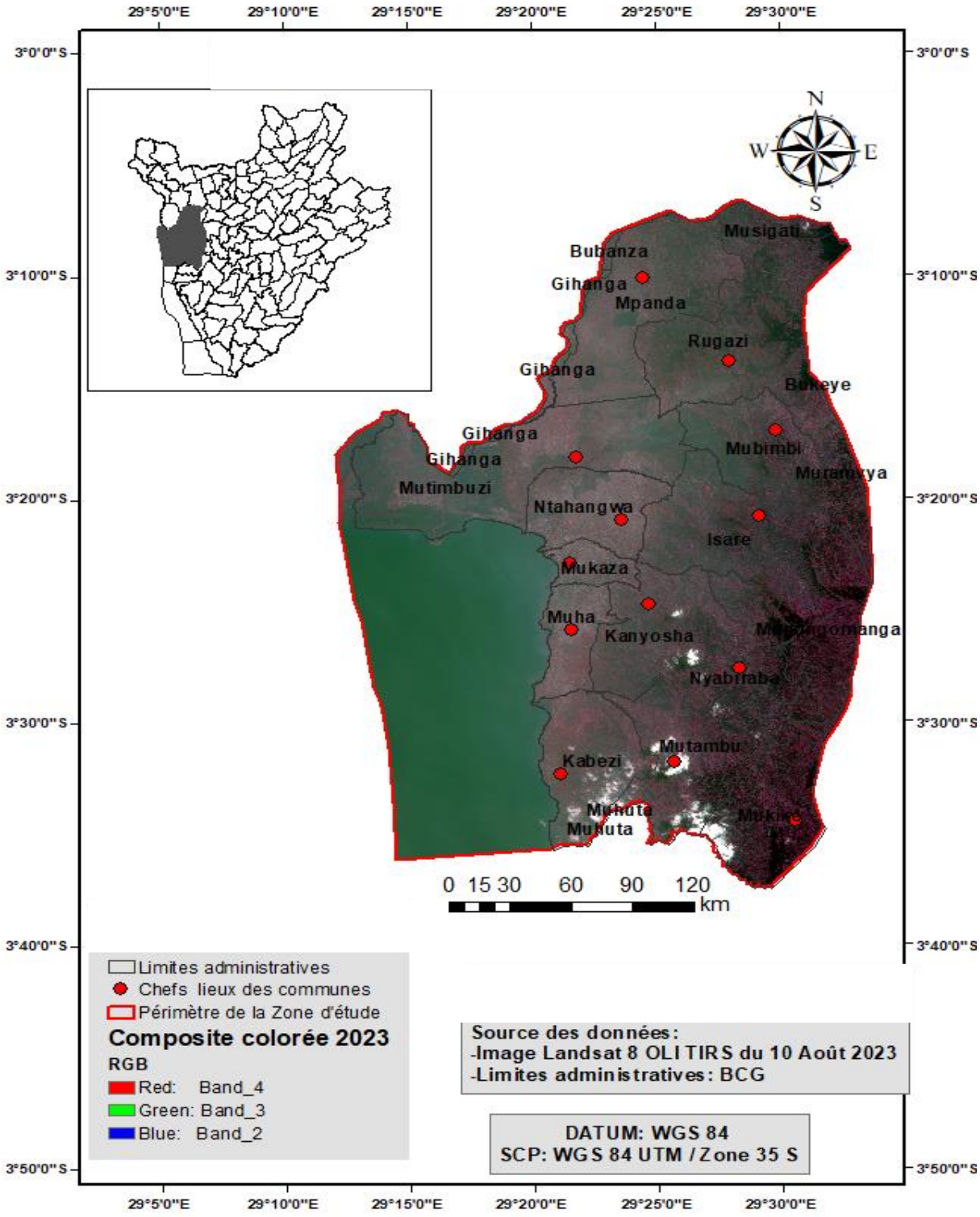
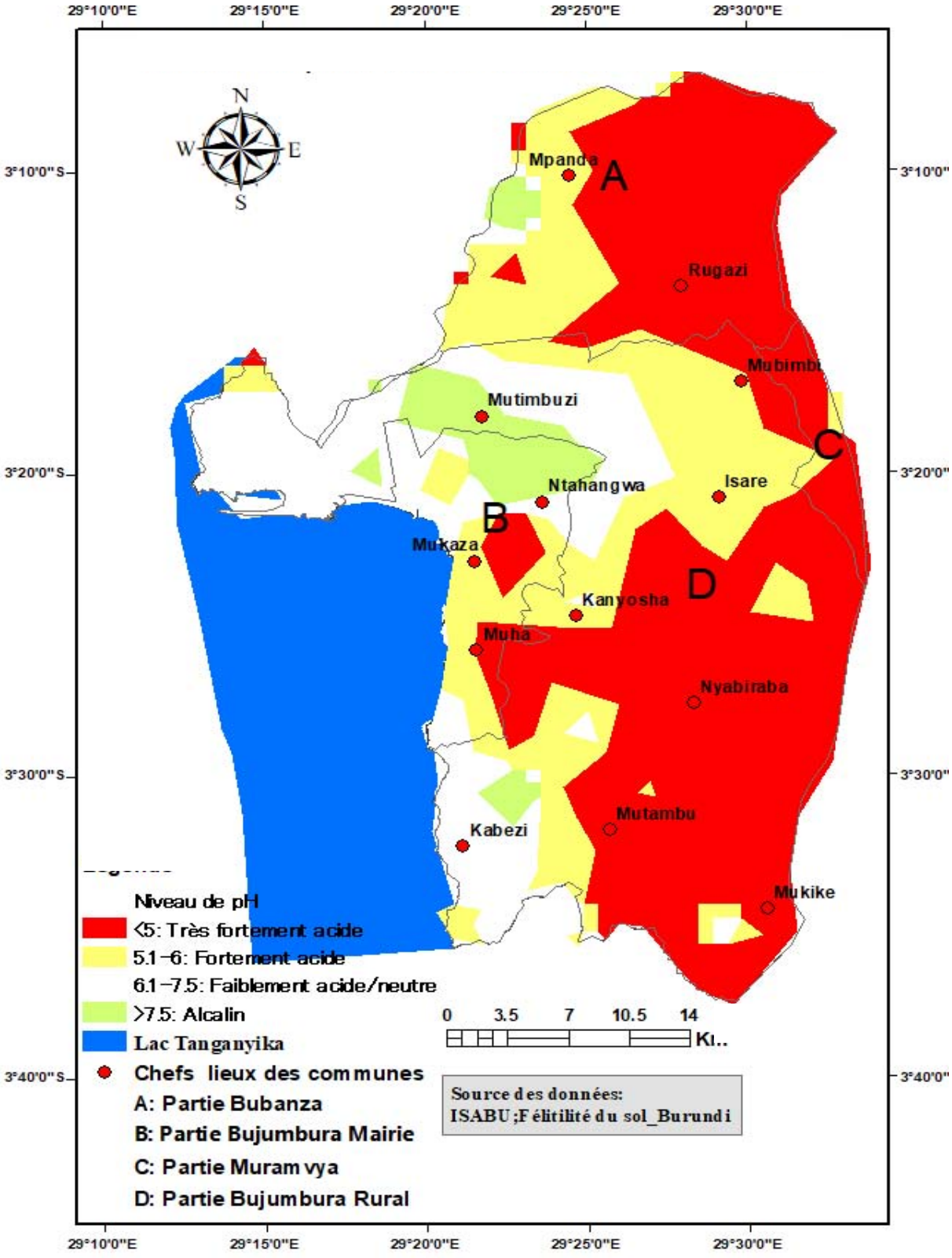
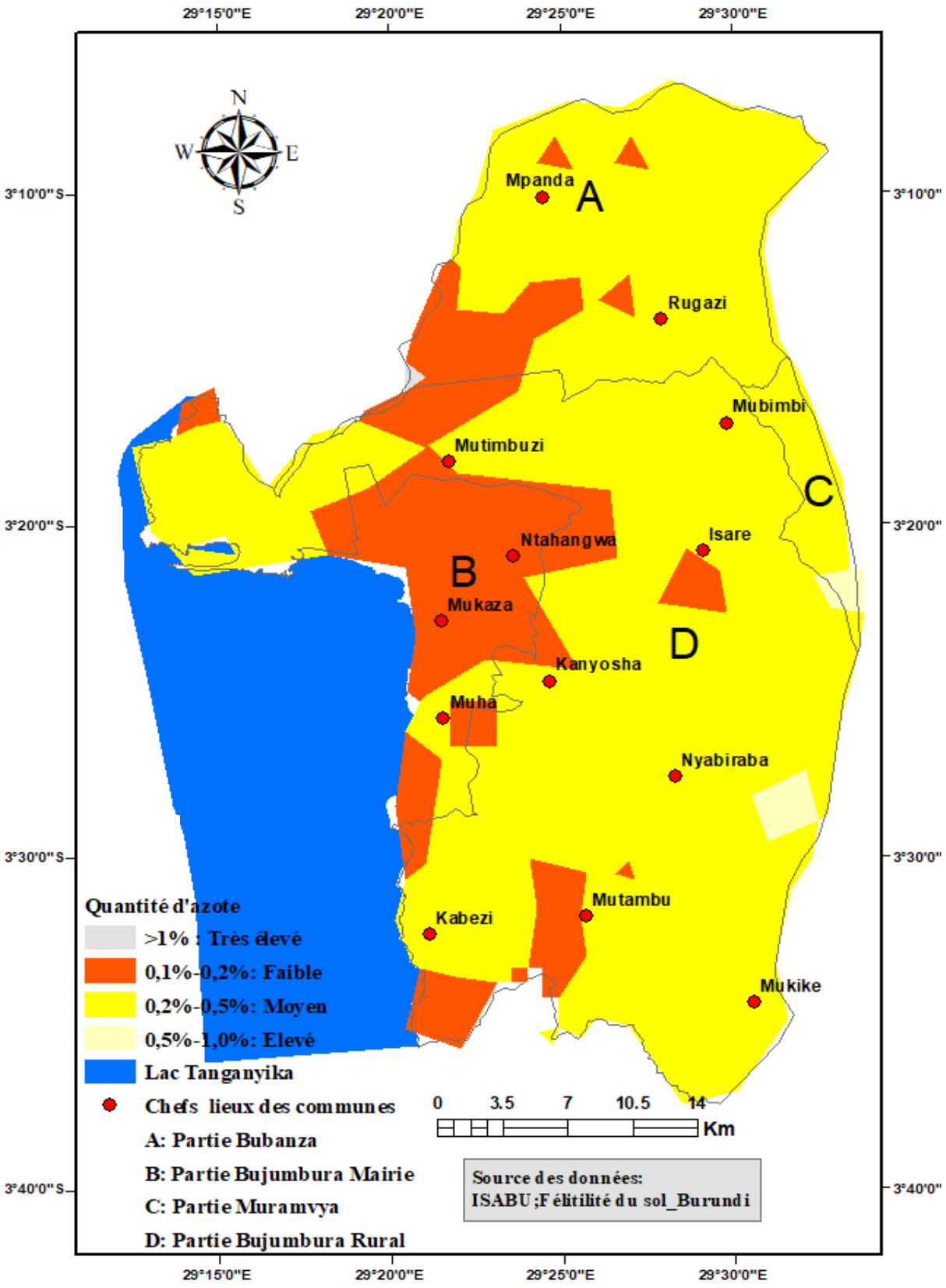


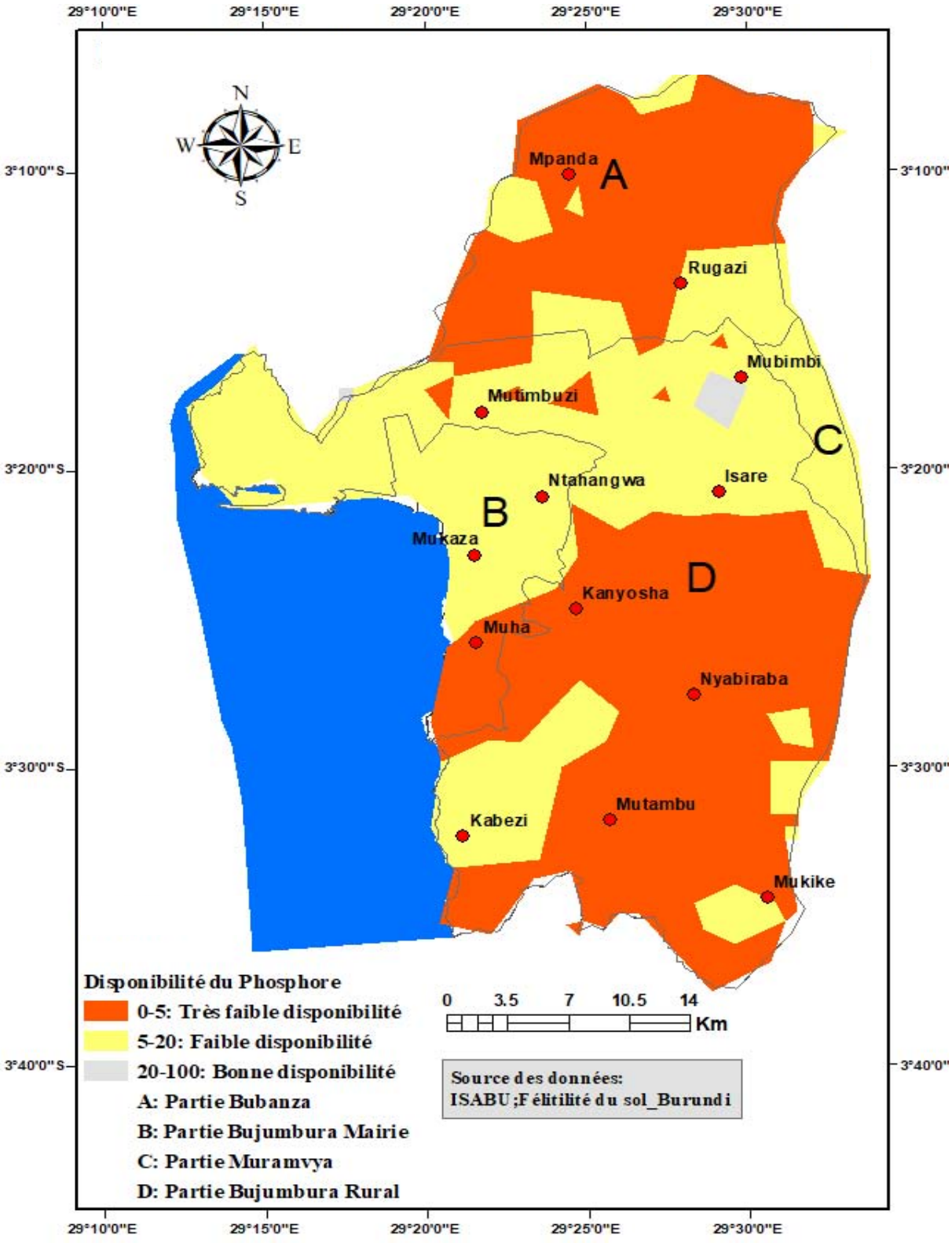
Image Satellitaire de la zone d'étude de 2023 combinaison 432 Auteur : H. Pierre



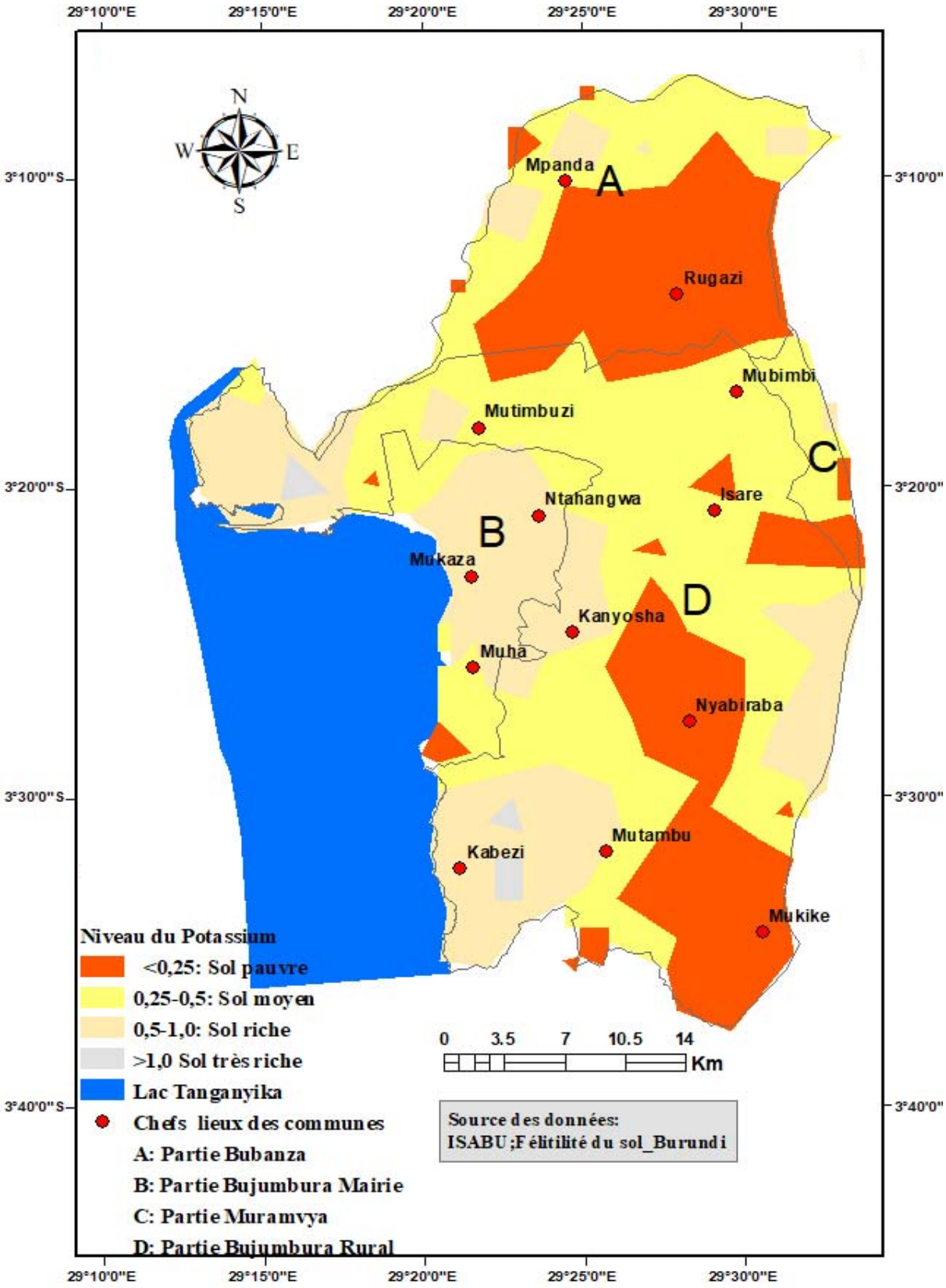
Carte d'acidité du sol dans la zone d'étude **Auteur : H. Pierre**



Carte de répartition d'Azote dans le sol de la zone d'Etude **Auteur : H. Pierre**



Carte de répartition du Phosphore dans le sol de la zone d'Etude Auteur : H. Pierre



Carte de répartition du Potassium dans le sol de la zone d'Etude Auteur : H. Pierre