

Travail de fin d'études

Auteur : Ndikubwayo, Ernest

Promoteur(s) : Denis, Antoine

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/8038>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCLouvain - Faculté des bioingénieurs

**CONTRIBUTION DE LA TELEDETECTION ET DES SYSTEMES
D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG) DANS L'ETUDE DE LA
DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN
ET PERIURBAIN DE LA PARTIE NORD DE LA MAIRIE DE
BUJUMBURA, BURUNDI**

Par

Ernest NDIKUBWAYO

ANNEE ACADEMIQUE 2018 - 2019

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES
PAYS EN DEVELOPPEMENT**

Filière Nature et Territoires

REDIGE SOUS LA DIRECTION DU Dr. Antoine DENIS

COMITE DE LECTURE :

Pr. JEAN-MARIE HALLEUX

Pr. BERNARD TYCHON

« *Copyright :*

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université catholique de Louvain. * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège et/ou de l'UCLouvain ».*

"Le présent document n'engage que son auteur"

Auteur du présent document : NDIKUBWAYO Ernest

Adresse mail : ernest.ndikubwayo@gmail.com

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCLouvain - Faculté des bioingénieurs

**CONTRIBUTION DE LA TELEDETECTION ET DES SYSTEMES
D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG) DANS L'ETUDE DE LA
DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN
ET PERIURBAIN DE LA PARTIE NORD DE LA MAIRIE DE
BUJUMBURA, BURUNDI**

Par

Ernest NDIKUBWAYO

ANNEE ACADEMIQUE 2018 - 2019

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES
PAYS EN DEVELOPPEMENT**

Filière Nature et Territoires

REDIGE SOUS LA DIRECTION DU Dr. Antoine DENIS

COMITE DE LECTURE :

Pr. JEAN-MARIE HALLEUX

Pr. BERNARD TYCHON

REMERCIEMENTS

Au terme du présent travail, il nous tient d'exprimer notre action de gratitude à l'endroit de toutes les personnes tant physiques que morales qui ont contribué à sa réalisation.

D'abord à Dieu, le Tout Puissant pour nous avoir accordé bonne santé durant toute la période de notre formation. Ensuite, nos remerciements sont adressés à l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles (ARES-CCD) pour nous avoir octroyé la bourse afin de suivre ce programme de Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement (MS SGE PED). Certes, les acquis de la formation nous permettront d'aborder la problématique environnementale suivant de nouveaux paradigmes bien orientés, en phase avec la situation environnementale actuelle et les nouvelles technologies en matière de protection de l'environnement en général et dans les pays en développement, dont le nôtre en particulier.

Nos vifs remerciements sont également adressés à Monsieur Antoine DENIS, promoteur et directeur de ce travail. Sa rigueur scientifique, sa détermination, ses conseils et remarques si judicieux ainsi que sa disponibilité malgré ses multiples obligations nous ont été d'une importance incomparable dans la réalisation effective du présent travail. Des remerciements sont aussi adressés à tout le personnel de l'Université de Liège et celui de l'Université Catholique de Louvain pour la formation et le guide qu'il nous a réservé durant toute la période de séjour dans ces deux institutions.

Il nous sied d'adresser nos sincèrement remerciements à ma chère épouse et nos deux enfants pour leur patience, encouragement et leur soutien durant toute la période de vie séparée pour cause de la présente formation. C'est le même sentiment à l'endroit de nos parents, frères et sœurs, tantes, oncles, cousins et cousines. Que Dieu les bénisse.

Nous ne saurions pas terminer notre page sans exprimer notre reconnaissance à tous nos camarades de classe. Leur présence nous a réconforté et fait aller de l'avant par notre entraide mutuelle et franche collaboration qui nous ont rapproché les uns des autres malgré les différences régionales et ont été un des facteurs d'importance non négligeable dans la réussite de notre cursus. Et enfin, tous ceux qui, à différents degrés, nous ont donné un coup de tremplin, de près ou de loin dans notre formation et à l'aboutissement du présent travail et qui ne se trouvent pas nommément évoqués dans les paragraphes ci-haut, qu'ils rencontrent eux-aussi dans ces pages l'expression de notre profonde gratitude.

DEDICACES

À ma chère épouse Yvette MUNEZERO

À mon fils King Aymard ITERITEKA

À ma fille Christa Queen Liorah IRUHIRIYE

Je dédie ce travail.

RESUME

Ce travail est consacré à l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain dans la partie nord de la Mairie de Bujumbura. Il a été réalisé dans deux bassins-versants tertiaires d'inondation, celui de la rivière Ntahangwa et celui de la rivière Mutimbuzi ainsi que sur la partie de la rive du lac Tanganyika en aval de ces rivières. Des images Google Earth de 2002, 2012 et 2018 ont été traitées pour l'étude de zones tampons de 2002 et 2012 créées autour des lits majeurs des rivières et de la rive du lac Tanganyika. Pour étudier la dynamique de l'occupation du sol de ces zones, des images Landsat de 1996 et 2015 ont été utilisées. Elles ont fait l'objet d'une classification supervisée en sept classes thématiques identifiées à savoir l'eau pâle, l'eau turbide, le bâti, le sol nu, les zones de couverture végétale faible, les zones de couverture végétale moyenne et les zones de couverture végétale dense. Les résultats de la classification ont prouvé qu'en termes de superficie, l'eau pâle a diminué de 4,2% au moment où l'eau turbide a fortement augmenté à raison de 83%. L'espace bâti a plus que doublé (+119,1%). La superficie du sol nu a augmenté de 49,9% tandis que celles des zones de couverture végétale faible et dense ont diminué à raison de 13,4% et 43,4% respectivement. La superficie de la couverture végétale moyenne a augmenté jusqu'à 25,4%. Globalement, les bassins versant prospectés connaissent une évolution régressive en termes de couverture végétale et les actions anthropiques liées à l'agriculture et à la construction sont à la base de cette dégradation. Les résultats de l'étude de la dynamique de l'occupation du sol dans les zones tampons autour des rivières et de la rive du Lac Tanganyika ont montré que le lit majeur de la rivière Mutimbuzi a presque doublé de 2002 à 2012 et plus que quadruplé de 2002 à 2018 tandis que celui de la rivière Ntahangwa s'est faiblement rétréci de 2002 à 2012 et faiblement élargi de 2012 à 2018. Quant aux superficies des zones anthropisées dans les zones tampons de 2002 et 2012 des lits majeurs des rivières et de la rive du lac, une augmentation a été observée pour la période de 2002 à 2018 de même que pour celle de 2012 à 2018 avec une faible diminution à nuancer pour la zone tampon du lac Tanganyika suite au changement morphologique de la rive. Globalement, l'évolution des lits majeurs des rivières et de l'occupation du sol dans leurs zones tampons et celle du lac Tanganyika font état d'une dégradation témoignant ainsi du non-respect de la législation en vigueur depuis 2012 en matière de protection de ces espaces.

Mots clés : Dynamique spatio-temporelle, télédétection, systèmes d'information géographique, environnement urbain et périurbain, nord de la Mairie de Bujumbura.

ABSTRACT

This work is devoted to the spatio-temporal dynamic's study of the urban and peri-urban environment in the Bujumbura town hall northern part. It has been carried out in two tertiary watersheds, the one of Ntahangwa's river, the other one of Mutimbuzi's river and the Lake Tanganyika's downstream part of these rivers. The 2002, 2012 and 2018 Google Earth images have been processed for 2002 and 2012 buffers created around major river's beds and Lake Tanganyika's shore study. For studying land-use dynamic of these areas, 1996 and 2015 Landsat images have been used. Landsat images have been classified into seven thematic classes namely pale water, turbid water, the built area, bare soil, low vegetation cover areas, medium vegetation cover areas and dense vegetation cover areas. The classification's results proved that pale water area decreased by 4.2% while turbid water one's has increased strongly to 83%. Built space has more than doubled (+ 119.1%). Bare soil area increased to 49.9% while lowly and densely covered areas decreased to 13.4% and 43.4% respectively. The medium vegetation cover area increased to 25.4%. Overally, prospected watersheds are regressively evolved in terms of vegetation and anthropogenic actions in relation of agriculture and constructions are degradation causes. The land use dynamic results study in buffers around rivers and Tanganyika Lake's shore have shown that Mutimbuzi river's major bed has almost doubled from 2002 to 2012 and more than quadrupled from 2002 to 2018 while the Ntahangwa river's one is weakly decreased from 2002 to 2012 and weakly broadened from 2012 to 2018. For anthropized areas in buffers of 2002 and 2012 river's major beds and lake's shore, a raise has been observed for 2002 to 2018 period as well as 2012 to 2018 one's with a small decrease to be qualified for the Lake Tanganyika's buffer with morphological shore's change. Overally, the river's major beds evolution observed and their buffers's land use as well as in the Tanganyika lake's one are a deterioration sign, thus demonstrating the legislation's unrespect which one according to these spaces's protection exist since 2012.

Key words : Spatio-temporal dynamic, remote sensing, geographic information systems, urban and peri-urban environment, Bujumbura town hall northern part.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
DEDICACES	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
CHAPITRE I : PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS ET HYOTHESES	1
I.1. Introduction	1
I.2. Problématique	2
I.3. Objectifs	3
I.4. Hypothèses	4
CHAPITRE II. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	5
II.1. Extension spatiale de la ville de Bujumbura	5
II.2. Délimitation spatio-temporelle de l'étude	5
II.3. Démographie	7
II.4. Relief	9
II.5. Pédologie	11
II.6. Climat	12
II.7. Réseau hydrographique	15
II.8. Espaces à régime de protection par la loi dans la zone d'étude	16
II.9. Menaces environnementales et événements catastrophiques	18
II.10. Institutionnalisation de la gestion de l'environnement	22
CHAPITRE III : METHODOLOGIE	23
III. 1. Approche méthodologique	23
III.2. Revue bibliographique	24
III.3. Etude de la dynamique dans les bassins-versants	24
III.3. 1. Choix des capteurs	24
III.3.2. Choix des images	25
III.3.3. Prétraitement des images	25
III.3.4. Photo-interprétations	26
III.3.5. Traitement des images	27

III.3.5.1. La réalisation de la classification supervisée	27
III.3.5.2. Validation de la classification supervisée	29
III.3.6. Analyses des résultats de la classification.....	31
III.3.7. Contraintes.....	32
III.4. Etude de la dynamique dans les zones tampons	32
III.4.1. Traitements	32
III.4.2. Contraintes.....	34
CHAPITRE IV. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	35
IV.1. Dynamique dans les bassins-versants	35
IV.1.1. Cartographie d'occupation du sol.....	35
IV.1.2. Analyse quantitative des changements d'occupation du sol entre 1996 et 2015	39
IV.2. Dynamique dans les zones tampons.....	42
IV.2.1. Occupation du sol dans les zones tampons entre 2002 et 2018	42
IV.2.2. Evaluation de la mise en application du code de l'eau du 26 mars 2012	44
CHAPITRE V. DISCUSSION DES RESULTATS.....	48
V.1. Evolution de l'occupation du sol dans les bassins versant de 1996 à 2015.....	48
V.2. Evolution des lits majeurs et de l'occupation du sol dans les zones tampons	49
VI. CONCLUSION ET RECOMMANDATION	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	53
ANNEXES	I

SIGLES ET ABREVIATIONS

Art.	: Article
BCG	: Bureau de Centralisation Géomatique
BV	: Bassin-Versant
CIE	: Centre d'Information Environnementale
ENVI	: Environment of Visualizing Images (logiciel payant de télédétection)
GPS	: Global Positioning System
hab	: Habitants
IRM	: Infrarouge moyen
IRTh	: Infrarouge thermique
ISTEEBU	: Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi
MEATTP	: Ministère de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et des Travaux Publics
MEEATU	: Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme
MINATTE	: Ministère de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de l'Environnement
MINEAGRIE	: Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage
MIR	: Moyen Infrarouge
Pan	: Panchromatique
PFNPRGC	: Plateforme Nationale de Prévention des Risques et de Gestion des Catastrophes
PIR	: Proche Infra-Rouge
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
QGIS	: Quantum Geographic Information System (logiciel libre du SIG)
R	: Rouge
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
ROI	: Region Of Interest
SCP	: Système de Coordonnées Projétées
SDM	: Schéma Directeur des Marais
SIG	: Système d'Information Géographique
ZA	: Zone anthropisée

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Evolution spatiale de la ville de Bujumbura	5
Fig. 2 : Délimitation spatiale de la zone d'étude.....	6
Fig. 3 : Aperçu de la zone d'étude en 3D	7
Fig. 4 : Démographie de la zone d'étude	8
Fig. 5 : Projection de la population de 2008 à 2038 dans les communes de la zone d'étude.....	9
Fig. 6 : Carte relief de la zone d'étude	10
Fig. 7 : Carte des pentes de la zone d'étude	10
Fig. 8 : Carte des sols dominants de la zone d'étude.....	12
Fig. 9 : Climat de la zone d'étude	13
Fig. 10 : Diagramme ombrothermique de Bujumbura	14
Fig. 11 : Evolution des températures moyennes annuelles et des précipitations (cumuls annuels) de la zone d'étude pour la période 1994-2016	14
Fig. 12: Réseau hydrographique de la zone d'étude	15
Fig. 13 : Zone à régime de protection particulière par la loi dans notre zone d'étude.....	16
Fig. 14 : Quelques illustrations des menaces sur l'environnement urbain et périurbain de Bujumbura	18
Fig. 15 : Illustration des évènements catastrophiques au nord de Bujumbura Mairie	20
Fig. 16 : Etendue des phénomènes hydrométéorologiques observés lors de la catastrophe de la nuit du 09 au 10 février 2014	22
Fig. 17 : Représentation schématique de l'approche méthodologique.....	23
Fig. 18 : Tronçons des rivières et de la rive du lac Tanganyika étudiés par digitalisation sur Google Earth.....	34
Fig. 19 : Classes d'occupation du sol par classification supervisé des images Landsat TM 5 de 1996 et OLI TIRS de 2015	37
Fig. 20 : Evolution des classes d'occupation de sol entre 1996 et 2015	40
Fig. 21 : Dynamique des différentes classes d'occupation du sol de 1986 à 2015	41
Fig. 22 : Evolution de l'occupation du sol dans les zones tampons de 2002 entre 2002 et 2018.....	43
Fig. 23 : Evolution de l'occupation du sol dans les zones tampons de 2012 entre 2012 et 2018.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs des images utilisées	24
Tableau 2 : Images téléchargées et traitées.....	25
Tableau 3 : Classes thématiques identifiées sur les images	28
Tableau 4 : ROI de calibration	29
Tableau 5 : ROI de validation de la classification	30
Tableau 6 : Degré d'accord et valeur du coefficient de Kappa.....	31
Tableau 7 : Matrice de confusion pour l'images de 1996	38
Tableau 8 : Matrice de confusion pour l'images de 2015	38
Tableau 9 : Estimation des superficies des classes d'occupation de sol en 1996 et 2015.....	39
Tableau 10 : Matrice de transition de 1996 à 2015	40
Tableau 11 : Evolution des lits majeurs et des zones anthropisées dans les zones tampons de 2002 des rivières Mutimbuzi et Ntahangwa et du lac Tanganyika entre 2002 et 2018.....	44
Tableau 12 : Evolution des lits majeurs et des zones anthropisées dans les zones tampons de 2012 des rivières Mutimbuzi et Ntahangwa et du lac Tanganyika entre 2012 et 2018.....	47

CHAPITRE I : PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS ET HYOTHESES

I.1. Introduction

Dès sa création en 1871, suite à l'exploration du site par David Livingston et Sir Henri Morton Stanley, la ville de Bujumbura qui s'appelait alors Usumbura n'était qu'un petit village, lorsque le Burundi est devenu une partie de l'Afrique de l'Est allemande au cours du 19^{ème} siècle. A partir de 1898, la ville d'Usumbura est devenue un camp militaire et puis le centre administratif, après la deuxième guerre mondiale sous le mandat belge de la ligue des Nations au Rwanda-Urundi. Usumbura a été changé en Bujumbura, avec l'accession du Burundi à l'indépendance en 1962 (République du Burundi & PNUD, 2014).

Avec une population de 321 000 habitants en 1999 (République du Burundi & PNUD, 2014), la Ville de Bujumbura comptait 497 166 habitants en 2008 (ISTEEBU, 2008). Ce chiffre, en pleine croissance, est projeté à 692 364 habitants en 2020 et à 760 932 et 825701 habitants respectivement en 2025 et 2030 (ISTEEBU, 2013). Une situation similaire s'observe dans tout le pays en général et dans les zones périurbaines en particulier avec un taux d'accroissement naturel annuel moyen estimé à 2,4% pour la période de 1990 à 2008 (ISTEEBU, 2008) et qui ne cesse d'augmenter. Cette population galopante se répercute négativement sur l'environnement urbain et périurbain, étant donné qu'elle n'est pas suivie d'un bon programme d'occupation, d'affectation et de gestion du sol dans le strict respect des aires protégées, des espaces d'intérêt public et des espaces à régime de protection particulière (République du Burundi, 2012)¹.

Les études détaillées sur la dynamique de l'environnement de la zone urbaine et périurbaine de la Mairie de Bujumbura restent rares alors que ce sont ces dernières promouvrain le respect de l'environnement et la gestion durable des ressources naturelles dans cette zone.

¹ Code de l'eau du Burundi du 26 mars 2012, Art. 5 relatif au domaine public hydraulique (alinéas 1 à 3) :

1° Les sources et cours d'eau, les lacs naturels, les étangs et plans d'eau artificiels aménagés par l'Etat ou pour son compte ;

2° Les lits des lacs, des cours d'eau, des étangs et plans d'eau visés au point 1° ;

3° Les bords ou rives des lacs, sur une largeur de cent cinquante mètres pour le lac Tanganyika, cinquante mètres pour les autres lacs du pays, une largeur de vingt-cinq mètres sur chacun des bords pour les rivières affluent du lac Tanganyika, à partir du niveau le plus élevé qu'atteignent les eaux dans leurs crues périodiques. Pour les autres rivières du pays, une zone de protection sur une largeur de cinq mètres.

Les informations environnementales existantes se trouvent dans certains rapports et dans des études prédictives à long terme².

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la palliation de ce défi par la mise en évidence des impacts de l'évolution spatio-temporelle de la ville ainsi que de l'augmentation de la population sur l'environnement urbain et périurbain. Il en ressortira des conclusions qui permettront de dégager des recommandations pour une gestion durable. C'est dans cette optique que, sur base de la problématique ci-après dégagée (0.2), ont été fixés les objectifs (0.3) qui vont nous permettre de confirmer ou d'infirmer nos hypothèses de travail (0.4).

I.2. Problématique

Les interactions entre l'Homme et l'environnement, particulièrement avec les zones sous régime de protection par la loi, dont celles de la Mairie de Bujumbura et ses environs se traduisent, pour la plupart des cas, en infractions dues au non-respect de la législation en vigueur avec des conséquences néfastes allant jusqu'au niveau catastrophique.

Ainsi, ces dernières années comme aujourd'hui, on observe une intensification de l'exploitation du bois pour la production du charbon suite à l'augmentation de la demande due à la population urbaine et périurbaine galopante. Cette dernière conduit à un accroissement de la superficie des terres cultivées étant donné que plus de 90% de la population vivent de l'agriculture (ISTEEBU, 2015), le plus souvent avec des pratiques agricoles inappropriées et surtout dans les zones de fortes pentes dont celles de notre zone d'étude. Cela conduit à une dégradation progressive de la couverture végétale dans les collines surplombant la ville (Mairie de Bujumbura) avec comme conséquences l'augmentation des risques d'érosion, de débordement et d'inondations pouvant causer des dégâts matériels et humains énormes. Ces risques sont accentués par le jet des déchets de toutes sortes dans les rivières et dans les canalisations. Ces déchets finissent par boucher ces dernières et/ou se déverser dans le lac Tanganyika avec toutes les conséquences sur la qualité de ses eaux et en corollaire sur la biodiversité aquatique et la vie humaine étant donné que les ordures sont des nids à maladies. Au cours de ces dernières années, des évènements inquiétants voire catastrophiques se sont observés dans la Mairie de Bujumbura et ses environs faisant l'hypothèse d'une dégradation de l'environnement dans zone urbaine et périurbaine.

² Vision Bujumbura 2045 - Plan directeur innovant de la ville de Bujumbura et ses environs (République du Burundi, 2014) ; Evaluation rapide conjointe suite à la catastrophe des 9-10 février 2014 aux alentours de Bujumbura (PNPRGC/Burundi, 2014).

Peut-on citer entre autres l’envasement des rivières (pierres, sables, graviers, boue, etc.), les fréquentes inondations dans la partie nord de Bujumbura (Gatunguru en 2014, Carama en 2017 et 2018 et Buterere-Kiyange 2018) ayant causé des dégâts humains et matériels, les glissements de terrain et les éboulements.

De surcroît, on assiste à une destruction, dans l’indifférence totale, des lits et des berges des rivières traversant la Mairie de Bujumbura par l’extraction des matériaux de construction qui ne respecte pas les normes environnementales (MBONERANE, 2011) reprises dans le code minier de la République du Burundi (République du Burundi, 2013)³. La même situation s’observe également dans les zones périurbaines. Plus tard, la même question reviendra lors des 4^{ème} (MBONERANE, 2016) et 6^{ème} (MBONERANE, 2018) conseils du lac Tanganyika respectivement en 2016 et 2018. Selon les mêmes sources et le constat sur terrain, des parcelles sont distribuées et des constructions érigées dans des zones humides ou dans des zones tampons du lac et des rivières en violation des dispositions de l’article 5 du code de l’eau (ci-haut cité), et de la Convention de Ramsar relative à la protection des zones humides. A cela s’ajoute le manque d’un plan d’extension de la ville et de moyens de viabilisation ce qui fait que l’extension se fait, pour la plupart des cas, dans le non-respect des normes surtout la canalisation pour l’évacuation des eaux pluviales, des eaux usées et des déchets.

I.3. Objectifs

L’objectif global de notre travail est de *contribuer à la protection de l’environnement dans la zone urbaine et périurbaine* de la partie nord de la Mairie de Bujumbura. Spécifiquement, il s’agit de :

1. Evaluer l’évolution de l’occupation du sol, particulièrement le bâti et la végétation, entre 1996 et 2015 par la classification supervisée d’images satellite Landsat ;
2. Mettre en évidence l’évolution des zones anthropisées dans des zones tampons créées autour des rivières traversant la ville et autour d’une partie de la rive du lac Tanganyika :
 - Montrer la progression de l’anthropisation entre 2002 et 2018 dans des zones tampons de 2002 créées autour des lits majeurs des rivières (zone tampon de 25 m) et de la rive du lac Tanganyika (zone tampon de 150 m) ;

³ Art. 68 portant octroi d’un permis d’exploitation & Titre III, Chapitre II relatif à l’extraction des carrières

- Evaluer la mise en application du code de l'eau du 26 mars 2012 par mise en évidence l'évolution des zones anthropisées entre 2012 et 2018 dans des zones tampon de 2012 créées autour lits majeurs des rivières (zone tampon de 25 m) et de la rive du lac Tanganyika (zone tampon de 150 m).

I.4. Hypothèses

Les hypothèses ci-dessous ont été formulées :

1. Le non-respect des zones tampons des rivières et du lac Tanganyika serait à la base de la dégradation de la couverture végétale de ces dernières ;
2. La couverture végétale du sol connaîtrait une évolution régressive dans les bassins versants surplombant la Mairie de Bujumbura ;
3. Les zones les plus dégradées se situeraient à proximité de la zone urbaine ;
4. Les activités anthropiques liées à l'extraction incontrôlée des matériaux de construction et à l'agriculture inadaptée seraient un des principaux facteurs de la dégradation.

CHAPITRE II. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Extension spatiale de la ville de Bujumbura

L'histoire de Bujumbura remonte 1871 avec l'exploration du site par David Livingston et Sir Henri Morton Stanley. Sa délimitation ne commencera que 6 ans plus tard et dès lors l'extension de la ville n'a cessé de s'amplifier du jour au lendemain⁴ (figure 1). Durant les 30 premières années (1877 à 1907), sa superficie n'a pas beaucoup augmenté. Elle était de 0,3 km² en 1907 (PNPRGC/Burundi, 2014). De 1907 à 1983, sa superficie est passée de 0,3 km² à 37 km². De 1983 à 2018, la superficie de la ville a presque triplé passant de 37 km² à 115 km².

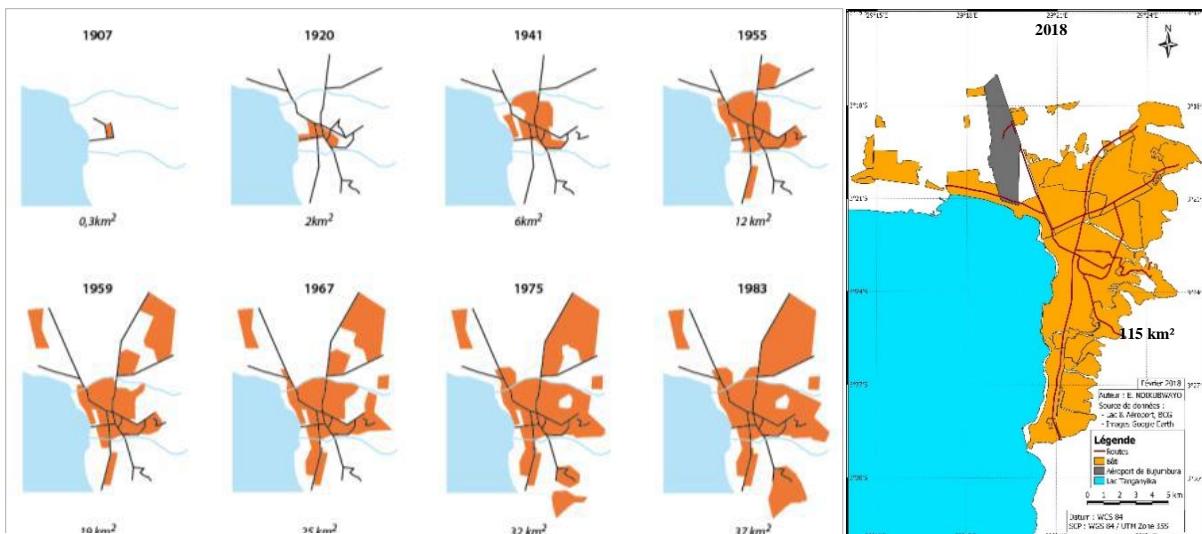


Fig. 1 : Evolution spatiale de la ville de Bujumbura

II.2. Délimitation spatio-temporelle de l'étude

Notre travail porte sur la période de 1996 à 2018 (sections III.3 et III.4). Spatialement, la zone d'étude est délimitée par deux bassins-versants (BV) tertiaires d'inondation, celui de la rivière Ntahangwa et ses affluents d'une superficie de 140 km² et celui de la rivière Mutimbuzi et ses affluents de 371 km² de superficie. Ces deux rivières traversent la ville de Bujumbura dans sa partie nord et se déversent dans le lac Tanganyika dont la partie aval de ces rivières a été aussi intégrée dans la présente étude avec une superficie de 42 km².

⁴ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bujumbura>

Géographiquement notre zone d'étude s'étend du centre à l'ouest du pays (figure 2). Comme le montre la figure 2, du point de vue administratif, ces bassins-versants s'étendent sur les communes Mukaza et Ntahangwa de la Mairie de Bujumbura, les communes Mutimbuzi, Mubimbi, Isale, Kanyosha, Nyabiraba et Mugongomanga de la province Bujumbura (dite Bujumbura-Rural), les communes Mpanda et Rugazi de la province Bubanza ainsi que les communes Bukeye et Muramvya de la province Muramvya.

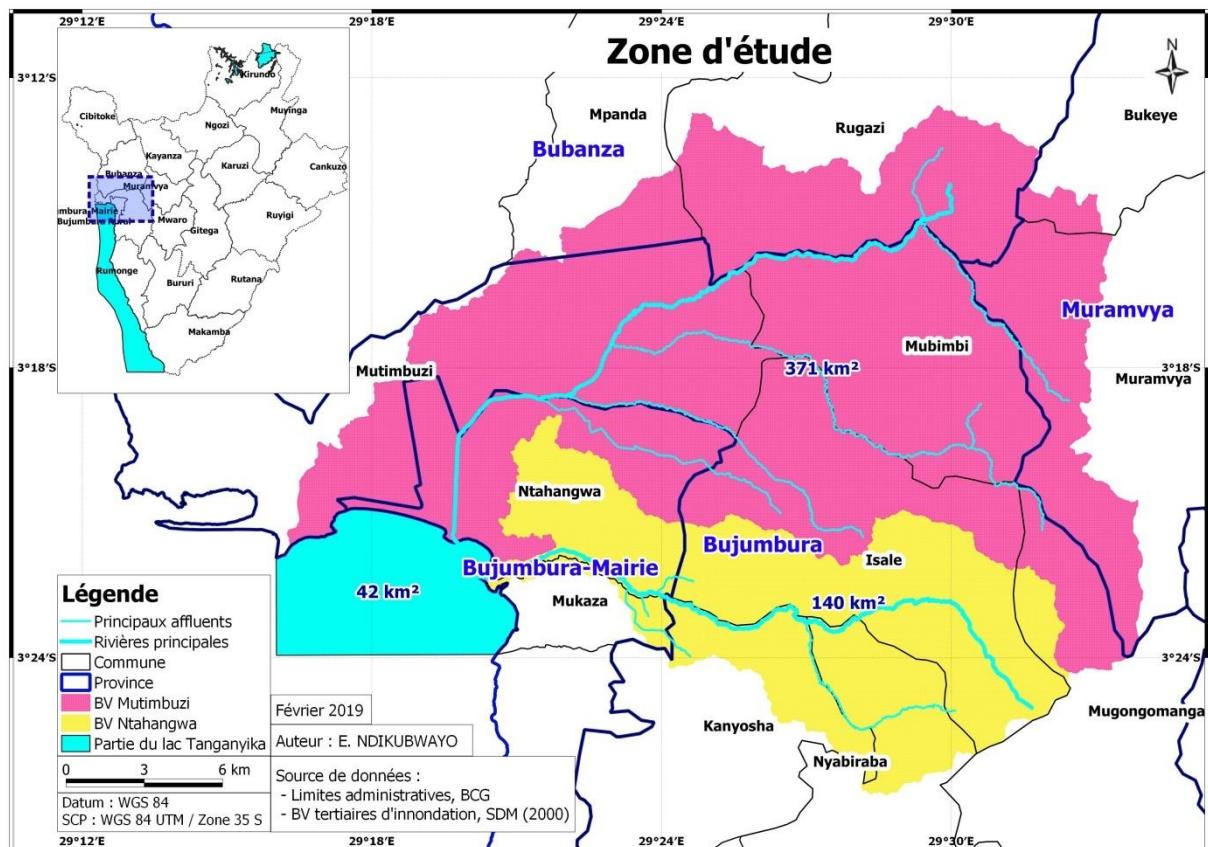


Fig. 2 : Délimitation spatiale de la zone d'étude

La limite ouest de la Mairie de Bujumbura et de la commune Mutimbuzi (Bujumbura, dit rural) est marquée par une rupture de pente. Ci-dessous (figure 3), un aperçu de la zone d'étude sur l'image Google Earth en trois dimensions.

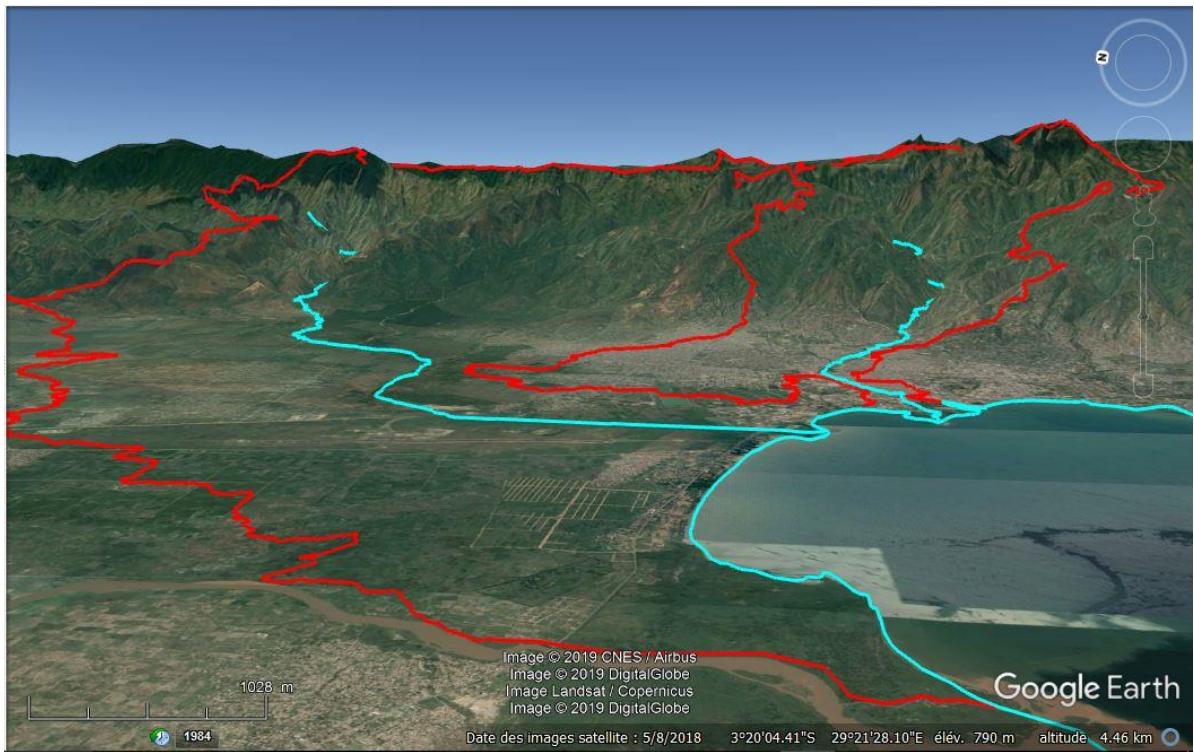


Fig. 3 : Aperçu de la zone d'étude en 3D

Source : Image Google Earth du 5 août 2018 (altitude multipliée par 3 pour un meilleur rendu visuel du relief)

II.3. Démographie

D'après le plus récent recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) d'août 2008, la population totale du Burundi s'élevait à 8 053 574 habitants dont 49,2 % des hommes et 50,8% des femmes. Cette tendance générale masque cependant d'importantes disparités provinciales. Ainsi, pour la Mairie Bujumbura, on observe une augmentation sensible de 3,1 % à 4,2 % (ISTEEBU, 2008). Dans notre zone d'étude, la situation démographique selon le même recensement est présentée sur la figure 4.

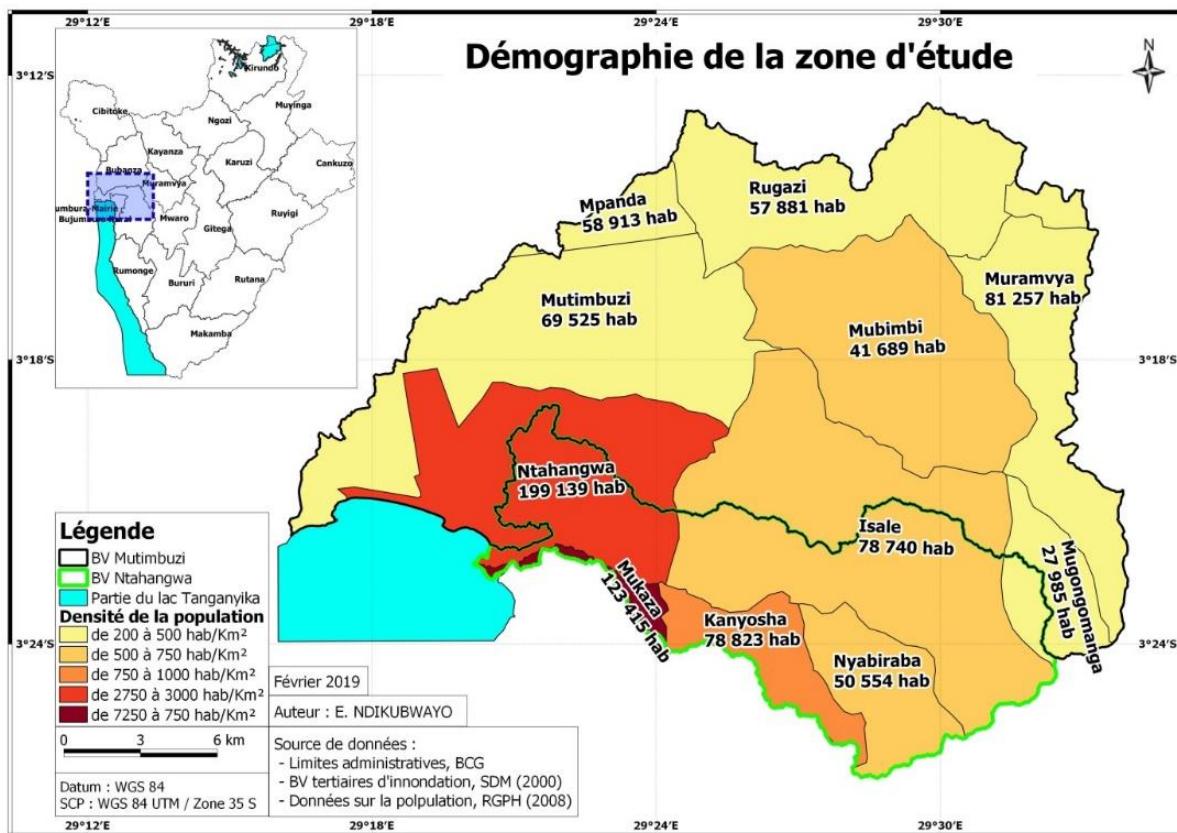


Fig. 4 : Démographie de la zone d'étude (ISTEEBU/RGPH, 2008)

Selon la même source (ISTEEBU, 2008), de 1979 à 2008, le taux d'accroissement annuel moyen de la population est resté presque constant, passant de 2,5 % entre 1979 et 1990 à 2,4 % entre 1990 et 2008. Des résultats du RGPH de 2008, avec un taux d'accroissement annuel moyen de 2,4% (dans l'hypothèse d'un taux toujours constant), la population de notre zone d'étude se verrait doublée en 2038 (figure 5). Il existe plusieurs formules de projection de la population. En fonction des données disponibles, celle de PELLETIER & SPOORENBERG (2016) a été utilisée. Il s'agit d'une formule adaptée à notre zone d'étude car elle est basée sur l'extrapolation des tendances applicable dans l'hypothèse de la population qui change avec le même taux par unité temporelle et un changement s'opérant à intervalles distincts (PELLETIER & SPOORENBERG, 2016). Selon, cette formule, l'accroissement de la population suit une progression géométrique donnée par la formule ci-dessous :

$$P_t = P_0 * (1+q)^n, \text{ avec } P_t \quad : \text{population à l'année } t$$

P_0 : population de 2008 (ISTEEB, 2008/RGPH)

n : $t-2008$

q : 0,024 (2,4% : accroissement annuel moyen, supposé constant).

Avec cette formule, la figure 5 nous montre la projection de la population de notre zone d'étude.

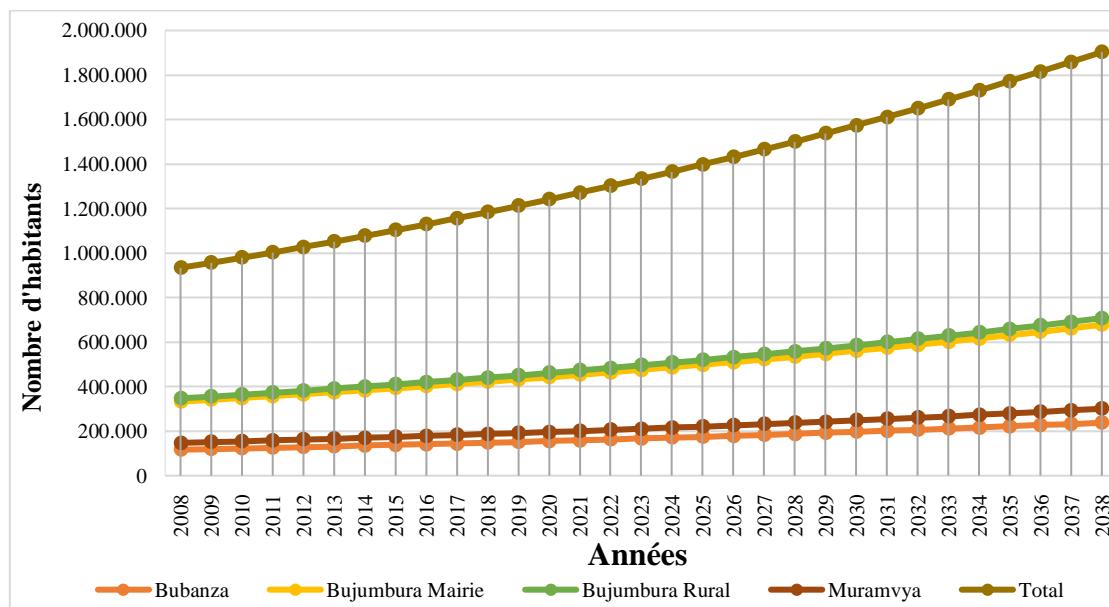


Fig. 5 : Projection de la population de 2008 à 2038 dans les communes de la zone d'étude

II.4. Relief

Les bassins versant délimitant notre zone d'étude s'étendent sur trois zones agroécologiques à reliefs variés (figure 6). Il s'agit de :

- **Basses terres (plaine) de l'Imbo** : la partie se trouvant dans cette zone se situe entre 760 m et 1000 m d'altitude avec une faible pente. Les mêmes altitudes se retrouvent dans la description de la zone par NZIGIDAHERA (2012) avec une pente moyenne pour la plaine de 12 % ;
- **Versant Ouest de la Crête Congo-Nil ou les contreforts des Mirwa** : la partie de notre zone d'étude intersectant les contreforts de Mumirwa a une altitude variant entre 1000 et 2000 m. Le relief de cette zone est très marqué avec des pentes variant de 70 % à plus de 100 % (NZIGIDAHERA, 2012). Ce sont d'abrupts versants très disséqués, allant de la plaine de l'Imbo à la Crête Congo-Nil ;
- **Crête Congo-Nil** : cette zone s'étire du Sud au Nord. Elle prend naissance au pied de la Chaîne des Virunga, au Nord du Rwanda et se poursuit, après le Burundi, en Tanzanie en définissant la ligne de partage des eaux entre les 2 bassins hydrographiques, celui du Congo et celui du Nil. Le relief est très marqué au Nord par des crêtes montagneuses à pentes raides (supérieures à 50 % en moyenne) et au Sud par des hauts plateaux (NZIGIDAHERA, 2012). La partie de notre zone d'étude se trouvant dans la crête se situe entre 2000 et 2500 m d'altitude.

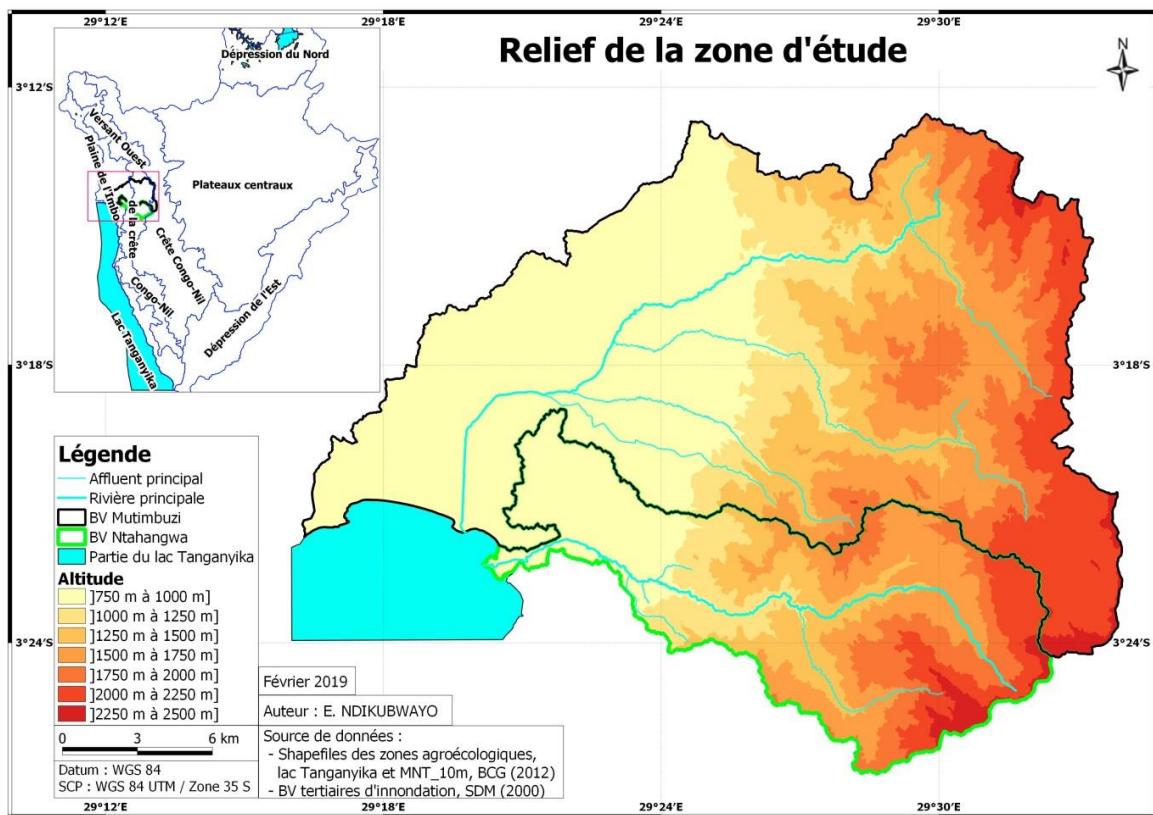


Fig. 6 : Carte relief de la zone d'étude

Ci-dessous la carte des pentes (figure 7) de notre zone d'étude.



Fig. 7 : Carte des pentes de la zone d'étude

II.5. Pédologie

Dans les deux bassins versants tout comme au Burundi en général, les différentes catégories des sols varient suivant la proximité des roches-mères, la pente, l'altitude, les types d'utilisation, le facteur hydrologique et le couvert végétal (NZIGIDAHERA, 2012). Les caractéristiques pédologiques de notre zone d'étude sont ci-dessous décrites et présentées sur la figure 8 :

- **Plaine de l'Imbo** : la partie de notre zone d'étude se trouvant dans la plaine de l'Imbo est dominée par les sols récents établis sur des sédiments lacustres ou des alluvions fluviatiles. Ils varient suivant leur substrat ou leur position géographique. On y trouve les formations sableuses, les sols salins et les vertisols des dépressions mal drainées. Les vertisols sont le résultat des dépôts alluvionnaires. La couleur noire des vertisols (d'où leur nom d'argiles noires tropicales) provient de l'association entre les argiles et la matière organique. Ils ont donc une composition importante de la matière organique. Ce sont des sols qui craquent et se fissurent sous l'effet de la chaleur pendant la saison sèche et qui s'engorgent et gonflent très rapidement en saison pluvieuse. Les sols salins trouvent leur origine dans les milieux montagneux environnants à partir desquels ils reçoivent des éléments insolubles ;
- **Contreforts de Mumirwa** : la partie se trouvant dans les contreforts des Mumirwa est dominée par les ferralsols, les regosols et les ferrisols au niveau des interfluves les mieux protégés de l'érosion. Ce sont des sols relativement fertiles mais facilement érodables compte tenu de la topographie de la région ;
- **Crête Congo-Nil** : la partie amont des bassins-versants de notre zone d'étude se trouve sur la crête. Les sols dominants sont les ferrisols, les kaolisols et les regosols.

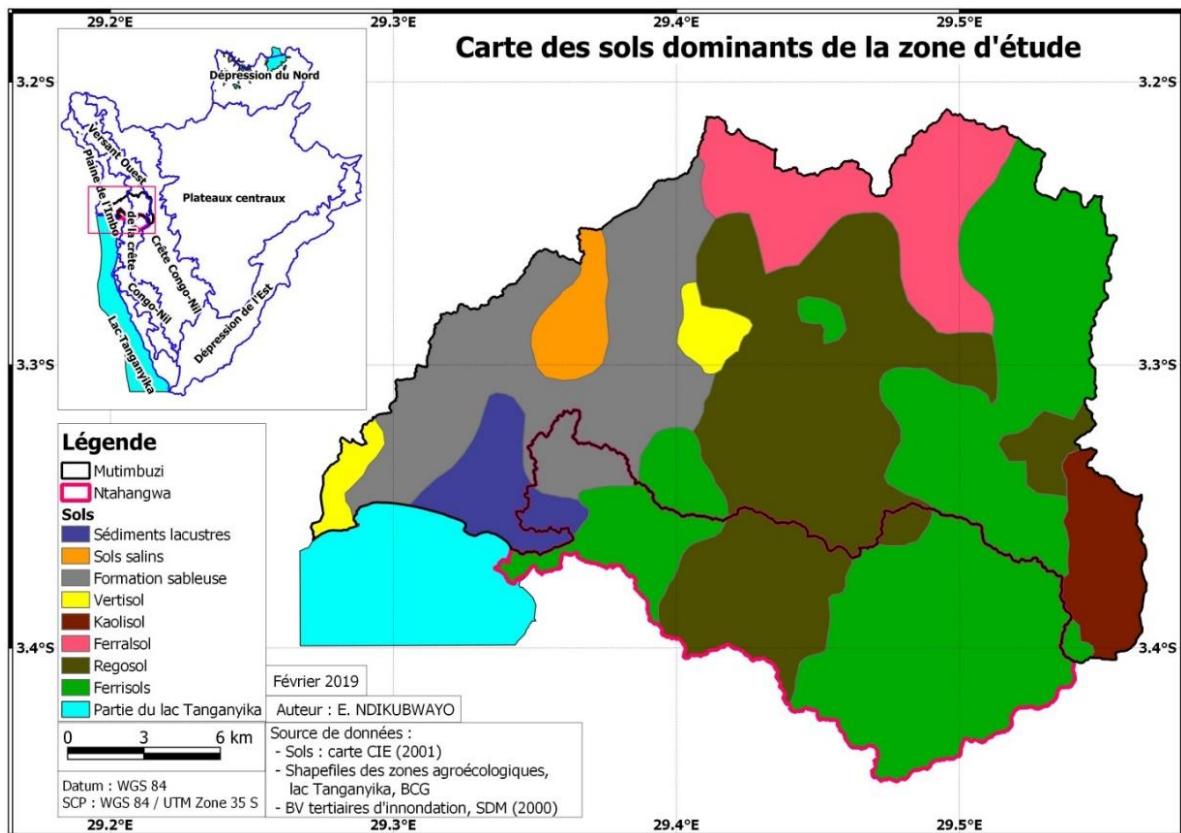


Fig. 8 : Carte des sols dominants de la zone d'étude

Source : CIE, 2001 cité par République du Burundi & Commission Européenne, 2007

II.6. Climat

Notre zone d'étude tout comme le Burundi en général, connaît des variations climatiques conséquentes du dessin topographique du territoire définissant six zones éco-climatiques (NZIGIDAHERA, 2012). La partie faisant objet de notre zone d'étude s'étend sur trois zones agroécologiques ou éco-climatiques avec des caractéristiques climatiques variées (figure 9).

Il s'agit de la plaine de l'Imbo avec des précipitations annuelles moyennes allant de 800 à 1000 mm et des températures moyennes supérieures à 23°C, le Versant Ouest de la Crête Congo-Nil avec 1100 à 1900 mm de précipitations et des températures moyennes variant 18 à 28°C et la Crête Congo Nil avec 1300 à 2000 mm de précipitations et de températures moyennes variant de 14 à 15°C.

Dans la plaine de l'Imbo, on observe des moyennes les plus élevées par rapport aux autres zones agroécologiques (BISORE, 2006).

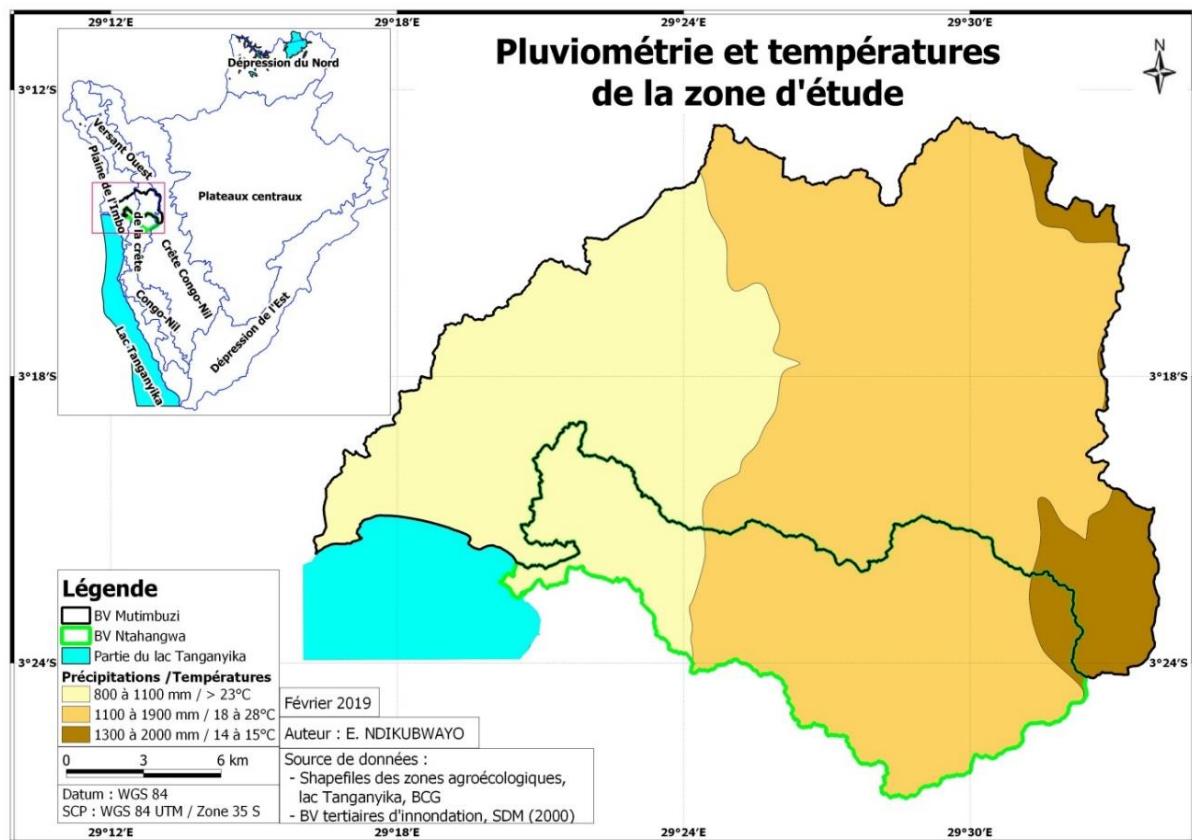


Fig. 9 : Climat de la zone d'étude

Source de données : MINATTE, 2005 cité par NZIGIDAHERA, 2012

Le régime pluviométrique est caractérisé par deux saisons sèches et deux autres pluvieuses (figure 10) dont chaque fois une grande et une petite (MEATTP, 2008) :

- Grande saison sèche : elle s'étend généralement du mois de juin à mi-septembre. Actuellement, suite à des perturbations climatiques caractérisées par une forte avancée de la sécheresse, on assiste à un changement de tendances avec une saison sèche souvent plus longue que prévue ou un arrêt précoce de pluies ;
- Petite saison de pluie (première saison culturelle) : elle s'étend généralement de mi-septembre à mi-janvier ;
- Petite saison sèche : généralement très courte allant de mi-janvier à mi-février. Elle constitue une séquence sèche entre les deux saisons pluvieuses. Elle est moins marquée et peut être assimilée à une diminution des précipitations ;
- La grande saison de pluie (deuxième saison culturelle) de mi-février jusqu'au mois de mai.

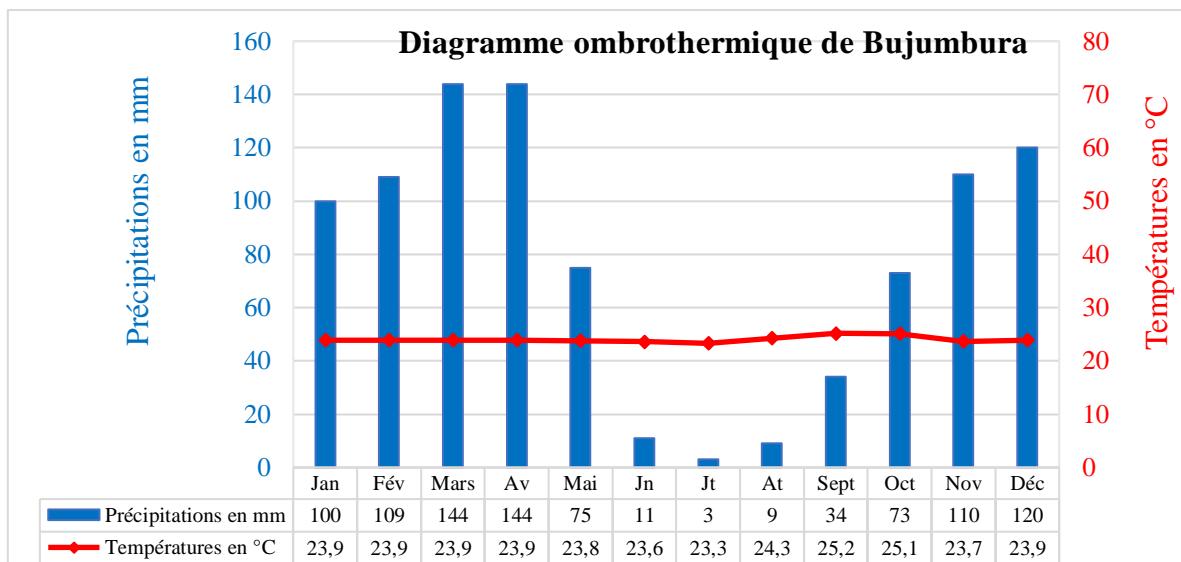


Fig. 10 : Diagramme ombrothermique de Bujumbura

Source : <https://en.climate-data.org/africa/burundi/bujumbura-mairie/bujumbura-1073/>

Durant ces dernières années, il s'observe une forte variabilité des températures et des précipitations comme le montre la figure 11. L'année 2016 correspond à une année particulièrement sèche et chaude, donc El Niño (ISTEEBU, 2017). Elle est caractérisée par de très faibles précipitations avec des températures les plus élevées de la période étudiée.

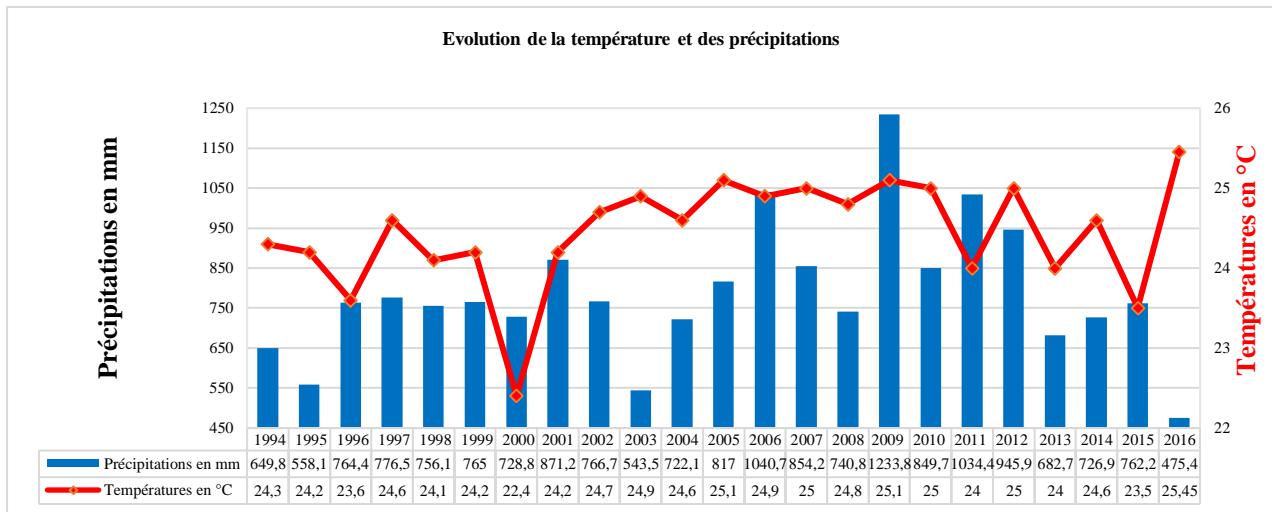


Fig. 11 : Evolution des températures moyennes annuelles et des précipitations (cumuls annuels) de la zone d'étude pour la période 1994-2016

Source de données : IGEBU, cité par (ISTEEBU, 2010) & (ISTEEBU, 2017) – Station météorologique de Bujumbura (aéroport)

II.7. Réseau hydrographique

Les bassins-versants faisant objet de notre étude sont dominés par deux grandes rivières dont une pour chaque bassin-versant. Il s'agit des rivières Mutimbuzi (Muzazi-Mutimbuzi) et Ntahangwa. La rivière Mutimbuzi à trois principaux affluents Murago, Gikoma et Gasenyi. La rivière Ntahangwa quant à elle n'a que Gasarara comme affluent principal.

Ces rivières, de même que leurs affluents se caractérisent par un courant fort pendant les saisons pluvieuses et faible pendant les saisons sèches. Il est à souligner que pour les deux bassins-versants, le réseau tertiaire est très dense, surtout en amont des bassins-versants (figure 12).



Fig. 12: Réseau hydrographique de la zone d'étude

II.8. Espaces à régime de protection par la loi dans la zone d'étude

Notre zone d'étude fait objet de certaines zones à régime de protection particulière par la loi. Il s'agit de l'aéroport de Bujumbura, du lac Tanganyika et sa zone tampon et des rivières traversant la ville ainsi que leurs zones tampons⁵.

La cartographie de ces dernières s'accompagne d'un double biais. Premièrement, le lit mineur est cartographié par un shapefile de type ligne alors dans certains cas, il fait quelques dizaines de mètres et en deuxième lieu, la forte variabilité de la largeur des lits mineur et majeur combinés allant à plusieurs dizaines voire une centaine de mètres (figure 13).

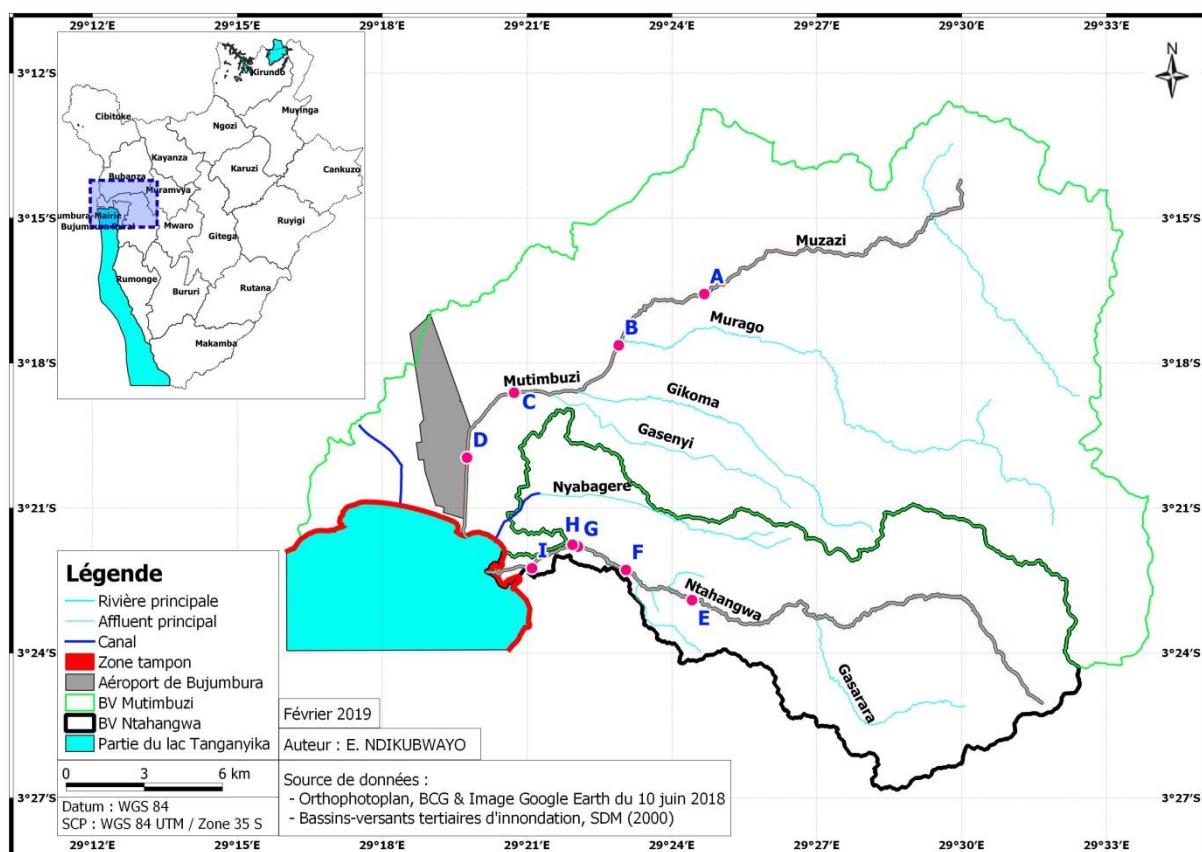
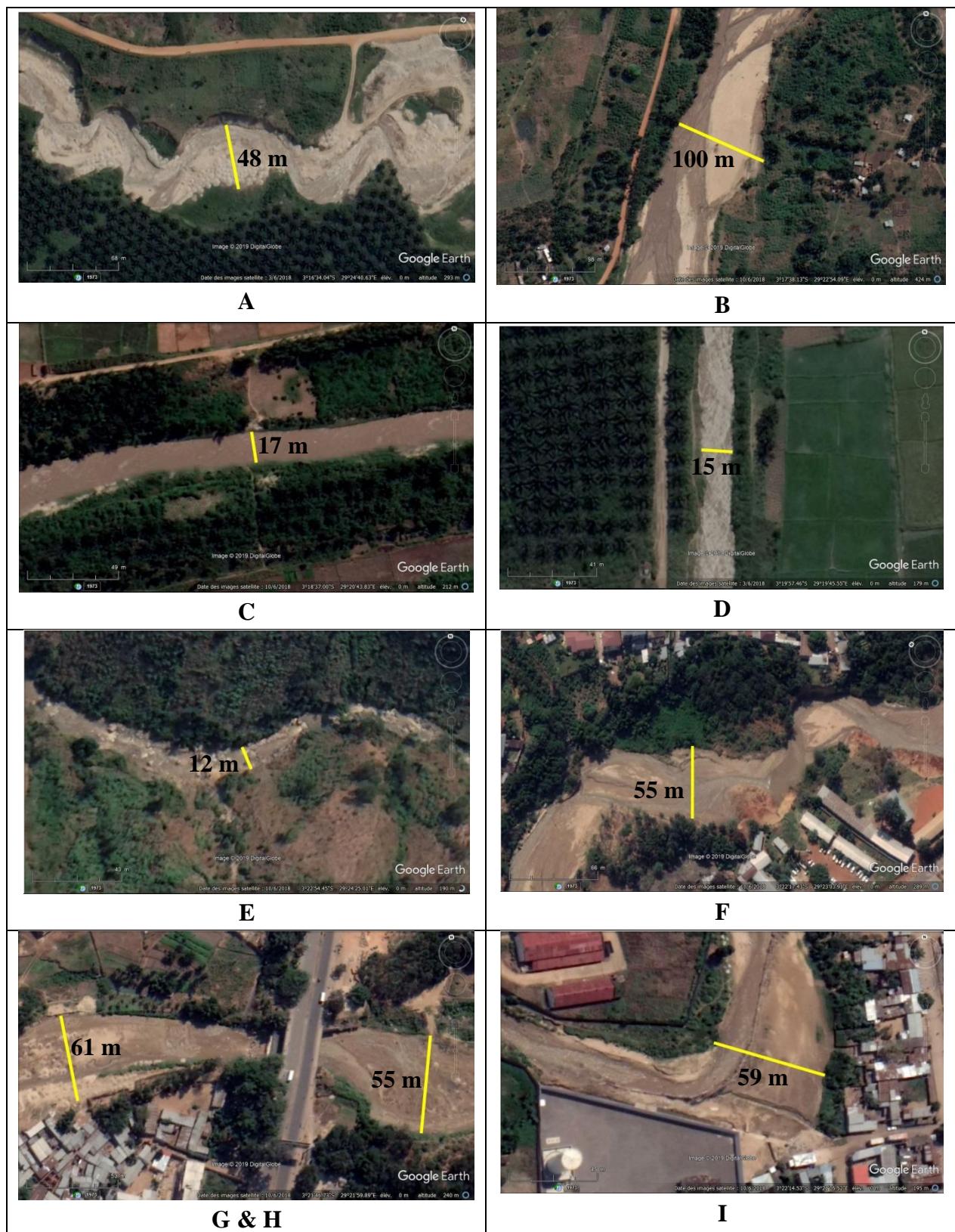


Fig. 13 : Zone à régime de protection particulière par la loi dans notre zone d'étude

⁵ Art. 5, alinéa 1 à 3 du code de l'eau du Burundi du 26 mars 2012

Avec :



Source : Images Google Earth (juin 2018)

II.9. Menaces environnementales et événements catastrophiques

L'environnement urbain et périurbain de la Mairie de Bujumbura fait face à un certain nombre de menaces dues aux actions anthropiques. Ci-dessous (figure 14) quelques illustrations des faits :

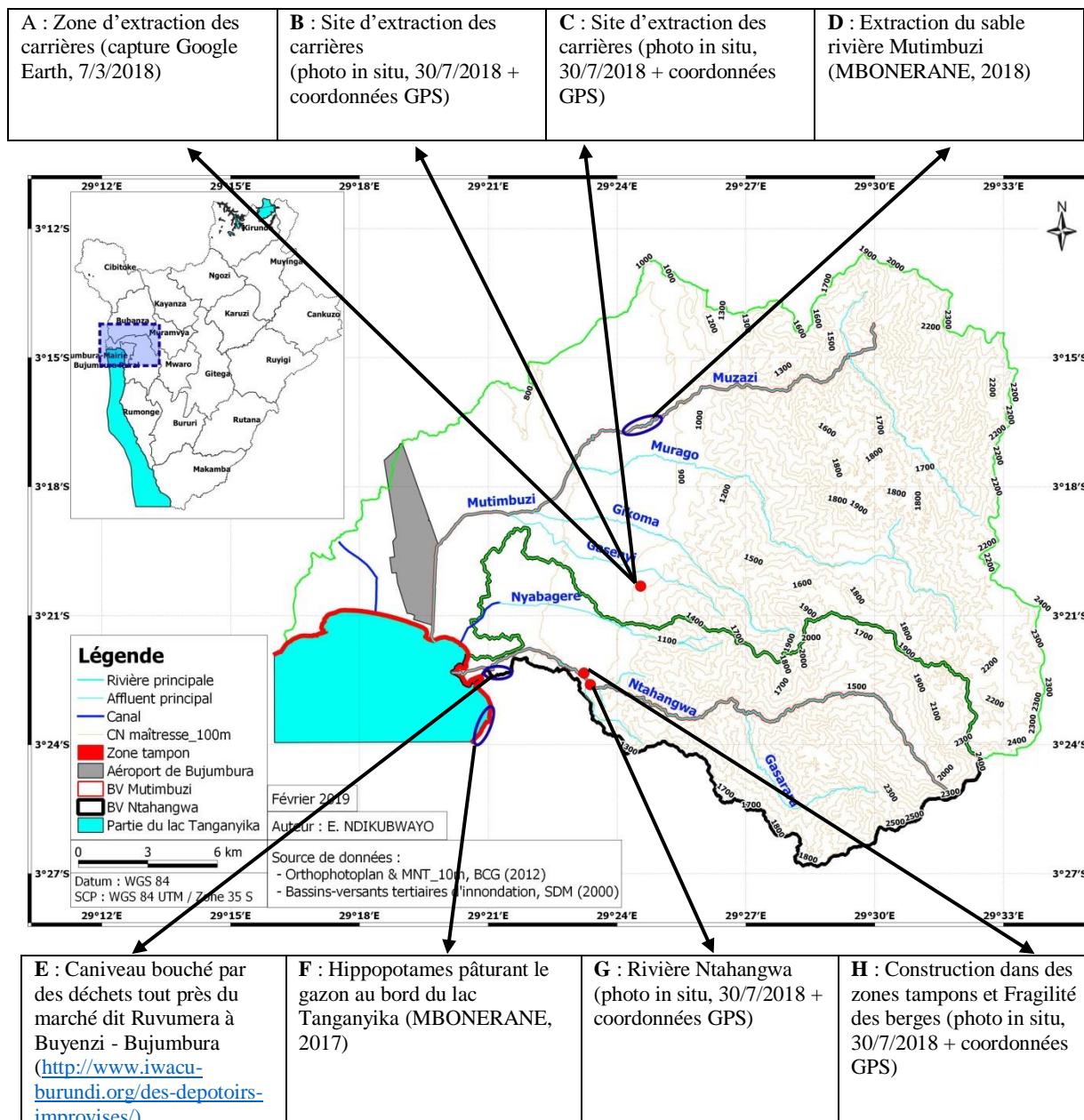


Fig. 14 : Quelques illustrations des menaces sur l'environnement urbain et périurbain de Bujumbura

Avec :



A



B



C



D



E



F



G



H

En plus de ces menaces, des évènements catastrophiques se sont abattus sur la ville de Bujumbura ces dernières années et font penser dans une certaine mesure, à une dégradation de la couverture végétale dans les collines surplombant la Mairie. On peut citer les inondations dans le nord de la Mairie de Bujumbura dont celles de Gatunguru dans la nuit du 9 au 10 février 2014 ayant causé 77 morts (PFNPRGC/Burundi, 2014), celles de Carama le 13 avril 2018 ayant fait 4 morts⁶, celles des 22 et 28 avril 2018 pour ne citer que cela. A côté de ces pertes en vies humaines, d'énormes dégâts matériels s'évaluant à plus de centaines de millions voire de milliards sont à signaler (PFNPRGC/Burundi, 2014). Ci-dessous (figure 15), quelques illustrations.

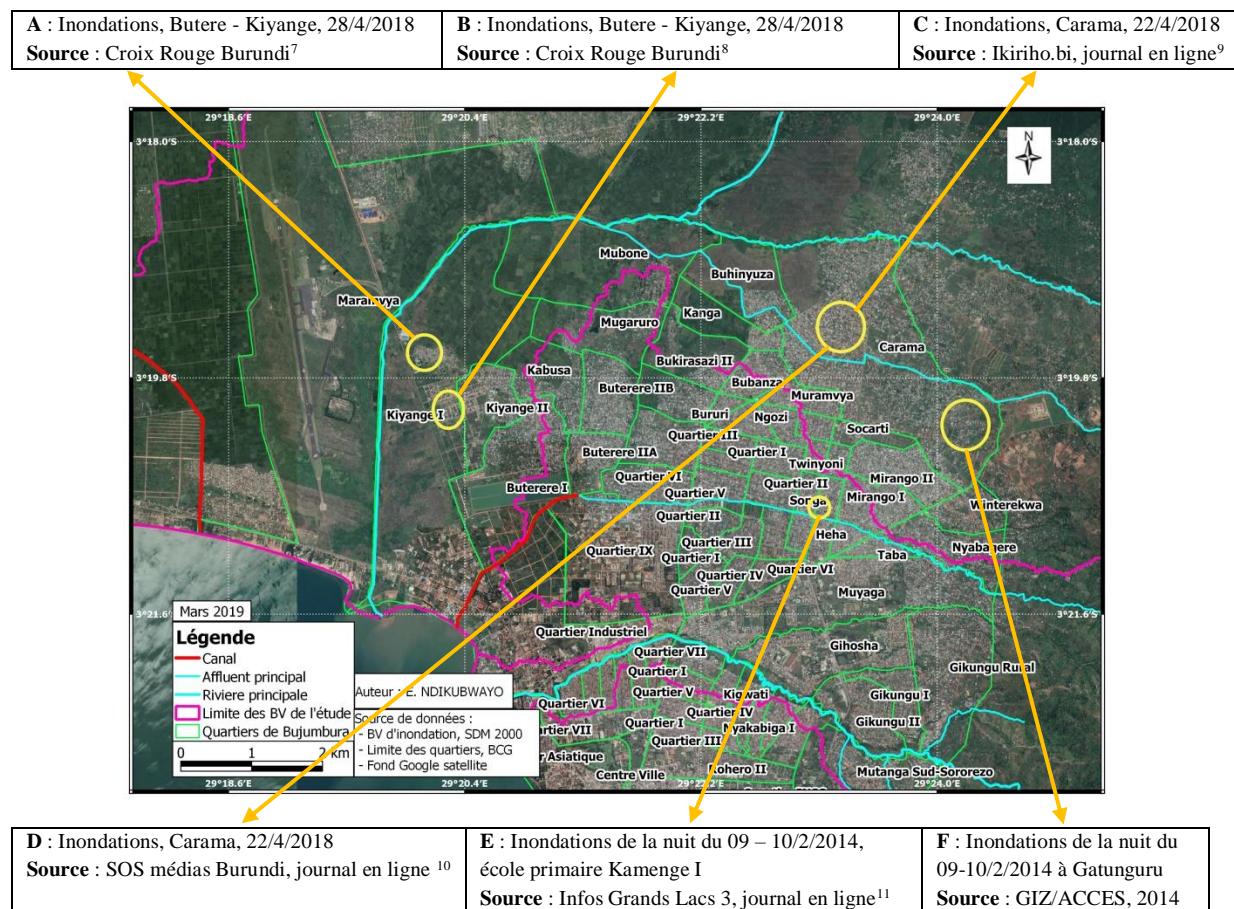


Fig. 15 : Illustration des évènements catastrophiques au nord de Bujumbura Mairie

⁶ http://www.croixrougeburundi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=607:des-inondations-meurtrieres-dans-la-Mairie-de-bujumbura&catid=9&lang=fr&Itemid=141

⁷ <https://www.facebook.com/CroixRougeBurundi/photos/pcb.2059510740725585/2059508637392462/?type=3&theater>

⁸ <https://www.facebook.com/CroixRougeBurundi/photos/pcb.2059703487372977/2059705537372772/?type=3&theater>

⁹ <https://www.facebook.com/Ikiraho.The.Whole.Story/posts/la-police-du-burundi-d%C3%A9nombre-d%C3%A9cembre-%C3%A9tats-unis-maisons-%C3%A9croul%C3%A9es-suites-aux-inondations-/934813436701646/>

¹⁰ <https://www.facebook.com/sosmediasburundi/posts/burundicrisis-lundi-23-avril-2018-bujumbura-nord-des-d%C3%A9cembre-%C3%A9croul%C3%A9es-suites-aux-inondations-/1807810552614309/>

¹¹ <https://www.infosgrandslacs.info/productions/inondation-de-lecole-primaire-kamenge-i>

Avec :



La figure 16 ci-dessous nous montre l'étendue des phénomènes hydrométéorologiques (crue rapide et inondations) observés lors de la catastrophe naturelle de la nuit du 09 au 10 février 2014, la plus meurrière qu'a connue Bujumbura. Sur cette figure (sur fond topographique, IGEBU, 1986), on observe les zones touchées, dont les plus touchées sont particulièrement mises en évidence par une surbrillance jaune.

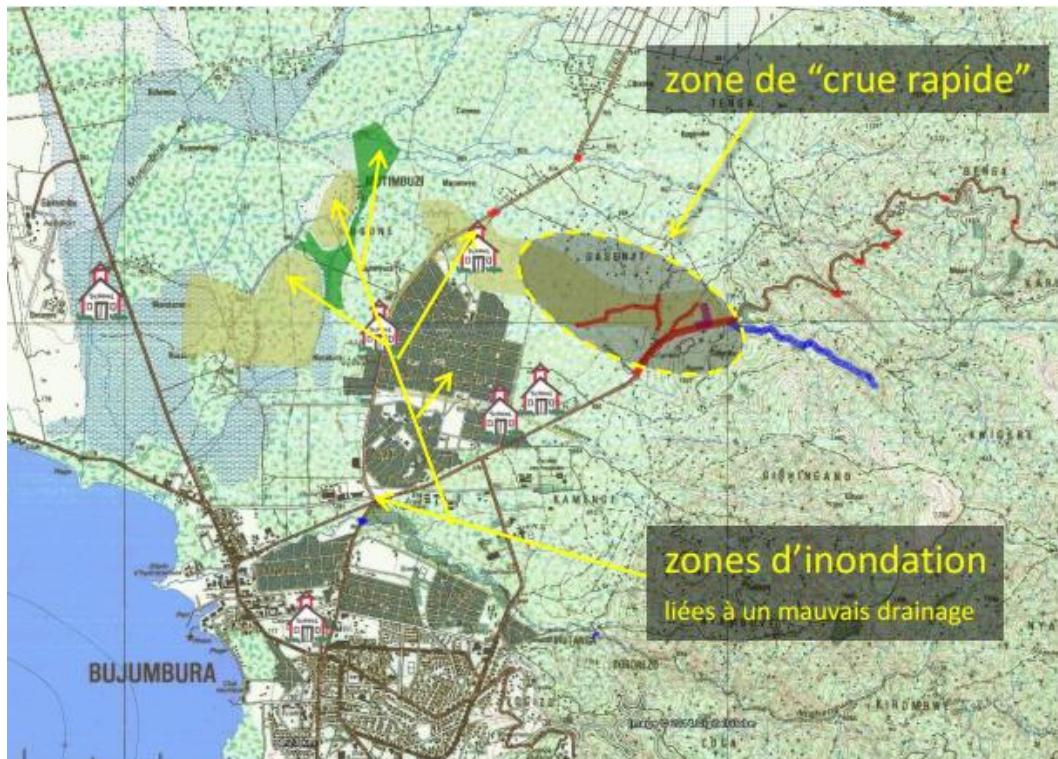


Fig. 16 : Etendue des phénomènes hydrométéorologiques observés lors de la catastrophe de la nuit du 09 au 10 février 2014

Source : PFNPRGC/Burundi, 2014

II.10. Institutionnalisation de la gestion de l'environnement

La gestion de l'environnement fait face à une instabilité institutionnelle. Cela se remarque à travers l'historique du Ministère en charge de l'environnement et du Ministère de l'Agriculture et de l'élevage (MBONERANE, 2018) :

- Décret du 19 octobre 1988 : apparition du mot environnement dans les dénominations des ministères avec la création du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme ;
- Décret n°100/314 du 14 novembre 2007 : Ministère de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et des Travaux Publics ;
- Décret n° 100/02 du 29 aout 2010 : Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme (MEEATU) ;
- Décret du n° 100/038 du 19 avril 2018 : Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage (MINEAGRIE).

CHAPITRE III : METHODOLOGIE

III. 1. Approche méthodologique

Le présent travail consiste à utiliser les technologies SIG et télédétection pour caractériser l'évolution spatio-temporelle de l'environnement de notre zone d'étude. Les logiciels utilisés sont QGIS 3.2 et ENVI 5.0. L'approche méthodologique ci-dessous illustrée (figure 17) comprend deux composantes en fonction des objectifs à atteindre.

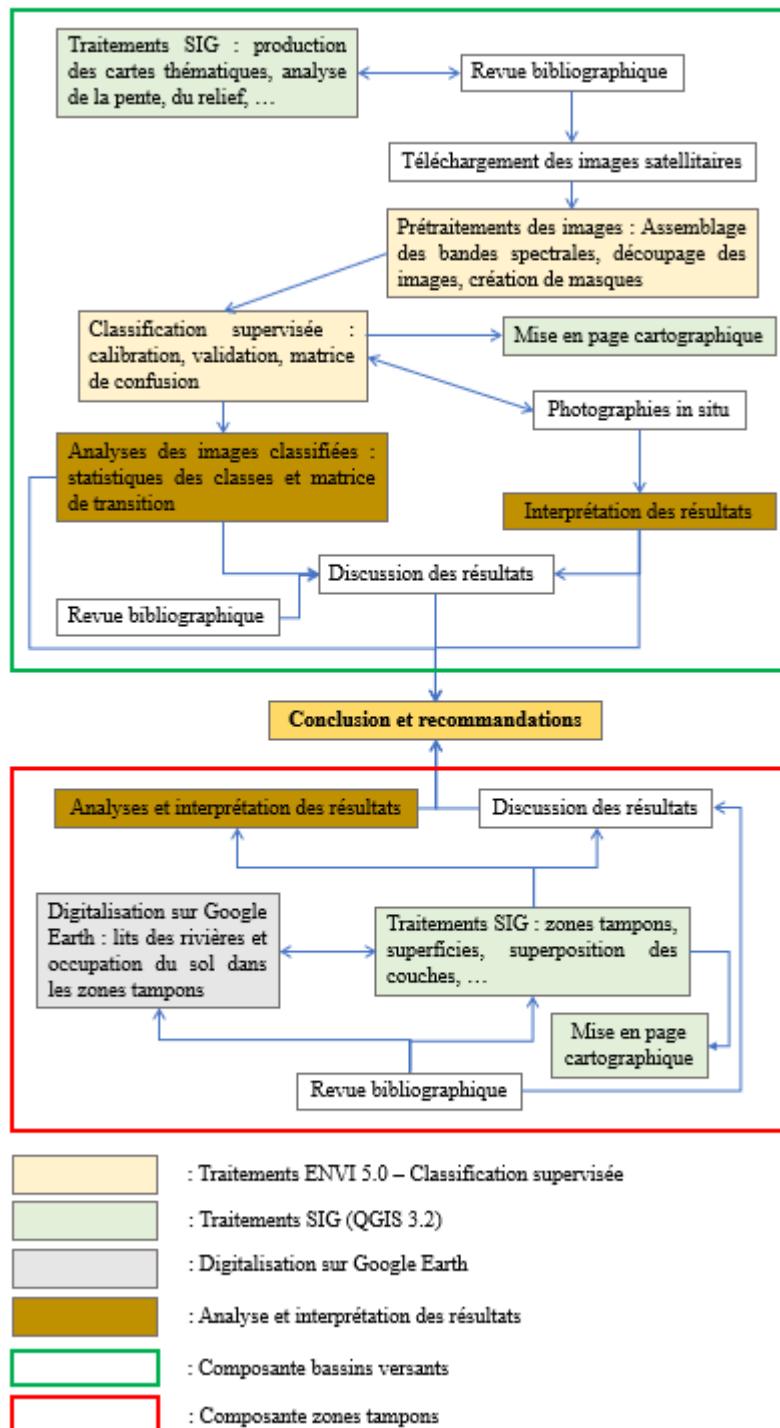


Fig. 17 : Représentation schématique de l'approche méthodologique

III.2. Revue bibliographique

Des recherches documentaires nous ont permis de bien orienter notre étude et de renforcer la connaissance de notre zone d'intérêt. En plus des connaissances acquises lors de notre cursus, des études ayant des similitudes avec notre sujet de travail en Afrique comme ailleurs ont été consultées. De cette documentation, une compréhension des avancées dans les études de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement et l'aménagement du territoire en est ressortie, ce qui nous a guidé dans l'élaboration de notre approche méthodologique et a orienté notre discussion.

III.3. Etude de la dynamique dans les bassins-versants

III.3. 1. Choix des capteurs

Les images satellitaires constituent la matière brute pour notre étude. Le choix des capteurs a été dicté par l'accessibilité aux données et leur qualité. Ainsi, les images utilisées sont gratuites¹². L'image du capteur Landsat 5 TM C1 Level 1 a été utilisée pour l'année 1996 et celle du capteur Landsat 8 OLI/TIRS Level-1 pour l'année 2015 (tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs des images utilisées¹³

Satellites	LANDSAT 5 TM C1 Level 1			LANDSAT 8 OLI-TIRS Level-1			
Caractéristiques des bandes	Bandes spectrale	Résolution spectrale (en µm)	Résolution spatiale (en m)	Bandes spectrale	Résolution spectrale (en µm)	Résolution spatiale (en m)	
	Thematic Mapper (TM)			Bandes spectrales de l'instrument OLI ¹⁴			
	Bande 1 - Bleu	0,45 - 0,52	30	Bande 1 - Aérosols	0,433 - 0,453	30	
	Bande 2 - Vert	0,52 - 0,60		Bande 2 - Bleu	0,450 - 0,515		
	Bande 3 - Rouge	0,63 - 0,69		Bande 3 - Vert	0,525 - 0,600		
	Bande 4 - PIR	0,76 - 0,90		Bande 4 - Rouge	0,630 - 0,680		
	Bande 5 - MIR 1	1,55 - 1,75		Bande 5 - PIR	0,845 - 0,885		
	Bande 6 - IRT	10,4 - 12,5	120	Bande 6 - MIR 1	1,560 - 1,660	15	
	Bande 7 - MIR 2	2,08 - 2,35	30	Bande 7 - MIR 2	2,100 - 2,300		
	-	-	-	Bande 8 - Pan	0,500 - 0,680		
	-	-	-	Bande 9 - Cirrus	1,360 - 1,390		
	-	-	-	Bandes spectrales de l'instrument TIRS ¹⁵			
	-	-	-	Bande 10 - IRM	10,30 - 11,30	100	
	-	-	-	Bande 11 - IRM	11,50 - 12,50		
Fauchée	170 x 185 km			170 km x 185 km			
Résolution radiométrique	8 bits			12 bits			
Cycle orbital	16 jours			16 jours			
Format des images	GEOTIFF			GEOTIFF			

¹² Accessibles gratuitement au sites <https://earthexplorer.usgs.gov/>

¹³ <http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/teled2/memotele/mem33tel.htm>

¹⁴ Operational Land Imager

¹⁵ Thermal Infrared Sensor

III.3.2. Choix des images

Pour l'étude de la dynamique dans les bassins versants et l'extension du bâti, les images des capteurs LANDSAT 5 TM (image de 1996) et LANDSAT 8 OLI-TIRS (image 2015) ont fait objet de nos traitements (tableau 2). Leur choix constitue une étape clef du présent travail et a été guidé par certains critères :

- Etant donné la corrélation positive entre les variables climatiques et la couverture végétale, les images choisies sont celles des années ayant les conditions climatiques les plus similaires possibles, donc 1996 et 2015 ;
- De même, compte tenu des variations paysagères intra annuelles éventuelles, les images ont été choisies pendant la période de la grande saison sèche après la récolte des cultures saisonnières collinaires et pour les dates les plus proches possibles.

Tableau 2 : Images téléchargées et traitées

Date	Capteur	Couverture nuageuse (zone d'étude)
30/07/1996	LANDSAT 5 TM	0 %
19/07/2015	LANDSAT 8 OLI-TIRS	0 %

III.3.3. Prétraitement des images

Les images satellitaires téléchargées nécessitent un certain nombre d'opérations de prétraitement. Il s'agit d'une étape indispensable dans le processus de traitement des images satellitaires qui oriente l'ensemble du cheminement méthodologique. Les prétraitements d'images ou analyses préliminaires sont un ensemble d'opérations qui ont pour but d'augmenter la lisibilité des données pour faciliter leur interprétation.

Lorsqu'ils sont bien menés, ils contribuent à une meilleure extraction de l'information utile (TABOPDA, 2010). Ainsi, dans le cas présent, les prétraitements faits sont les suivants :

- Assemblage des bandes spectrales : avant de faire d'autres traitements, il faut combiner les différentes bandes spectrales en une seule image composée de plusieurs bandes (image multispectrale) pour rendre la manipulation plus facile afin que les traitements se fassent simultanément sur l'ensemble des bandes regroupées (DENIS, 2016). Le logiciel de télédétection ENVI 5.0 a été utilisé et la combinaison a été faite par l'outil **Layer Stacking** ;

- Le découpage des images : les images satellitaires téléchargées couvrent de grandes superficies qui ne sont pas nécessaires pour notre travail. Le découpage nous a permis de réduire la taille des images pour ne garder que la zone d'intérêt. Cela a pour corollaire la facilitation et l'accélération des opérations lors du lancement des algorithmes ;
- La création de masques afin de se débarrasser des pixels inutiles par rapport à notre zone d'étude : les images résultant du découpage ont des zones hors domaine d'étude. Pour cela, un masque a été réalisé pour ne visualiser que la partie des images correspondant à notre zone d'étude. La couche de masquage est le shapefile («.*shp ») de la zone d'étude converti en «. *evf ». L'opération se fait dans ENVI par l'outil **Basic Tools => Masking => Build Mask.**

III.3.4. Photo-interprétations

Après composition et le découpage des images satellitaires, elles font objet de photo-interprétation. Il s'agit d'une étape importante dans la classification car d'elle, il ressort les classes à définir pour la classification. Pour bien faire la photo-interprétation, une amélioration des contrastes a été réalisée.

Elle consiste en une transformation virtuelle des données afin d'utiliser toute la gamme d'intensité de couleur disponible pour visualiser les données à l'écran. Cette amélioration ne modifie pas les données sources. Elle ne fait qu'attribuer différemment la palette de couleur disponible à l'image afin de faire ressortir certains éléments plus clairement. L'amélioration des contrastes proposée par ENVI par défaut (« Enhance » dans la barre de menu du viewer) est de type linéaire et s'est basée sur la fenêtre « Scroll » reprenant l'ensemble de l'image (DENIS, 2016).

III.3.5. Traitement des images

Les images prétraitées ont été soumises à la classification supervisée par maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood). Les étapes sont reprises ci-dessous :

III.3.5.1. La réalisation de la classification supervisée

Réaliser une classification supervisée d'une image satellite sous-entend une très bonne connaissance de l'occupation réelle du sol de la zone de l'image à l'époque où elle a été prise (DENIS, 2016).

Ainsi, la connaissance du milieu, complémentée par les résultats du prétraitement, nous a permis de réaliser la classification supervisée en classes thématiques identifiées pour notre zone d'étude. Cette étape nécessite trois étapes importantes :

i. Définition des classes spectrales

Pour notre travail, sept classes spectrales, correspondant à des signatures spectrales différentes (tableau 3) ont été identifiées. Elles correspondent à sept classes thématiques à savoir *l'eau pâle*, *l'eau turbide*, *le bâti*, *le sol nu*, les *zones de couverture végétale faible* (CV faible), les *zones de couverture végétale moyenne* (CV moyenne) et les *zones de couverture végétale dense* (CV dense). Ces classes ont été identifiées à partir des connaissances du terrain de la zone d'étude, de la technique de photo-interprétation (également avec l'amélioration de contraste) et de l'interprétation des compositions colorées. L'algorithme de classification pourra ainsi traiter chaque signature spectrale de manière indépendante (DENIS, 2016).

Tableau 3 : Classes thématiques identifiées sur les images

N°	Classes	Description	Composition colorée MIR 1, PIR, R : Image du 19/07/2015	Google Earth : Image du 03/11/2015
1	Eau turbide	Eau trouble, qui contient des matières en suspension et des particules colloïdales		
2	Eau pâle	Eau claire, non chargée ; donc incolore		
3	Bâti	Qui est construit = espace construit (bâtiments + routes)		
4	Sol nu	Terrain non couvert par la végétation ni construit		
5	CV faible	Zone de formation végétale ouverte		
6	CV Moyenne	Zone de formation végétale semi fermée		
7	CV dense	Zone de formation végétale fermée		

ii. Sélection des aires d'entraînement ou Region Of Interest (ROI) pour la classification

Il s'agit de sélectionner un minimum de 30 « pixels purs » spectralement représentatifs de chaque classe thématique identifiée précédemment. Ces échantillons ou « aires d'entraînement » servent à la « calibration » de la classification (tableau 4). Elles sont définies à l'écran par la numérisation d'un ou plusieurs polygones représentatifs de chaque classe spectrale (DENIS, 2016).

Tableau 4 : ROI de calibration

Classe ^o	Image de 1996		Image de 2015	
	Nombre de polygones	Nombre de pixel	Nombre de polygones	Nombre de pixel
Eau turbide	8	42	12	96
Eau pâle	9	117	6	70
Bâti	6	73	5	47
Sol nu	5	30	15	34
CV faible	11	138	10	142
CV Moyenne	3	89	9	92
CV dense	4	50	5	94
TOTAL	46	539	62	575

iii. Mise en œuvre de la classification

L'algorithme de classification selon le maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood) a été utilisé. Il s'applique à tous les pixels de l'image sur base des paramètres statistiques décrivant chaque signature spectrale obtenue. La comparaison entre les valeurs de chaque pixel et les signatures spectrales des différentes classes déterminera la probabilité d'appartenance du pixel à chacune des classes. La classe présentant le maximum de probabilité sera attribuée au pixel considéré (DENIS, 2016).

III.3.5.2. Validation de la classification supervisée

Pour évaluer la fiabilité d'une classification, de nombreuses méthodes basées sur les résultats statistiques de la classification sont proposées (LAFLEUR, 2015). Il s'agit principalement de la matrice de confusion, l'indice de séparabilité des classes ou de la visite de terrain. Pour le cas présent, nous avons utilisé la validation par la matrice de confusion. C'est une méthode basée sur la définition des ROI de validation. De même que la définition des ROI de « calibration », les ROI de validation (tableau 5) sont dessinés manuellement suivant la même procédure. La définition de ces aires qui servent à la validation d'une classification supervisée a été faite de manière aléatoire afin de ne pas tronquer la validation.

Le choix, quoiqu'aléatoire, se fait dans des zones où l'utilisateur est sûr de lui-même de la correspondance à la classe à valider (DENIS, 2016)..

Tableau 5 : ROI de validation de la classification

Classe ^o	Image de 1996		Image de 2015	
	Nombre de polygones	Nombre de pixel	Nombre de polygones	Nombre de pixel
Eau turbide	3	38	1	34
Eau pâle	1	72	1	36
Bâti	2	54	3	42
Sol nu	3	34	13	32
CV faible	2	40	2	50
CV Moyenne	2	42	3	30
CV dense	2	40	2	42
TOTAL	15	320	25	266

De la matrice de confusion, il ressort des informations permettant d'apprécier la qualité de la classification faite.

Précision globale : Elle correspond au nombre de pixels correctement classifiés divisé par le nombre total de pixels de vérification. Une classification est fiable et exploitable si et seulement si la précision globale est supérieure à 80% (LAFLEUR, 2015).

Indice de Kappa : indice statistique utilisé pour valider les résultats de la classification. Il est calculé à partir des informations d'une matrice de confusion dont les lignes correspondent aux données d'observations et les colonnes aux données de la classification. C'est donc un estimateur de qualité qui tient compte des erreurs en lignes et en colonnes¹⁶.

Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Un Kappa de 0,75 par exemple, signifie que 75% de la classification ne sont pas dus au hasard. Plus la valeur du coefficient Kappa est proche de 1, plus le résultat est meilleur (tableau 6).

¹⁶https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/TELEDETECTION/document/cours_teledetection/coefficients_kappa.htm

Tableau 6 : Degré d'accord et valeur du coefficient de Kappa

Accord	Valeurs de l'indice Kappa
Excellent	$\geq 0,81$
Bon	0,80 - 0,61
Modéré	0,6 - 0,41
Médiocre	0,40 - 0,21
Mauvais	0,20 - 0,0
Très mauvais	< 0,0

Source : EMRM, 2005 cité par LAFLEUR, 2015

Les résultats de traitement ont été enfin exportés vers le logiciel du SIG (QGIS 3.2 pour le cas présent) pour la mise en pages des cartes.

III.3.6. Analyses des résultats de la classification

Les résultats de la classification des images des différentes périodes ont été analysés. Ces analyses ont porté sur les statistiques des classes thématiques et les variations dans le temps et dans l'espace au sein des différentes classes définies, ce qui nous a permis de mettre en évidence l'évolution de façon chiffrée. Ainsi, des images classifiées, deux opérations ont été faites :

- Calcul des statistiques des classes thématiques : cette opération nous a permis d'avoir les superficies et/ou le pourcentage d'occupation par classe thématique pour chaque période considérée. L'outil **Post Classification => Class Statistics** de ENVI 5.0 a été utilisé ;
- Matrice de transition : c'est une méthode permettant de décrire 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). 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 du 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).

L'outil **Post Classification => Change Detection Statistics** de ENVI 5.0 a été utilisé pour mettre en évidence les changements interclasses thématiques identifiés pendant la période considérée pour notre étude. Le contenu de la matrice de confusion nous a permis de mener une réflexion afin de donner une interprétation à nos résultats de classification.

III.3.7. Contraintes

La contrainte majeure pour cette partie du travail est la disponibilité des images satellitaires. En effet, l'image la plus récente devrait être celle de 2018. Toutefois, pour les années 2017 et 2018, il n'y a pas d'images satellitaires de bonne qualité et les images de 2016 s'accompagneraient d'un biais pour l'étude étant donné qu'il s'agit d'une année particulièrement sèche et chaude. C'est ainsi que l'image de 2015 a été utilisée pour décrire la situation environnementale la plus récente.

III.4. Etude de la dynamique dans les zones tampons

III.4.1. Traitements

Les images satellitaires Landsat de 30 m de résolution spatiale ne sont pas adaptées à l'étude de l'évolution spatio-temporelle dans les zones tampons de notre zone d'étude compte tenu de la finesse de leurs largeurs (25 m pour les rivières et 150 m pour le lac Tanganyika). Ainsi, pour ces dernières, les images Google Earth, très haute résolution (31 à 60 cm¹⁷) ont été utilisées. Il s'agit de celles du 24 juin 2002, du 09 avril 2012 et du 5 août 2018.

L'approche opérationnelle adoptée consiste à :

- Digitaliser, sur Google Earth, les niveaux les plus élevés qu'atteignent les eaux dans leurs crues périodiques (lits majeurs) des deux principales rivières (Ntahangwa et Mutimbuzi) pour les trois périodes les années 2002, 2012 et 2018, en format Keyhole Markup Language [KML] (*.kml*.KML) KML de type polygone ;
- Convertir ces fichiers KML en shapefiles dans QGIS et créer dans QGIS,
 - o des zones tampons de 25 m autour des polygones des lits majeurs des rivières des années 2002 et 2012 ;
 - o des zones tampons de 150 m autour de la rive de la partie du lac Tanganyika en aval des bassins versant prospectées pour 2002 et 2012 ;
- Convertir les shapefiles des zones tampons créés au format (*.kml*.KML) ;

¹⁷ <https://fr.wikipedia.org/wiki/DigitalGlobe>

- Mettre en évidence l'occupation du sol (zones anthropisées - « ZA ») de 2002 et 2018 dans les zones tampons des lits majeurs des rivières et de la rive du lac de 2002 par digitalisation dans Google Earth (fichier [KML]) ;
- Mettre en évidence l'occupation du sol (zones anthropisées) de 2012 et 2018 dans les zones tampons des lits majeurs des rivières et de la rive du lac de 2012 par digitalisation dans Google Earth (fichier [KML]) ;
- Charger, dans QGIS, les fichiers (*.kml*.KML) résultant de la digitalisation de l'occupation du sol dans les zones tampons et les convertir en shapefiles ;
- Calculer les superficies du lit majeur pour les périodes de 2002, 2012 et 2018 et faire une analyse comparative ;
- Analyser visuellement et quantitativement l'évolution de l'occupation du sol dans les zones tampons des lits majeurs des rivières et de la rive du lac de 2002 et 2012 susmentionnées par superposition des couches shapefiles et des calculs de surfaces des classes d'occupation du sol respectivement. Il s'agit d'une suite de manipulations à faire dans QGIS qui permet de ressortir les variations spatiales de la largeur des lits des rivières et la dynamique dans l'occupation territoriale dans les zones tampons.

La zone ayant fait objet de la présente analyse est celle située en aval de la ligne marquant la rupture de pente (frontière ouest de la Mairie de Bujumbura et de la commune Mutimbuzi), soit la partie se trouvant dans la plaine de l'Imbo (figure 18). Etant donné la finesse de la largeur des zones tampons, il est à souligner que les résultats de cette partie de l'étude sont présentés sous forme d'un atlas, de l'aval vers l'amont.

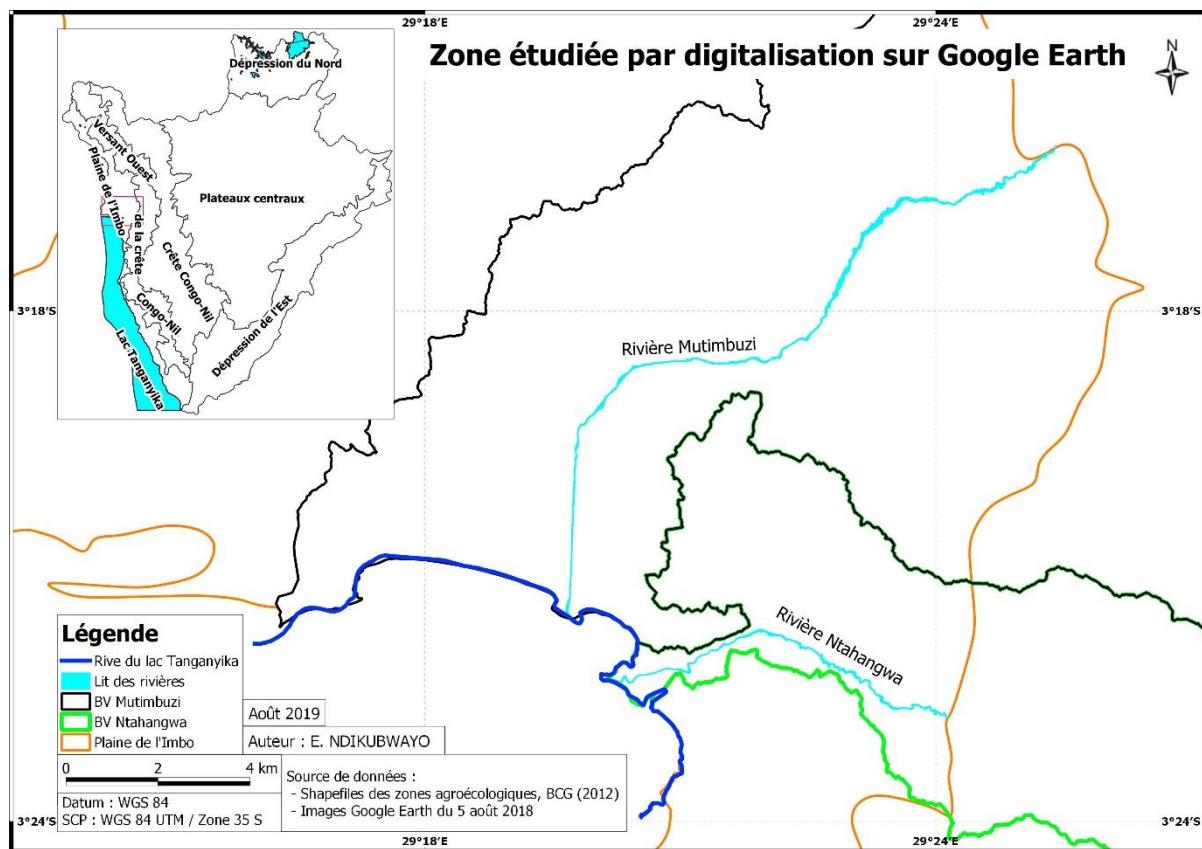


Fig. 18 : Tronçons des rivières et de la rive du lac Tanganyika étudiés par digitalisation sur Google Earth

III.4.2. Contraintes

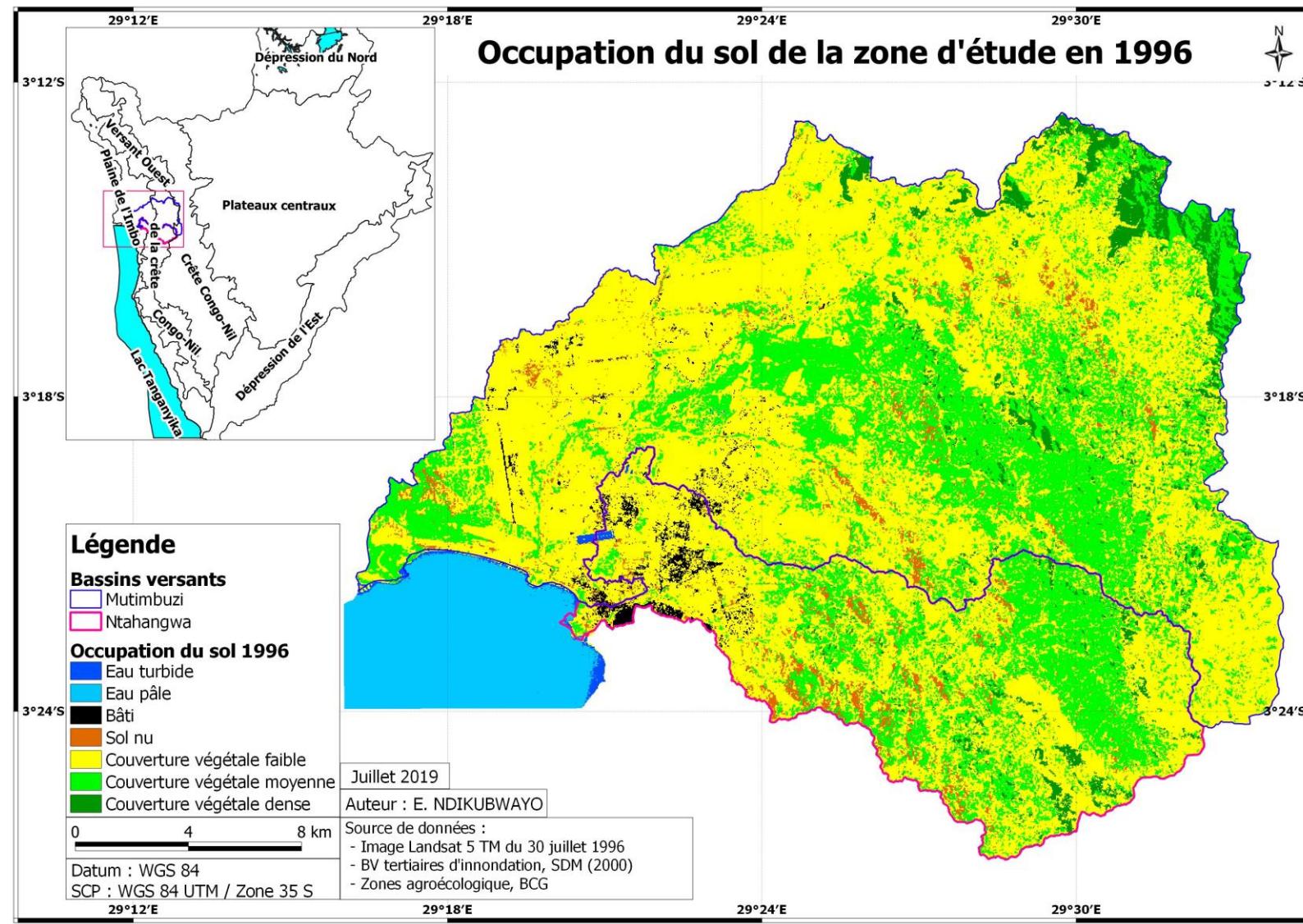
Les images Google Earth d'avant 2002 sont floues et n'offrent aucune opportunité d'exploitation dans le cadre du présent travail. Ainsi, l'image de 2002 a été considérée comme référence pour la mise en évidence de la dynamique dans les zones tampons.

CHAPITRE IV. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1. Dynamique dans les bassins-versants

IV.1.1. Cartographie d'occupation du sol

L'évolution de l'occupation du sol dans les bassins-versants de notre zone d'étude a été mise en évidence par la classification supervisée. Cette dernière nous a permis de montrer la dynamique dans l'occupation pour les classes définies. Les figures 19 a & b sont les résultats de classification des images Landsat respectivement pour les années 1996 et 2015.



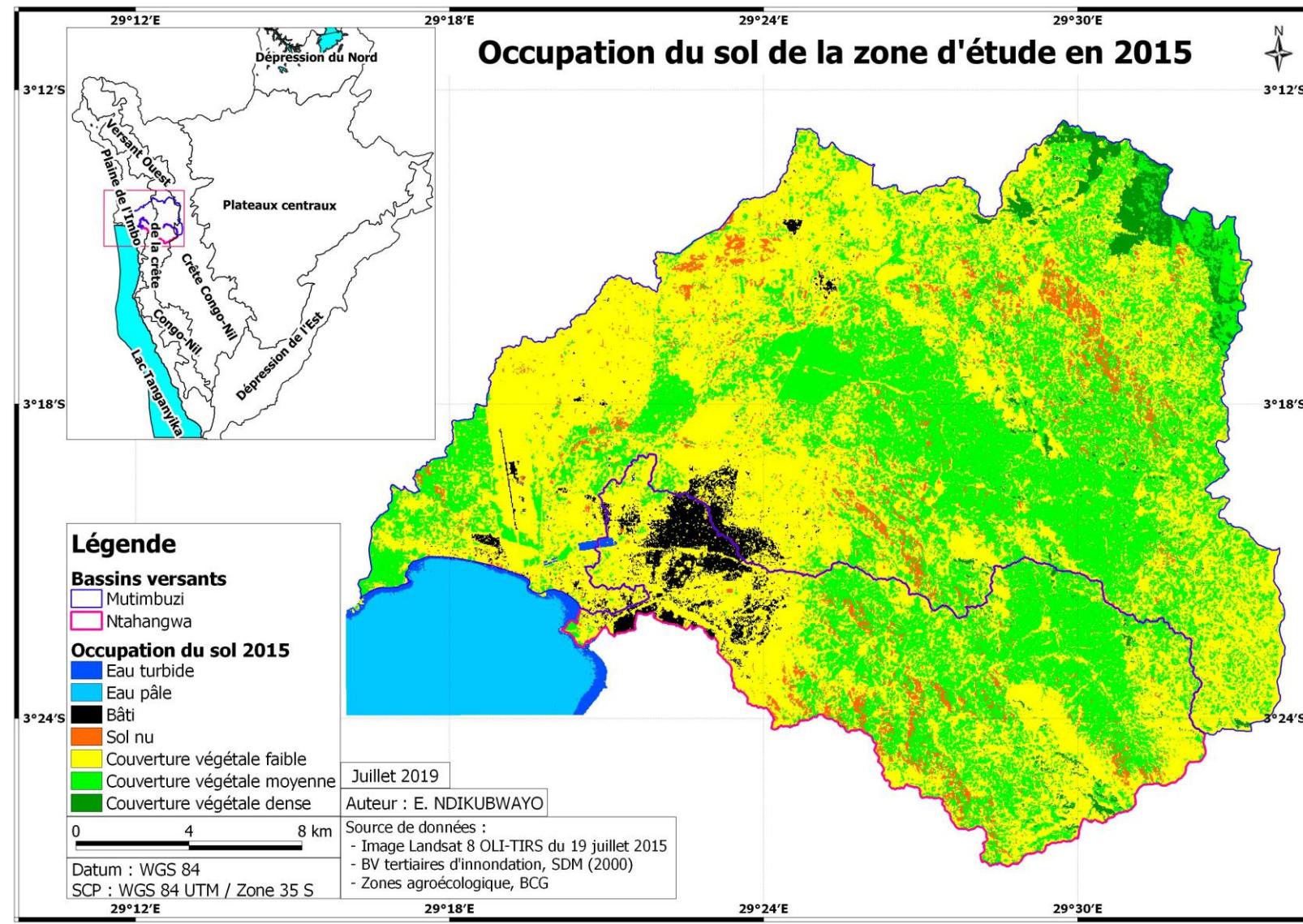


Fig. 19 (a&b) : Classes d'occupation du sol par classification supervisée des images Landsat TM 5 de 1996 et OLI TIRS de 2015

La classification a été effectuée avec une excellente précision (précision globale = 99,6875% & coefficient Kappa = 0,9963 pour l'image de 1996 et précision globale = 98,4962% & coefficient Kappa = 0,9824 pour l'image de 2015) comme le montrent les détails dans les matrices de confusion ci-dessous produites à l'aide des pixels des ROI de validation (tableaux 7 et 8).

Tableau 7 : Matrice de confusion pour l'images de 1996

		Zone de validation									
		Eau pâle	Eau turbide	Bâti	Sol nu	CV faible	CV Moyenne	CV dense	Total	Erreur de commission	Précision d'utilisation
Classification	Eau pâle	72	0	0	0	0	0	0	72	0/72 (0%)	72/72 (100%)
	Eau turbide	0	37	0	0	0	0	0	37	0/37 (0%)	37/37 (100%)
	Bâti	0	0	54	0	0	0	0	54	0/54 (0%)	54/54 (100%)
	Sol nu	0	0	0	34	0	0	0	34	0/34 (0%)	34/34 (100%)
	CV faible	0	1	0	0	40	0	0	41	1/41 (2,44%)	40/41 (97,56%)
	CV moyenne	0	0	0	0	0	42	0	42	0/42 (0%)	42/42 (100%)
	CV dense	0	0	0	0	0	0	40	40	0/40 (0%)	40/40 (100%)
	Total	72	38	54	34	40	42	40	320		
	Erreur d'omission	0/72 (0%)	1/38 (2,63%)	0/54 (0%)	0/34 (0%)	0/40 (0%)	0/42 (0%)	0/40 (0%)		Erreur globale : 1/320 (0,3125%)	
Précision de production		72/72 (100%)	37/38 (97,37%)	54/54 (100%)	34/34 (100%)	40/40 (100%)	42/42 (100%)	40/40 (100%)			319/320 (99,6875%)

Tableau 8 : Matrice de confusion pour l'images de 2015

		Zone de validation									
		Eau pâle	Eau turbide	Bâti	Sol nu	CV faible	CV Moyenne	CV dense	Total	Erreur de commission	Précision d'utilisation
Classification	Eau pâle	36	0	0	0	0	0	0	36	0/36 (0%)	36/36 (100%)
	Eau turbide	0	34	0	0	0	0	0	34	0/34 (0%)	34/34 (100%)
	Bâti	0	0	42	0	0	0	0	42	0/42 (0%)	42/42 (100%)
	Sol nu	0	0	0	30	0	0	0	30	0/30 (0%)	30/30 (100%)
	CV faible	0	0	0	2	50	0	0	52	2/52 (3,85%)	50/52 (96,15%)
	CV moyenne	0	0	0	0	0	28	0	28	0/28 (0%)	28/28 (100%)
	CV dense	0	0	0	0	0	2	42	44	2/44 (4,55%)	42/44 (95,45%)
	Total	36	34	42	32	50	30	42	266		
	Erreur d'omission	0/36 (0%)	0/34 (0%)	0/42 (0%)	2/32 (6,25%)	0/50 (0%)	2/30 (6,67%)	0/42 (0%)		Erreur globale : 4/266 (1,5%)	
Précision de production		36/36 (100%)	34/34 (100%)	42/42 (100%)	30/32 (93,75%)	50/50 (100%)	28/30 (93,33%)	42/42 (100%)			262/266 (98,5%)

Qualitativement, l'analyse des images résultant de la classification montre des changements d'occupation du sol au sein des classes. L'espace bâti a fortement augmenté pour la période concernée (de 1996 à 2015).

C'est le même constat pour la turbidité de l'eau. Les superficies couvertes par une végétation dense et faible ont diminué tandis que celles couvertes par une végétation moyenne ont augmenté de même que les espaces non couverts (sol nu).

IV.1.2. Analyse quantitative des changements d'occupation du sol entre 1996 et 2015

L'analyse quantitative nous a permis d'avoir des informations chiffrées sur les superficies des différentes classes thématiques (statistiques des classes d'occupation) et ainsi d'en dégager la dynamique à leur sein (matrice de transition).

a. Calcul des statistiques des classes d'occupation de sol entre 1996 et 2015

Les superficies des différentes classes d'occupation du sol de notre zone d'étude pour 1996 et 2015 sont présentées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Superficies des classes d'occupation de sol en 1996 et 2015

Occupation du sol	Superficie en ha		Evolution		
	1996	2015	Superficie en ha	Taux	Tendance
Classes					
Eau pâle	3 981	3 814	-167	-4,2%	Régression
Eau turbide	193	355	162	+83,9%	Augmentation
Bâti	645	1 413	768	+119,1%	Augmentation
Sol nu	1 408	2 111	703	+49,9%	Augmentation
CV faible	31 487	27 256	-4 231	-13,4%	Régression
CV moyenne	14 630	18 339	3 709	+25,4%	Augmentation
CV dense	2 175	1 231	-944	-43,4%	Régression

Du tableau ci-dessus, il est à remarquer, d'une part que, la superficie bâtie a plus que doublée (+119,1%). Une augmentation considérable s'observe pour la classe d'eau turbide (+83,9%) ce qui traduit le mauvais état de santé du lac Tanganyika. La superficie non couverte a aussi fortement augmenté (+49,9%) de même que celle ayant un couvert végétal moyen (+25,4%). D'autre part, une forte régression s'observe dans l'espace densément couverte (-43,4%). La même tendance s'observe pour les zones de couverture végétale faible avec une ampleur non négligeable (-13,4%) ainsi que pour l'eau pâle (-4,2%). Les figures 20 (a & b) produites à partir des informations du tableau 7 nous permettent de voir clairement la dynamique de l'occupation des sols de la zone d'étude où les valeurs représentées sont les pourcentages d'occupation du sol par classe thématique respectivement en 1996 et en 2015.

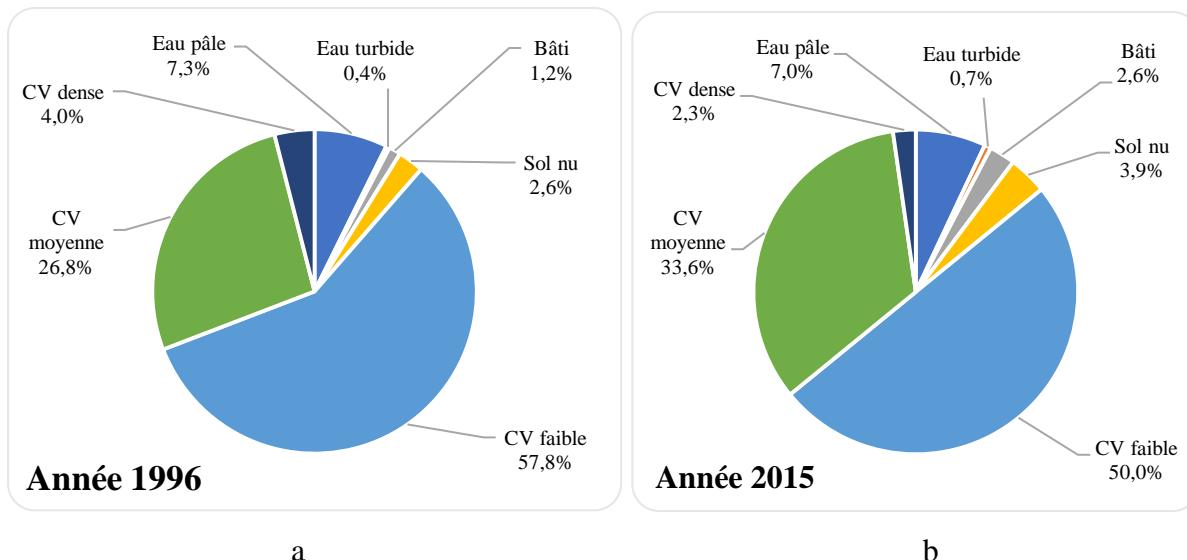


Fig. 20 (a & b) : Evolution des classes d'occupation de sol entre 1996 et 2015

b. Evolution au sein des classes d'occupation du sol entre 1996 et 2015

Quantitativement, les changements au sein des classes sont présentés dans le tableau 10 qui constitue la matrice de transition. Ce tableau prend en compte les valeurs des superficies (pixels ou pourcentages) des classes du stade initial (1996) et celles du stade final (2015) avec les valeurs inchangées dans la diagonale.

La ligne « **Changement** » montre de façon quantitative le total des mouvements au sein des classes thématiques tandis que celle « **Différence** » contient des estimations quantitatives des changements opérés entre les deux dates.

Tableau 10 : Matrice de transition de 1996 à 2015

		Stade final (année 2015)							
		Eau pâle	Eau turbide	Bâti	Sol nu	CV faible	CV Moyenne	CV dense	Total
Stade initial (année 1996)	Eau pâle	3 801	11	0	0	0	0	0	3 814
	Eau turbide	149	144	2	1	42	10	0	355
	Bâti	0	1	295	15	1 052	45	0	1 413
	Sol nu	0	0	5	446	1 222	435	2	2 111
	CV faible	11	21	330	622	21 414	4 100	676	27 256
	CV Moyenne	7	16	10	322	7 435	9 818	704	18 339
	CV dense	0	0	0	0	246	192	793	1 231
	Total	3 983	193	645	1 408	31 487	14 630	2 175	
Changement		180	49	350	963	10 073	4 812	1 382	
Différence		-167	162	768	703	-4 231	3 709	-944	

Rapportés à un graphique (figure 21), les résultats du tableau 10 témoignent clairement d'un fort dynamisme au sein de différentes classes d'occupation du sol.

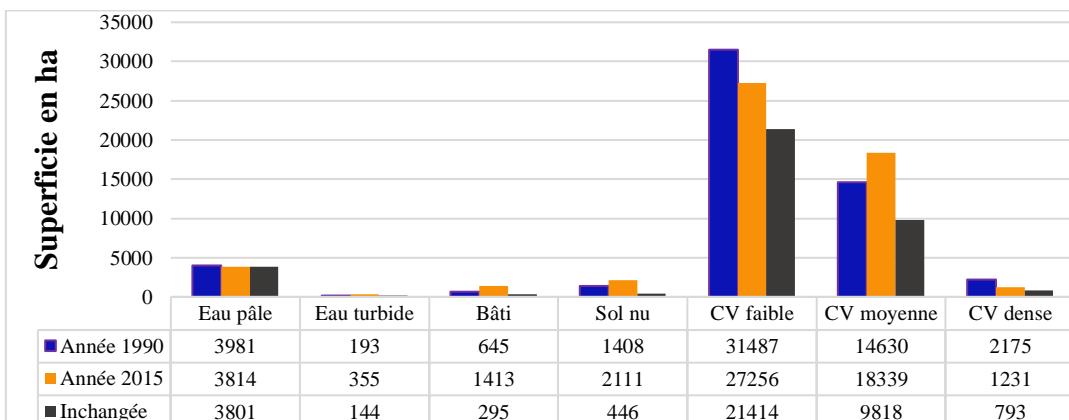


Fig. 21 : Dynamique des différentes classes d'occupation du sol de 1986 à 2015

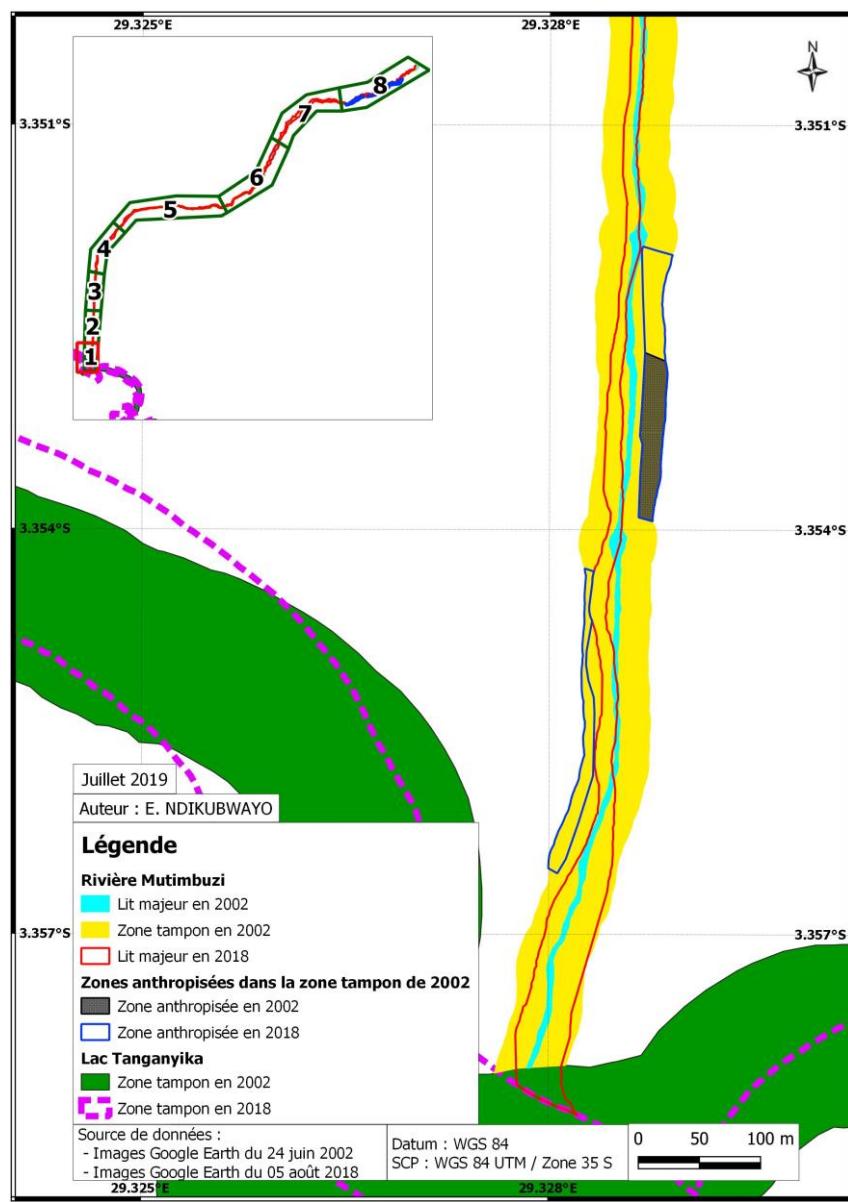
Tous les résultats ci-haut présentés démontrent un fort dynamisme dans l'occupation du sol de notre zone d'étude. L'augmentation de la turbidité de l'eau s'explique en partie par les déchets de toutes sortes jetés n'importe où et principalement dans les rivières se déversant dans le lac. À cela s'ajoute l'érosion venant des collines surplombant la ville. Quant à la surface bâtie, son augmentation suit la tendance générale tout comme la majorité des villes suite à la périurbanisation. Le problème est que cette dernière se fait sans plan d'extension, ce qui impacte aussi la qualité des eaux du lac en aval par l'érosion suite aux débordements et inondations. L'expansion de la ville s'intensifie suite à la natalité élevée et l'exode rural. L'extension du bâti ne se fait pas sans impact sur l'environnement urbain et périurbain. L'extraction des matériaux de construction laisse le sol à nu, ce qui augmente en partie la superficie non couverte étant donné la non remise en état des friches de carrières, d'extraction du sable et d'autres matériaux de construction. L'augmentation de la surface nue s'explique aussi par le surpeuplement du pays en général dont notre zone d'étude en particulier. Etant donné le pourcentage élevé de la population agricole, une partie de la superficie non couverte (sol nu) est constituée par les sols défrichés. A souligner que les images traitées sont de la saison sèche, donc après la récolte des cultures vivrières, ce qui laisse à nu le sol pendant cette saison. Une partie du sol faiblement couvert a fait objet d'extension de la ville et une autre a été mise en culture, expliquant de ce fait sa remarquable diminution. Pour le sol fortement couvert, les défrichements culturaux ainsi que la recherche du bois de chauffage sont les principales causes de régression tandis que l'augmentation de la surface moyennement couverte s'explique par l'intensification des cultures pérennes et annuelles, principalement le palmier à l'huile et la banane qui sont fortement pratiquées dans notre zone d'étude.

Il convient ici de souligner que les années 1990, le pays était en guerre civile, ce qui fait qu'il y eût ralentissement de l'activité agricole faisant que les superficies défrichées et couvertes par les cultures pérennes et annuelles soient petites.

IV.2. Dynamique dans les zones tampons

IV.2.1. Occupation du sol dans les zones tampons entre 2002 et 2018

Les rivières Mutimbuzi et Ntahangwa ainsi que le lac Tanganyika ont fait objet d'étude de la dynamique dans les zones tampons. Les résultats sont présentés sous forme d'un atlas cartographique (annexe 3) dont trois des cartes, une pour la rivière Mutimbuzi, une pour la rivière Ntahangwa et une autre pour le lac Tanganyika (figures 22 a, b et c) sont ci-dessous présentées pour illustration.



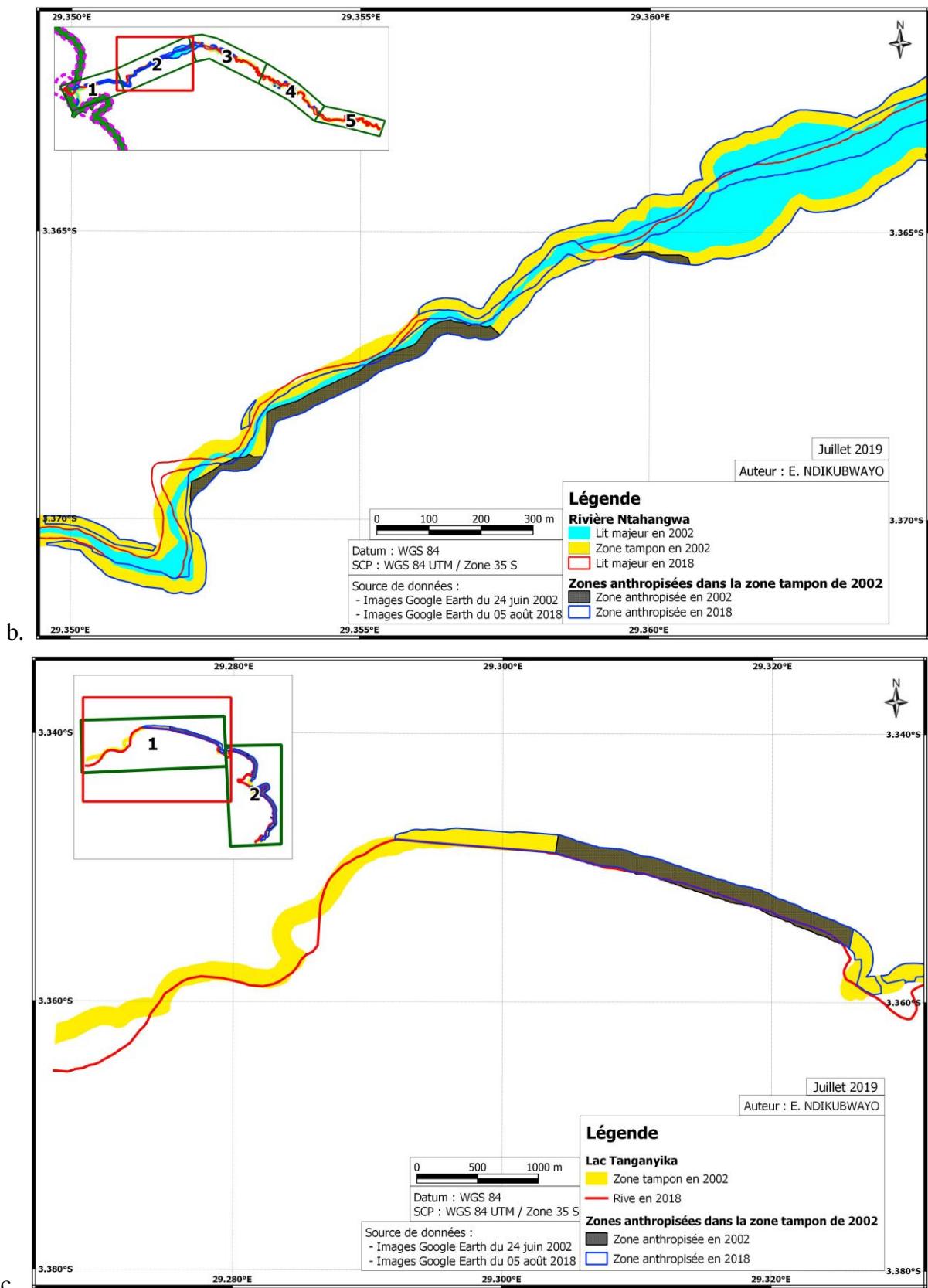


Fig. 22 (a, b & c) : Evolution de l'occupation du sol dans les zones tampons de 2002 entre 2002 et 2018

L'analyse visuelle de la cartographie d'occupation du sol pour l'ensemble de la partie ayant fait objet d'étude (annexe 3) montre une augmentation de la superficie anthropisée entre 2002 et 2018 ainsi que l'élargissement des lits des rivières.

Il est à constater que les actions anthropiques étaient déjà menées dans les zones tampons en 2002. Elles ont pris de plus en plus d'ampleur dans les zones tampons de la rivière Ntahangwa et du lac Tanganyika par rapport à celle de la rivière Mutimbuzi tandis que l'élargissement du lit s'est beaucoup plus accentué pour la rivière Mutimbuzi.

Quantitativement, la pression anthropique dans lesdites zones est illustrée dans le tableau 11.

Tableau 11 : Evolution des lits majeurs et des zones anthropisées dans les zones tampons de 2002 des rivières Mutimbuzi et Ntahangwa et du lac Tanganyika entre 2002 et 2018

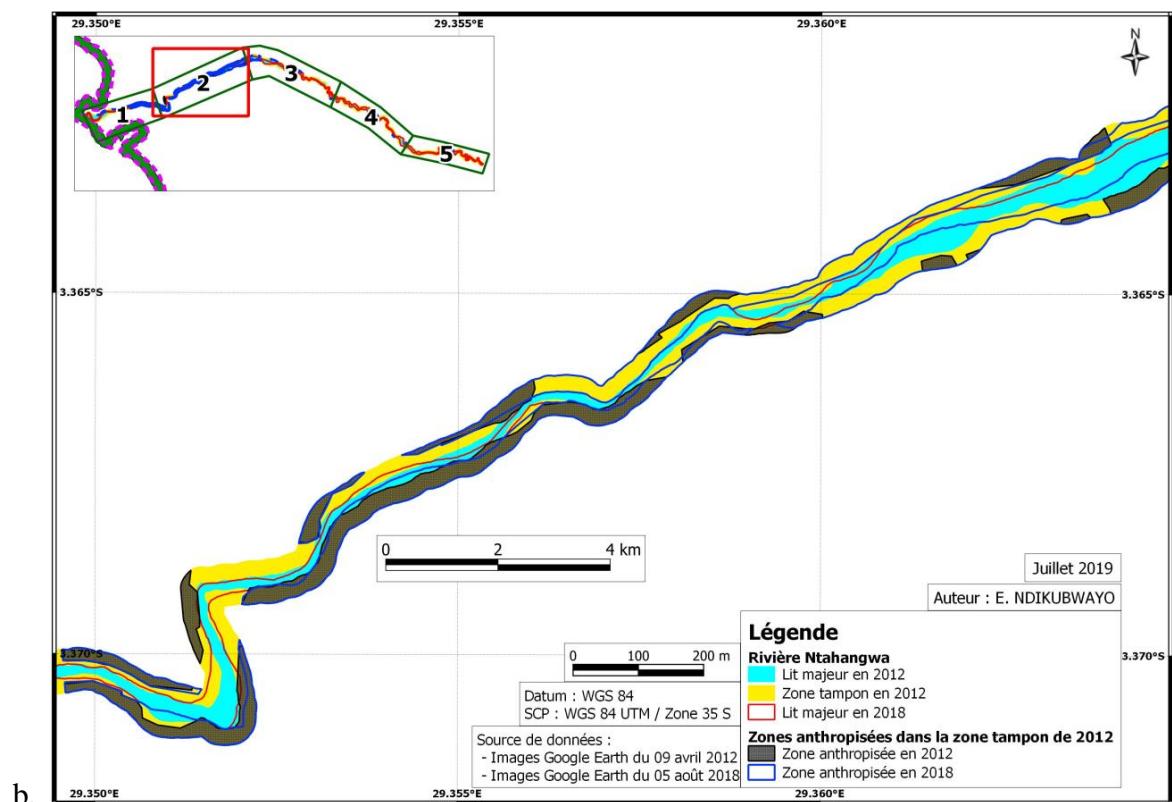
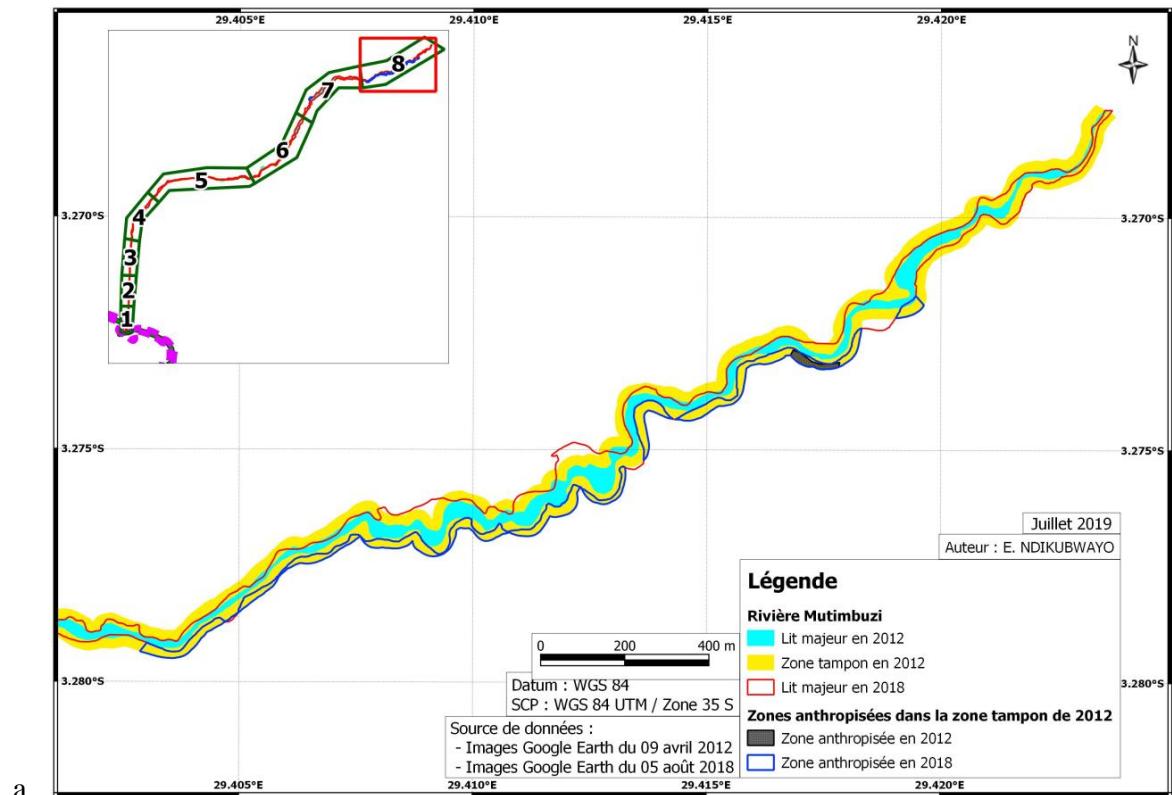
	Superficie du lit majeur (en ha)		Superficie de la ZA dans la zone tampon de 2002 (en ha)	
	2002	2018	2002	2018
Mutimbuzi	15,9	66,6	0,23	8,4
Ntahangwa	23,5	22,2	2,3	18,9
Lac Tanganyika	-	-	115,2	154,3

Des résultats du tableau 11, il se remarque que le lit de la rivière Mutimbuzi a presque quadruplé entre 2002 et 2018. Cela est dû à la fragilisation des berges par l'extraction des matériaux de construction principalement. La partie anthropisée dans la zone tampon de la rivière Mutimbuzi est occupée par les plantations des palmiers à l'huile contrairement à celle de la rivière Ntahangwa et du lac Tanganyika où les zones anthropisées, qui ont fortement augmenté (16,6 ha de plus pour la zone tampon de la rivière Ntahangwa et 39,1 ha pour celle du lac Tanganyika), sont occupées par des constructions. La régression observée au niveau du lit majeur de la rivière Ntahangwa est due aux aménagements effectués dans la zone tampon jusqu'à repousser même le lit majeur pour y installer des constructions comme on peut le remarquer sur la figure 22, b ci-dessus.

IV.2.2. Evaluation de la mise en application du code de l'eau du 26 mars 2012

L'article 5 - alinéa 3 du code de l'eau du 26 mars 2012 établit des zones tampons de 25 m à partir du niveau le plus élevé qu'atteignent les eaux dans leurs crues périodiques (lit majeur) pour les rivières traversant Bujumbura-Mairie et 150 m à partir de la rive du lac Tanganyika.

La présente section est consacrée à la mise en évidence de la dynamique observée dans ces zones après la mise en place de ladite réglementation. De même que la section précédente, les résultats sont présentés sous forme d'une série de carte (annexe 4) dont trois sont ci-dessous présentées pour illustration (figures 23 a, b, et c).



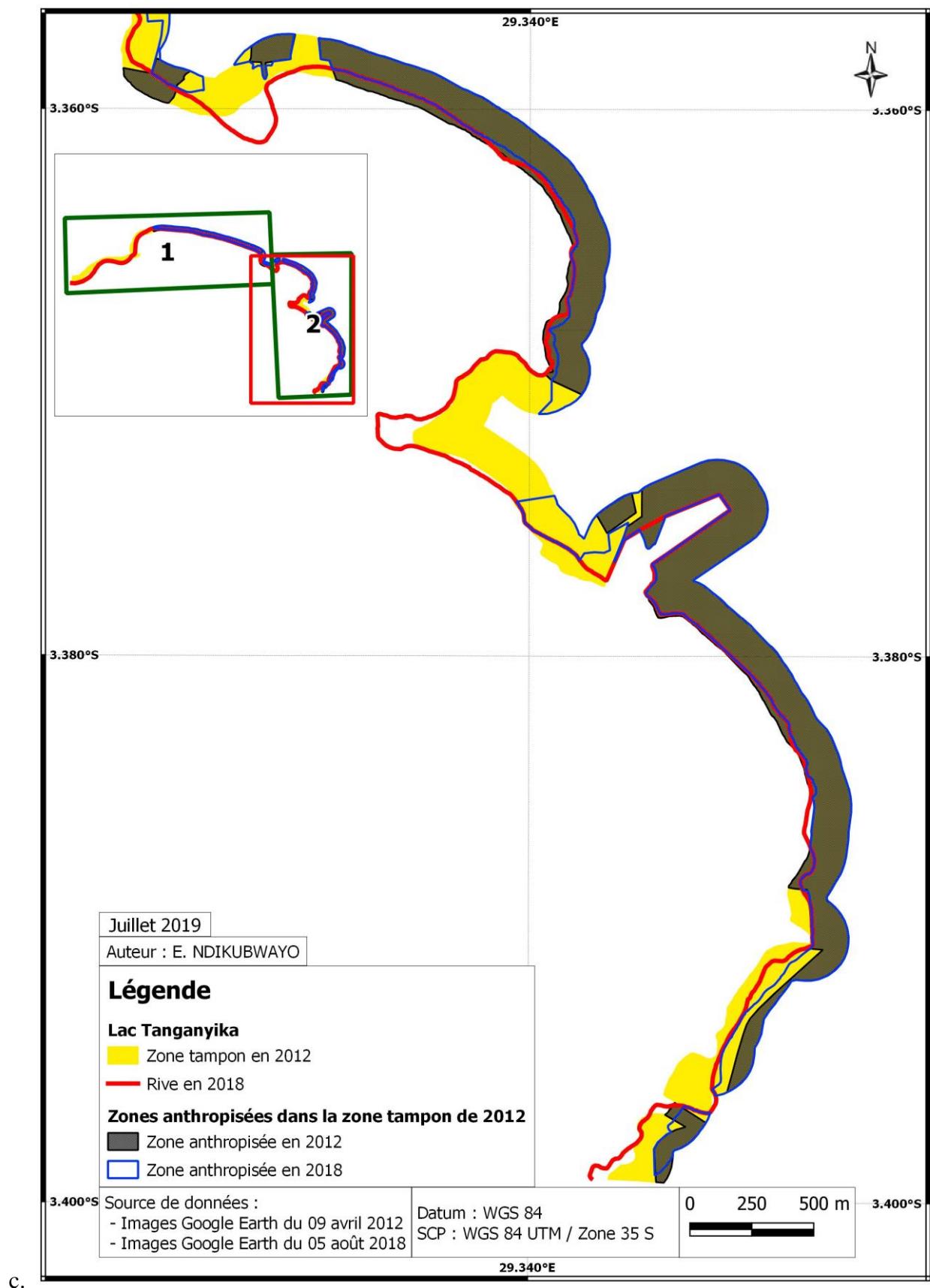


Fig. 23 (a, b &c) : Evolution de l'occupation du sol dans les zones tampons de 2012 entre 2012 et 2018

L'analyse visuelle des cartes ci-dessus présentées montre que les actions anthropiques se sont poursuivies malgré la mise sur pied d'une réglementation visant le respect des zones tampons. Les actions menées dans ces zones sont les mêmes que celles mentionnées dans la section précédente (IV.2.1). Quantitativement, l'évolution des lits des rivières et l'occupation du sol dans les zones tampons entre 2012 et 2018 est présentée dans le tableau 12.

Tableau 12 : Evolution des lits majeurs et des zones anthropisées dans les zones tampons de 2012 des rivières Mutimbuzi et Ntahangwa et du lac Tanganyika entre 2012 et 2018

	Superficie du lit majeur (en ha)		Superficie de la ZA dans la zone tampon 2012 (en ha)	
	2012	2018	2012	2018
Mutimbuzi	31,1	66,6	1,22	4,6
Ntahangwa	20,4	22,2	7,1	11,4
Lac Tanganyika	-	-	142,8	132

Les résultats présentés dans le tableau 12 montrent que la superficie du lit de la rivière Mutimbuzi a plus que doublé entre 2012 et 2018 passant de 31,1 ha à 66,6 ha alors que celle du lit de la rivière Ntahangwa a faiblement augmenté (de 20,4 ha à 22,2 ha). La légère diminution de la superficie anthropisée pour la zone tampon du lac Tanganyika est le résultat du changement morphologique de la rive faisant que certaines parties du bord du lac se retrouvent immergées.

CHAPITRE V. DISCUSSION DES RESULTATS

L'utilisation des SIG et de la télédétection dans la réalisation du présent travail nous a permis de mettre en évidence la dynamique spatio-temporelle de l'environnement de notre zone d'étude pour la période considérée (de 1996 à 2018). Les analyse qualitatives et quantitatives effectuées font état d'une dégradation de façon globale.

V.1. Evolution de l'occupation du sol dans les bassins versant de 1996 à 2015

Les résultats de la classification supervisée des images satellitaires de 1996 et 2015 ont montré une extension de la ville principalement dans la plaine avec une superficie ayant passé de 645 ha à 1 413 ha (soit +119,1%). L'extension de la ville corrélée positivement avec la démographie fait que la pression anthropique s'accentue dans la zone, ce qui se démontre à travers les résultats obtenus pour les autres classes d'occupation. C'est ainsi que s'explique l'augmentation de la superficie non couverte à +49,9% (pendant la saison sèche) résultant de la mise en culture, de la coupe du bois de chauffage et de l'extraction des matériaux de construction au détriment des espaces faiblement (-13,4%) et densément (-43,4%) couverts. L'augmentation de l'espace moyennement couvert (+25,4%) résulte aussi de l'intensification de l'activité agricole dans la zone. Celle de la turbidité de l'eau du lac Tanganyika (+83,9%) est corrélée négativement avec la quantité d'eau pâle (-4,2%). Elle est le résultat de l'érosion des sols mis en culture avec le plus souvent des techniques inappropriées sur des sols à fortes pente surplombant la ville sans oublier les divers déchets jetés dans les rivières affluents du lac et les constructions anarchiques causant des débordements et inondations emportant tout ce qui se trouve sur leur passage.

Les résultats de notre travail viennent confirmer les informations contenues dans la littérature. Les informations chiffrées issues des résultats de nos traitements permettent de mettre en évidence l'ampleur des actions anthropiques dans les bassins versants surplombant la Mairie de Bujumbura, ce qui donne une orientation claire sur les actions à mener pour le redressement de la situation.

Nos résultats corroborent certains travaux similaires déjà réalisés. Ainsi, NDAYIKENGURUKIYE (2016), en utilisant la télédétection, a démontré une évolution régressive de sa zone d'étude qui est le Parc National de la Kibira dont une petite portion fait partie intégrante du bassin de la rivière Mutimbuzi faisant objet de notre travail.

Selon ses résultats de sa classification supervisée, la classe forestière a diminué au profit des clairières ou zones défrichées passant de 4894,35 ha en 1986 à 4603,26 ha en 2016. Les causes de dégradation identifiées sont principalement les activités agro-pastorales suite à l'exiguïté des terres faisant que la population riveraine tente de dépasser les limites de leurs exploitations en grignotant sur la zone du parc en plus d'autres actions illégales dont la recherche du bois de chauffage constituant la seule source d'énergie.

Nos résultats, comme ceux de NDAYIKENGURUKIYE (2016), montrent que les zones d'études concernées sont des systèmes écologiques et non des écosystèmes isolés. Cela fait que l'étude de leur dynamique a dû, impérativement, prendre en compte les activités y développées ainsi que les aspects physiques, hydrologiques et climatiques. La même approche a été aussi utilisée par LAFLEUR (2015) dans son étude évolutive de la mangrove de la Baie de Caracol (Nord-Est, Haïti) et perspectives de conservation.

V.2. Evolution des lits majeurs et de l'occupation du sol dans les zones tampons

Les images Google Earth ont été utilisées pour l'étude de la dynamique dans les lits majeurs et les zones tampons des rivières et du lac Tanganyika. Les résultats de traitement des images de 2002 et 2018 prouvent que les actions anthropiques sont menées dans les zones tampons avec une ampleur beaucoup plus remarquable pour la rivière Ntahangwa (de 2,3 ha à 18,9 ha) et le lac Tanganyika (de 115,2 ha à 154,3 ha) par rapport à la rivière Mutimbuzi (0,23 ha à 8,8 ha). Les activités diffèrent d'une zone à une autre. Pour la rivière Mutimbuzi se trouvant vers la périphérie nord de la ville, les actions menées sont principalement liées à l'agriculture tandis que pour la rivière Ntahangwa traversant la ville, il s'agit des constructions d'habitats dans la partie amont et d'entrepôts des marchandises et industries dans la partie aval. Dans la zone tampon du lac Tanganyika se trouvent principalement les plages et quelques habitations privées. Quant aux lits des rivières, celui de la rivière Mutimbuzi s'est fortement élargi passant de 16,9 ha à 66,6 ha suite aux activités d'extraction des matériaux de construction principalement tandis que celui de la rivière Ntahangwa s'est faiblement rétréci (de 1,3 ha de moins en 2018 par rapport à 2002). Malgré ce rétrécissement, la rivière reste dans un état fragile compte tenu des constructions érigées même dans les zones de retrait de la rivière.

Considérant la période de 2012 à 2018, les résultats montrent un élargissement des lits des rivières (de 31,1 ha à 66,6 ha pour la rivière Mutimbuzi et 20,4 ha à 22,2 ha pour la rivière Ntahangwa).

C'est la même tendance pour les zones anthropisées dans leurs zones tampons avec 3,4 ha de plus en 2018 par rapport à 2012 pour la rivière Mutimbuzi et 4,3 ha de plus pour la rivière Ntahangwa. Une légère diminution (de 142,8 ha à 132 ha) de la zone anthropisée dans la zone tampon du lac Tanganyika n'est pas corrélée avec l'atténuation de l'activité anthropique mais au changement de la morphologie de la rive du lac.

Les résultats quantitatifs confirment les informations contenues dans certains rapports présentés de façons qualitative stipulant la dégradation de l'environnement dans les rivières affluents du lac Tanganyika et leurs zones tampons ainsi que celle du lac Tanganyika. Ainsi, la destruction des lits et des berges des rivières traversant la Mairie de Bujumbura par l'extraction des matériaux de construction ainsi que les constructions dans les zones tampons du lac Tanganyika et des rivières avaient été évoquées par MBONERANE en 2011 lors du 1^{er} Conseils du lac Tanganyika tout comme en 2016 et en 2018 lors des 6^{ème} et 8^{ème} Conseils du lac Tanganyika.

VI. CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Conclusion

Le présent travail a l'objectif global de contribuer à la protection de l'environnement dans la zone urbaine et périurbaine de la partie nord de la Mairie de Bujumbura. Les images Landsat de 1996 et 2015 ont été traitées pour mettre en évidence l'évolution de l'occupation du sol dans les bassins versants faisant objet d'étude par la classification supervisée. La mise en évidence l'évolution des lits des rivières traversant la ville et des zones anthropisées dans leurs zones tampons et celle du lac Tanganyika dans la partie nord de la Mairie a été faite à l'aide des images Google Earth de 2002, 2012 et 2018.

Les résultats des différents traitements montrent une augmentation de la turbidité de l'eau du lac Tanganyika avec 162 ha de plus en 2015 par rapport à 1996, une augmentation de la surface non couverte de 703 ha, une réduction de la superficie densément couverte et une augmentation du bâti. Des résultats obtenus, il y a lieu de conclure que la couverture végétale dans les bassins versants surplombant la Mairie connaît une évolution régressive. Cette régression est due à l'intensification des actions anthropiques avec une ampleur considérable à proximité de la ville qui constitue une zone de concentration de la population, ce qui vérifient nos hypothèses 2 et 3 ainsi que l'hypothèse 4 en partie. Quant à la dynamique des lits des rivières, les résultats font état d'un fort élargissement du lit pour la rivière Mutimbuzi (de 15,9 ha en 2002 à 66,6 ha en 2018) contrairement à celui de la rivière Ntahangwa qui a connu un léger rétrécissement (de 23,5 ha en 2002 à 22,2 en 2018). La rivière Mutimbuzi, se trouvant dans la zone périphérique de la ville constitue un des sites principaux d'extraction des matériaux de construction, expliquant ainsi son élargissement. Quant à la rivière Ntahangwa, bien qu'elle fasse objet d'extraction des matériaux de construction, elle subit aussi une pression suite à l'aménagement de sa zone tampon voire de ses berges pour l'installation des constructions en témoigne l'évolution de la zone anthropisée de 2,3 ha à 18,9 ha entre 2002 et 2018. Cela explique la non augmentation de la superficie de son lit majeur. Dans la zone tampon du lac Tanganyika, les résultats ont démontré une augmentation de la zone anthropisée passant de 115,2 ha à 154,3 ha entre 2002 et 2018 soit 39,1 ha de plus. La même tendance a été observée pour la période de 2012 à 2018 avec le passage de 31,1 ha à 66,6 ha et de 20,4 ha à 22,2 ha pour les lits des rivières Mutimbuzi et Ntahangwa pour les années 2012 et 2018 respectivement.

De même que les lits des rivières, les superficies des zones anthropisées dans les zones tampons ont augmenté pour la période de 2012 à 2018 (1,2 ha à 4,6 ha dans la zone tampon de la rivière Mutimbuzi et 7,1 ha à 11,4 ha dans celle de la rivière Ntahangwa). Les résultats de la zone tampon du lac Tanganyika pour la période de 2012 à 2018 sont à nuancer avec l'évolution morphologique de la rive. Ainsi, il s'observe une légère diminution de la surface de la zone anthropisée en 2018 dans la zone tampon de 2012 (de 142,8 ha à 132 ha) sans pour autant qu'il y ait atténuation de la pression anthropique dans la zone. Ces résultats témoignent du non-respect des zones tampons des rivières et du lac Tanganyika malgré la législation en vigueur, ce qui justifie notre première hypothèse.

Bref, aux vus des résultats obtenus, la dynamique spatio-temporelle de l'environnement de notre zone d'étude suit une évolution régressive suite aux actions anthropiques.

Recommandations

Compte tenu du mouvement évolutif observé dans la zone prospectée, des recommandations ci-dessous ont été formulées en vue de redresser la situation :

- Elaborer un plan local d'extension de la Mairie de Bujumbura et un plan d'aménagement des bassins versant la surplombant ;
- Améliorer la canalisation des eaux pluviales et des eaux usées ;
- Mettre en place une politique et stratégie claires ainsi que mener des actions concrètes en matière de gestions des déchets ;
- Mettre en application la législation en vigueur en matière du respect des zone tampon et d'extraction des matériaux de construction ;
- Mener des travaux d'aménagement des lits des rivières et stabilisation des berges ;
- Mettre en application la législation en vigueur en matière d'urbanisme ;
- Promouvoir les activités génératrices de revenus autres que l'activité agro-pastorale ;
- Vulgariser les pratiques agricoles adaptées à la réalité du terrain ;
- Mettre sur pied une politique claire en matière de réduction des naissances.
- Promouvoir l'éducation environnementale à l'endroit de la population locale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages

1. BISORE, S. (2006). La problématique climatique au Burundi : analyse de la contribution du pays, risques de dommages potentiels, politique d'adaptation et comparaison dans le contexte global. *Université Libre de Bruxelles*, 88p.
2. DENIS, A. (2016). Travaux Pratiques de Télédétection Spatiale. *Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique*, 84p.
3. HAMOUDA, S. (2014). Etude de l ' évolution de l ' occupation et de l ' utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et SIG, 377p.
4. ISTEEBU. (2008a). Analyse de l'état de la structure de la population, Volume 3 , Tome 6. *Bujumbura*, 87p.
5. ISTEEBU. (2008b). Recensement général de la population et de l'habitat du Burundi 2008 - Synthèse des résultats définitifs. *Bujumbura*, 24p.
6. ISTEEBU. (2010). Annuaire des statistiques agricoles du Burundi - Année 2009. *Bujumbura*, 90p.
7. ISTEEBU. (2013). Rapport des projections démographiques du Burundi 2008-2030. *Bujumbura*, 91p.
8. ISTEEBU. (2015). Annuaire des statistiques agricoles du Burundi, 2014. *Bujumbura*, 103p.
9. ISTEEBU. (2017). Annuaire des statistiques de l'environnement, édition 2016. *Bujumbura*, 124p.
10. LAFLEUR, A. (2015). Etude évolutive de la mangrove de la Baie de Caracol (Nord-Est, Haïti) et perspectives de conservation. *Université de Liège, Belgique*, 55p.
11. MBONERANE, A. (2011). Premier conseil du Lac Tanganyika - Le Lac Tanganyika n'est pas une poubelle : protégeons-le ainsi que son bassin. *ACVE, Bujumbura*, 8p.
12. MBONERANE, A. (2016). Quatrième conseil du Lac Tanganyika - Des droits du lac Tanganyika et des rivières. *ACVE, Bujumbura*, 11p.
13. MBONERANE, A. (2017). Cinquième Conseil du Lac Tanganyika - Le Lac Tanganyika appelle au secours. *ACVE, Bujumbura*, 7p.
14. MBONERANE, A. (2018). Sixième Conseil du Lac Tanganyika - Le Lac Tanganyika, un trésor de la Création. Ecouteons ce qu'il nous dit. *Fondation Roi Mwezi Gisabo, Bujumbura*, 81p.

15. MEATTP. (2008). Etude de la vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques : secteur santé. *Bujumbura*, 44p.
16. MIKWA NGAMBA, J. (2010). Evaluation par télédétection des effets de la déforestation et de la dégradation des forets à Kisangani : Cas de la Région forestière de Masako. *Université de Kisangani*, 42p.
17. NZIGIDAHERA, B. (2012). Description du Burundi : Aspects physiques. *MEEATU, Bujumbura*, 10p.
18. PELLETIER, F. &, & SPOORENBERG, T. (2016). Aperçu sur les méthodes de projection de la population. *Division de la Population/DESA/Nations Unies, Dakar*, 36p.
19. PFNPRGC/Burundi. (2014). Evaluation rapide conjointe suite à la catastrophe des 9-10 février 2014 aux alentours de Bujumbura. *Bujumbura*, 94p.
20. République du Burundi. (2012). Code de l'eau du Burundi. *Burundi*, 54p.
21. République du Burundi. (2013). Code minier du Burundi. *Burundi*, 44p.
22. République du Burundi & Commission Européenne. (2007). Profil Environnemental de Pays (PEP) du Burundi - Contrat Spécifique n°2006/132723 - Rapport final. *Bujumbura*, 103p.
23. République du Burundi & PNUD. (2014). Bujumbura 2045 - Plan directeur novateur pour guider le développement futur de la capitale du Burundi. *Bujumbura*, 91p.
24. TABOPDA, G. W. (2010). Les aires protégées de l' Extrême-Nord Cameroun entre politiques de conservation et pratiques locales. *Université d'Orlean*, 331p.
25. TYCHON, B. (2018). Applications de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la gestion de l'environnement. *Université de Liège - Campus Arlon*, 30p.

Textes légaux

1. Loi n° 1/02 du 26 mars 2012 portant Code de l'eau de la République du Burundi, 54p.
2. Loi n° 1/21 du 15 octobre 2013 portant Code minier de la République du Burundi, 44p.

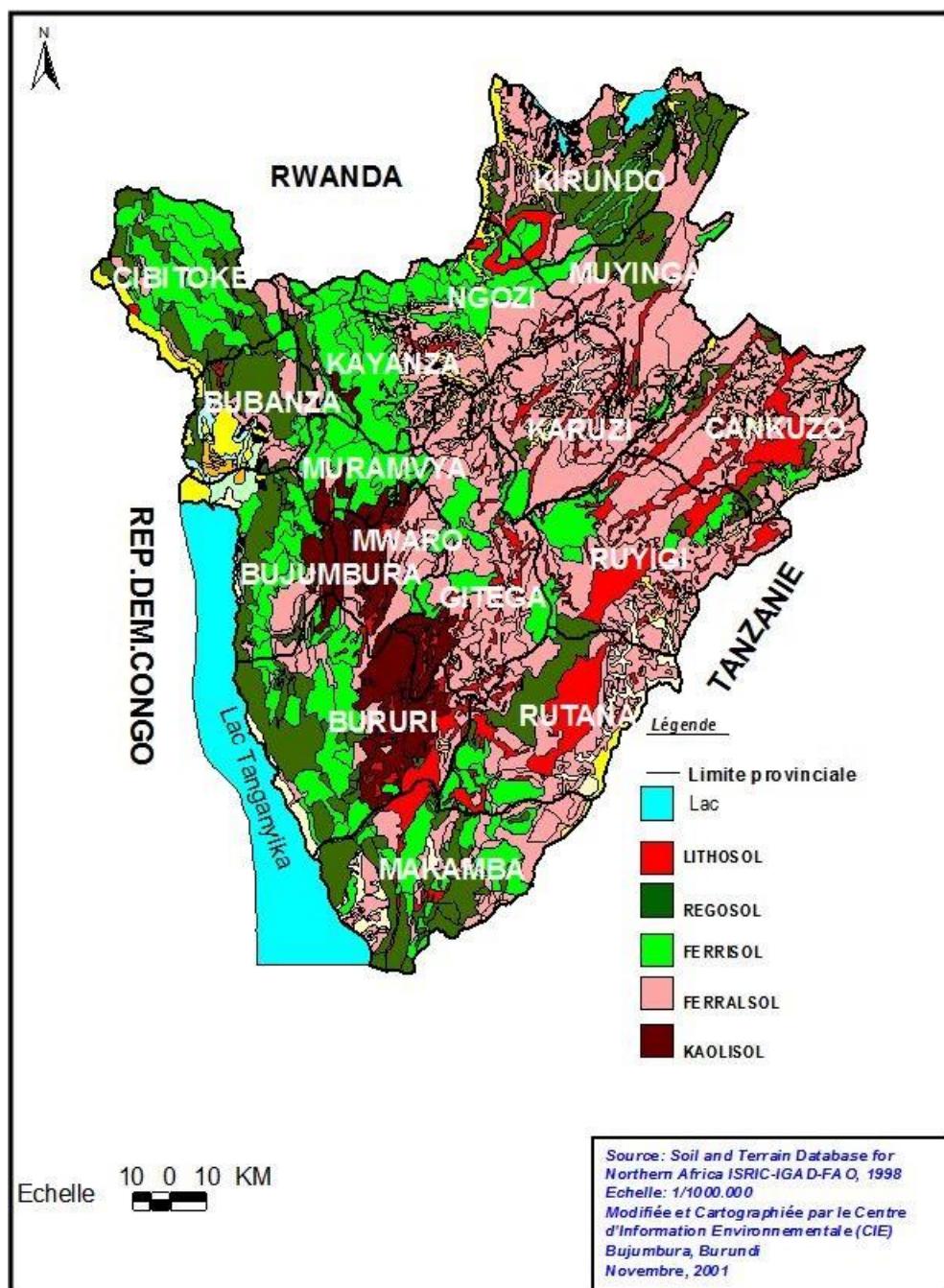
Sites Internet

1. <http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/teled2/memotele/mem33tel.htm>, consulté le 10 février 2019
2. <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/multitemp/?p=12746>, consulté le 28 janvier 2019

3. http://www.croixrougeburundi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=607:des-inondations-meurtrieres-dans-la-Mairie-de-bujumbura&catid=9&lang=fr&Itemid=141), consulté le 28 janvier 2019
4. <http://www.iwacu-burundi.org/des-depotoirs-improvises/>, consulté le 10 février 2019
5. <https://en.climate-data.org/africa/burundi/bujumbura-mairie/bujumbura-1073/>
6. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bujumbura>, consulté le 8 novembre 2019
7. https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/TELEDETECTION/document/cours_tel_edetection/coefficient_kappa.htm, consulté le 28 janvier 2019
8. <https://www.expertmemoire.com/discussion-memoire/>, consulté le 20 décembre 2018
9. <https://www.facebook.com/CroixRougeBurundi/photospcb.2059510740725585/2059508637392462/?type=3&theater>, consulté le 17 mars 2019
10. <https://www.facebook.com/CroixRougeBurundi/photospcb.2059703487372977/2059705537372772/?type=3&theater>, consulté le 16 mars 2019
11. <https://www.facebook.com/Ikiriho.The.Whole.Story/posts/la-police-du-burundi-d%C3%A9%C3%A9nombre-d%C3%A9%C3%A9j%C3%A0-six-maisons-%C3%A9croul%C3%A9es-suites-aux-inondations-/934813436701646/>, consulté le 16 mars 2019
12. <https://www.facebook.com/sosmediasburundi/posts/burundicrisis-lundi-23-avril-2018-bujumbura-nord-des-d%C3%A9%C3%A9g%C3%A2ts-occasionn%C3%A9s-par-des-1807810552614309/>, consulté le 16 mars 2019
13. <https://www.google.fr/search?ei=VsGPXPDG4OukwWM9qToBQ&q=zone+humide&oq=zone+humide&gs>, consulté le 17 janvier 2019
14. <https://www.infosgrandslacs.info/productions/inondation-de-lecole-primaire-kamenge-i>, consulté le 15 janvier 2019
15. www.dronesimaging.com, consulté le 10 janvier 2019

ANNEXES

Annexe 1 : Carte des sols dominants du Burundi



Source : CIE, 2001

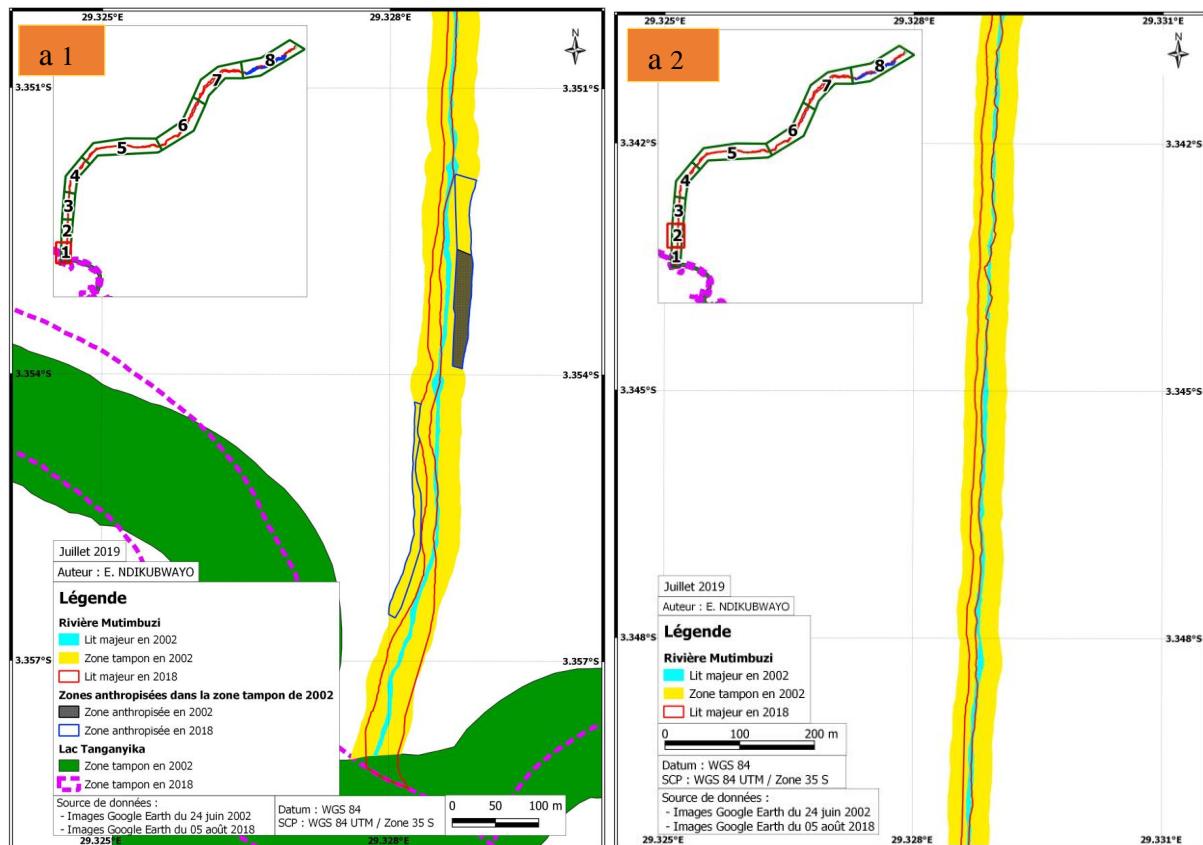
Annexe 2 : Caractéristiques climatiques des zones agro-écologiques du Burundi

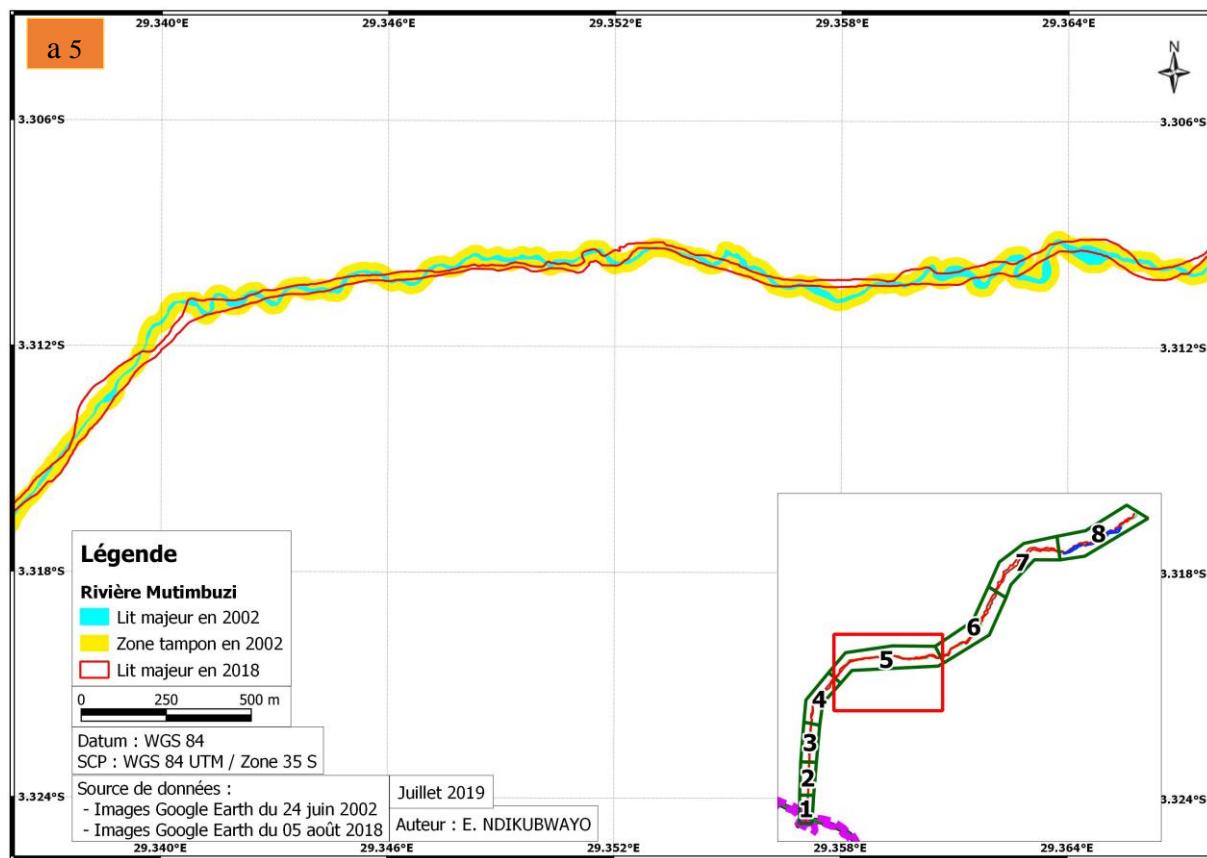
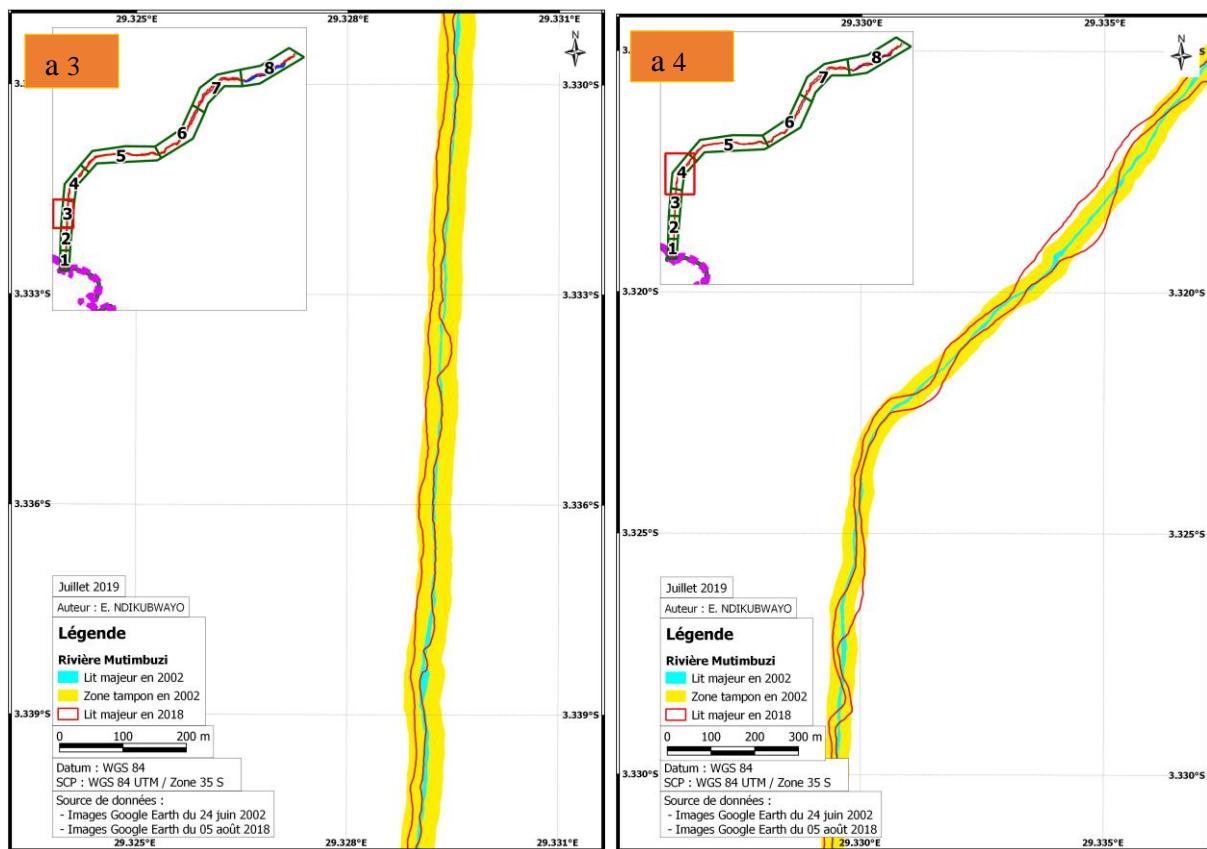
Régions éco-climatiques	Température moyenne annuelle (°C)	Pluie moyenne annuelle (en mm)
Plaine de l'Imbo	> 23	800 - 1100
Versant Ouest de la Crête Congo-Nil	18 - 28	1100 - 1900
Crête Congo-Nil	14 - 15	1300 - 2000
Plateaux centraux	17 - 20	1200 - 1500
Dépressions de Kumoso et de Bugesera	20 - 23	1100 - 1550

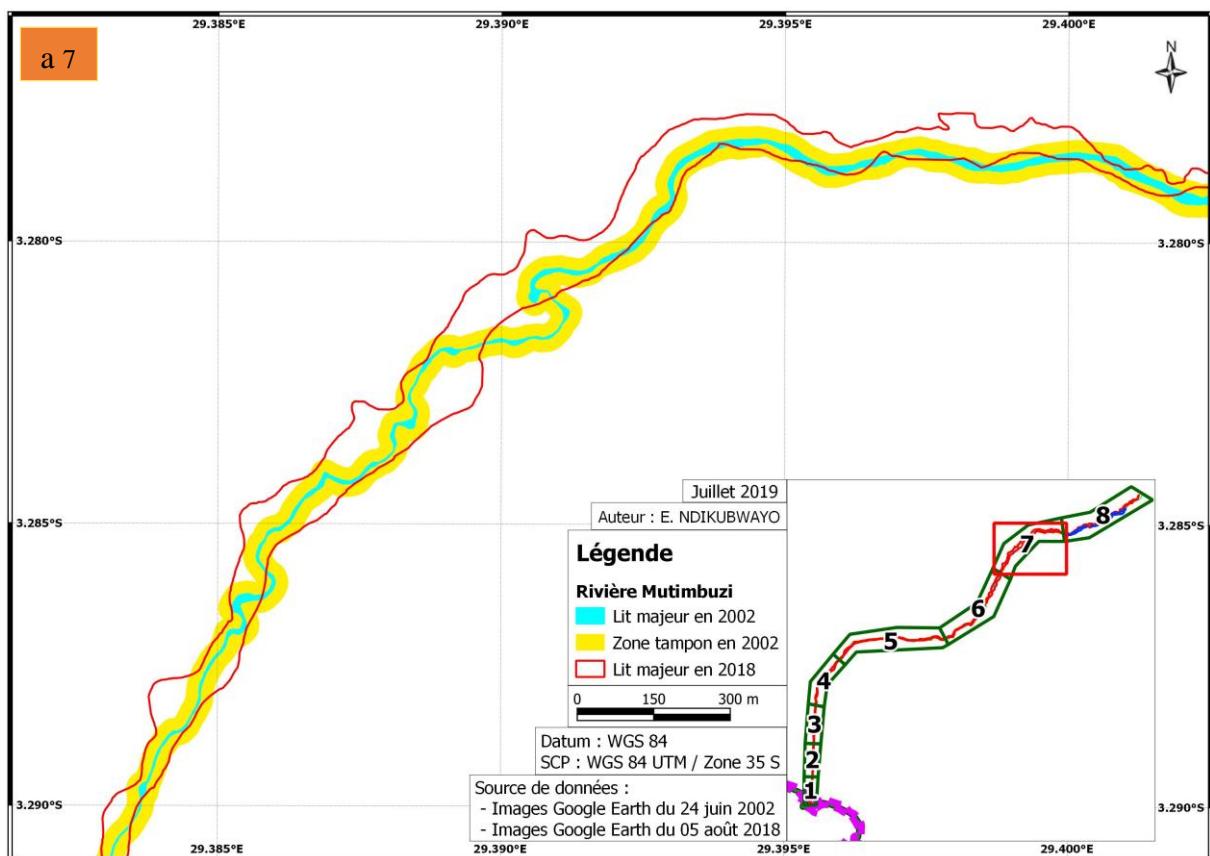
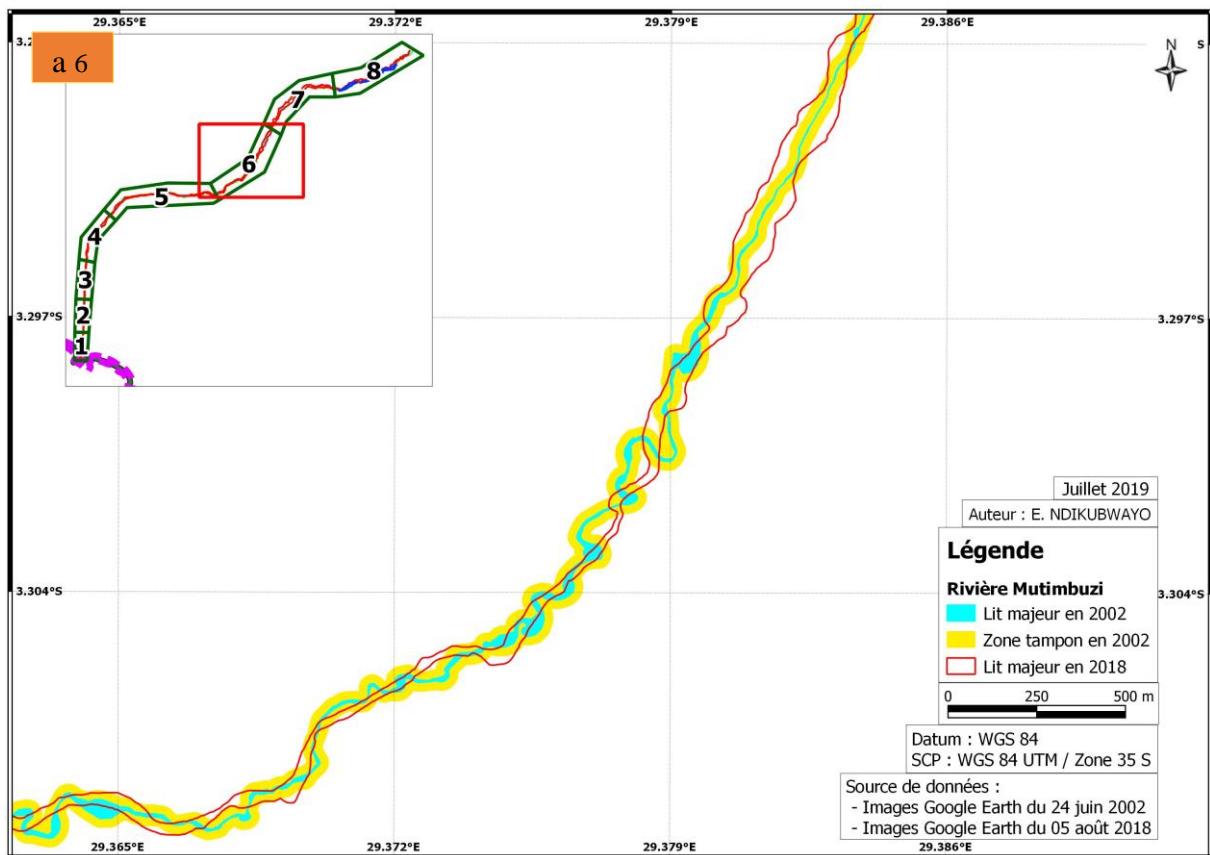
Source : MINATTE, 2005 cité par NZIGIDAHERA, 2012

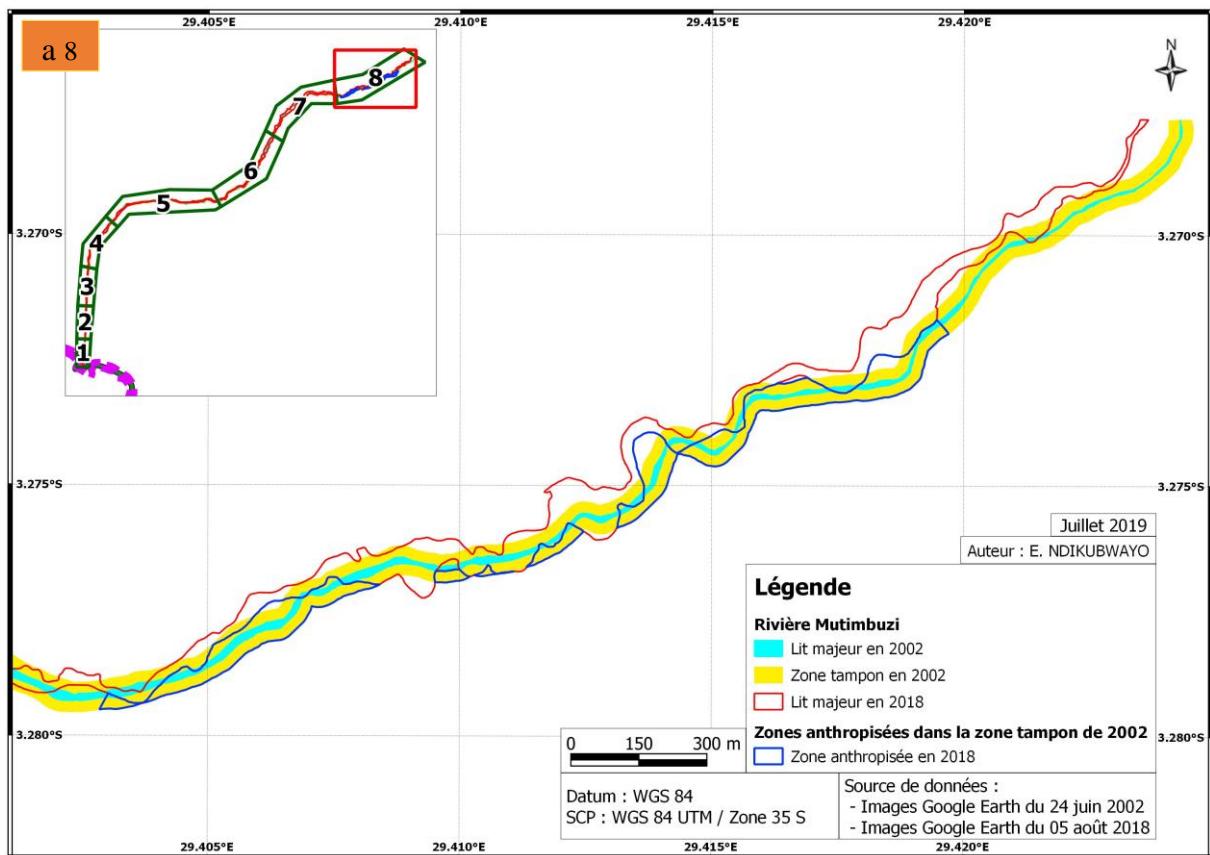
Annexe 3 : Atlas cartographique d'occupation du sol dans les zones tampons entre 2002 et 2018

a. Rivière Mutimbuzi

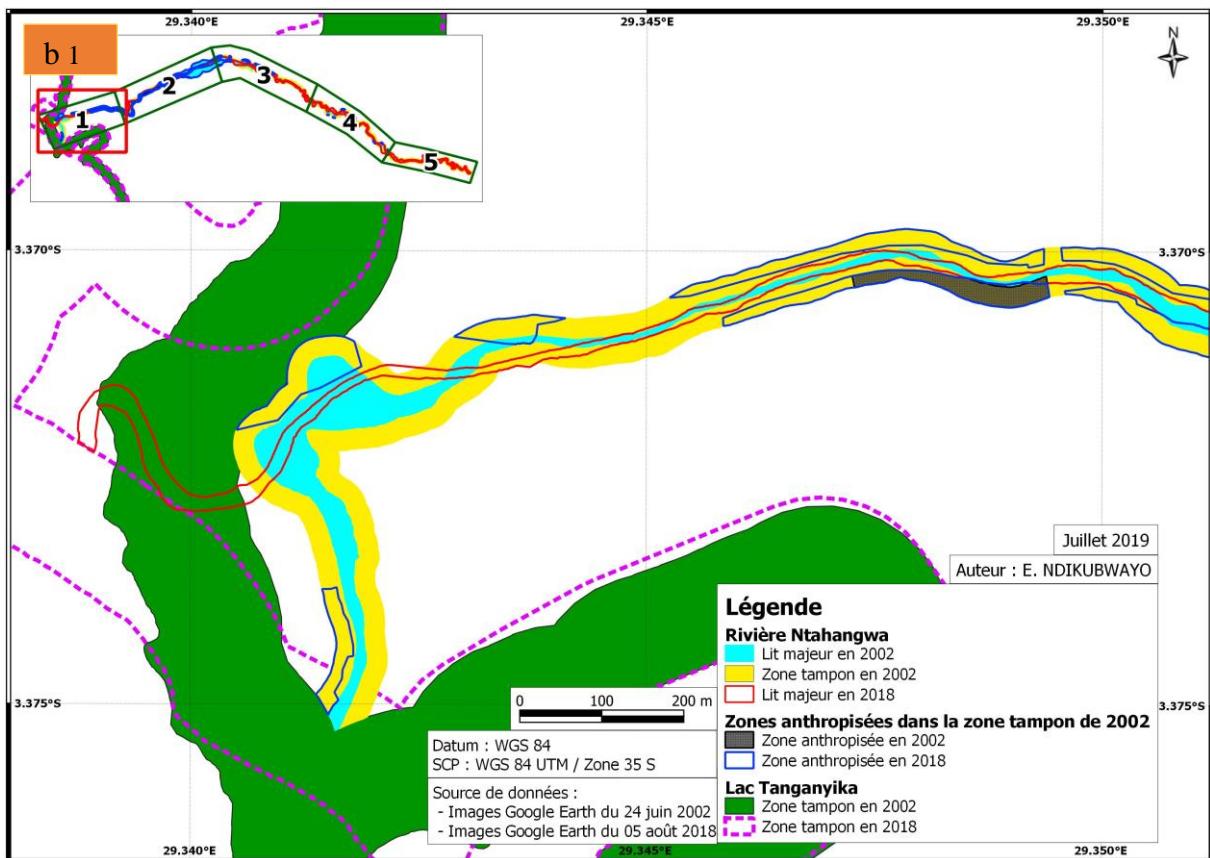


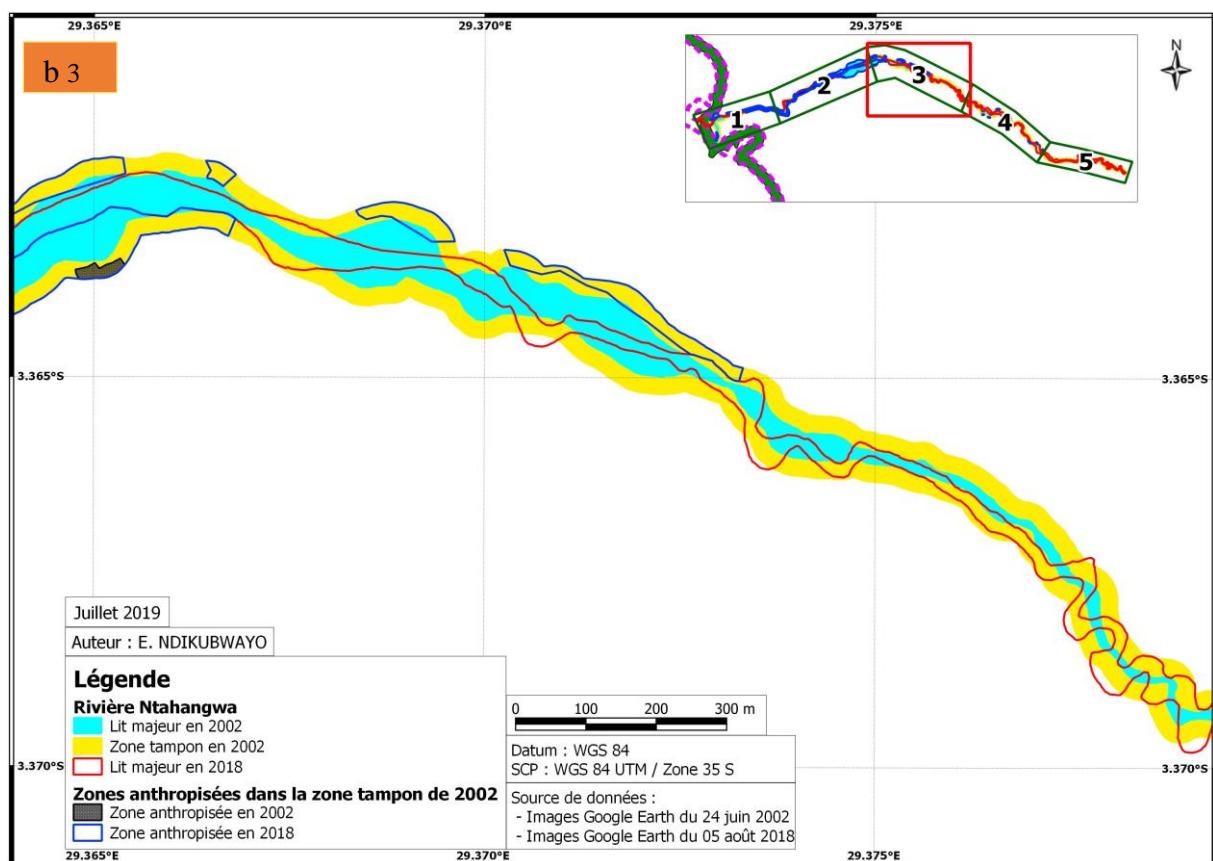
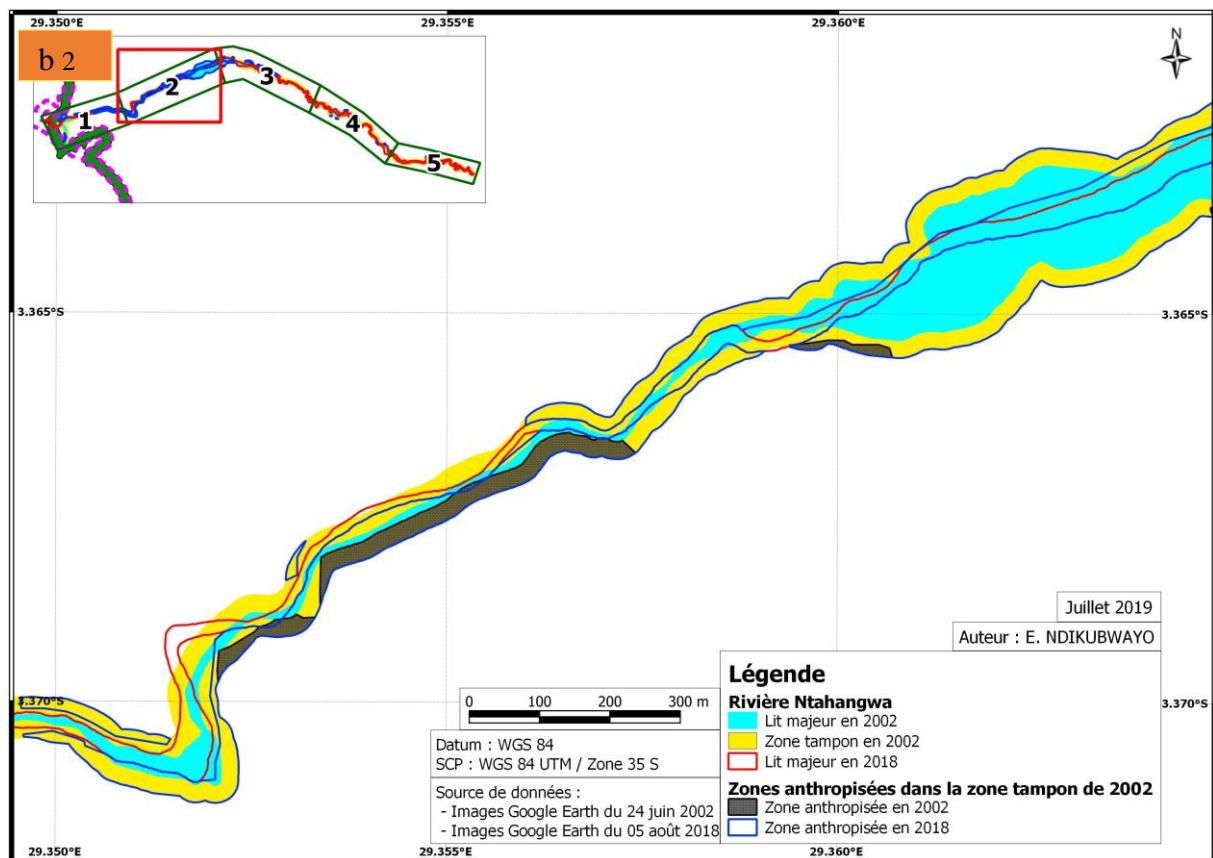


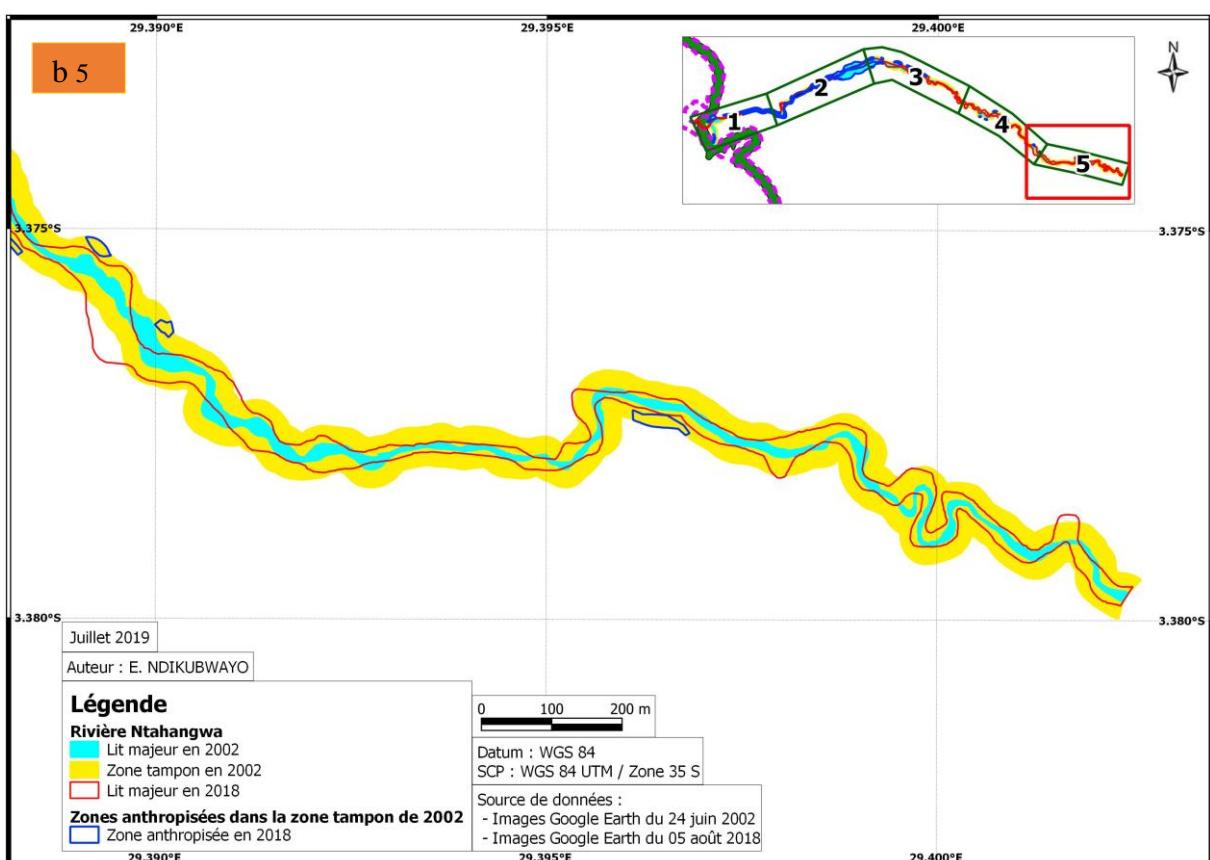
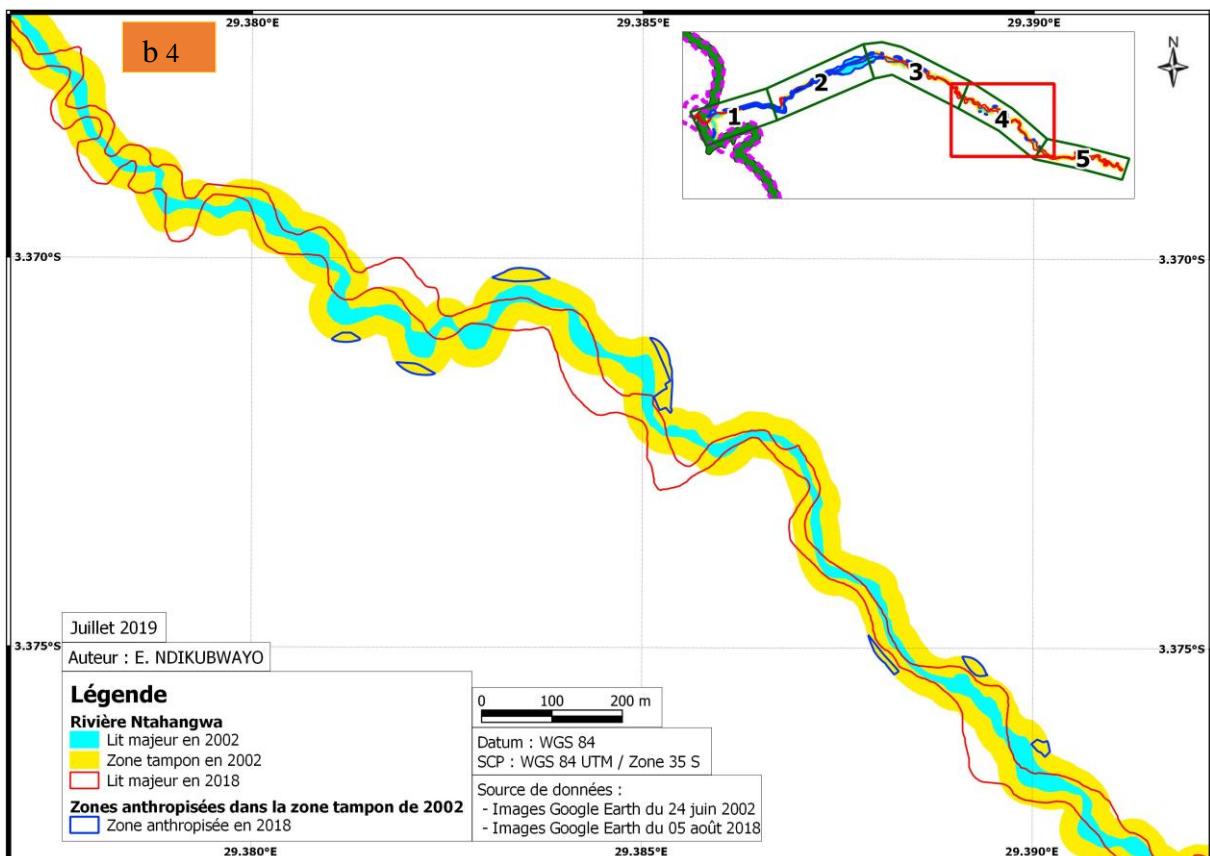




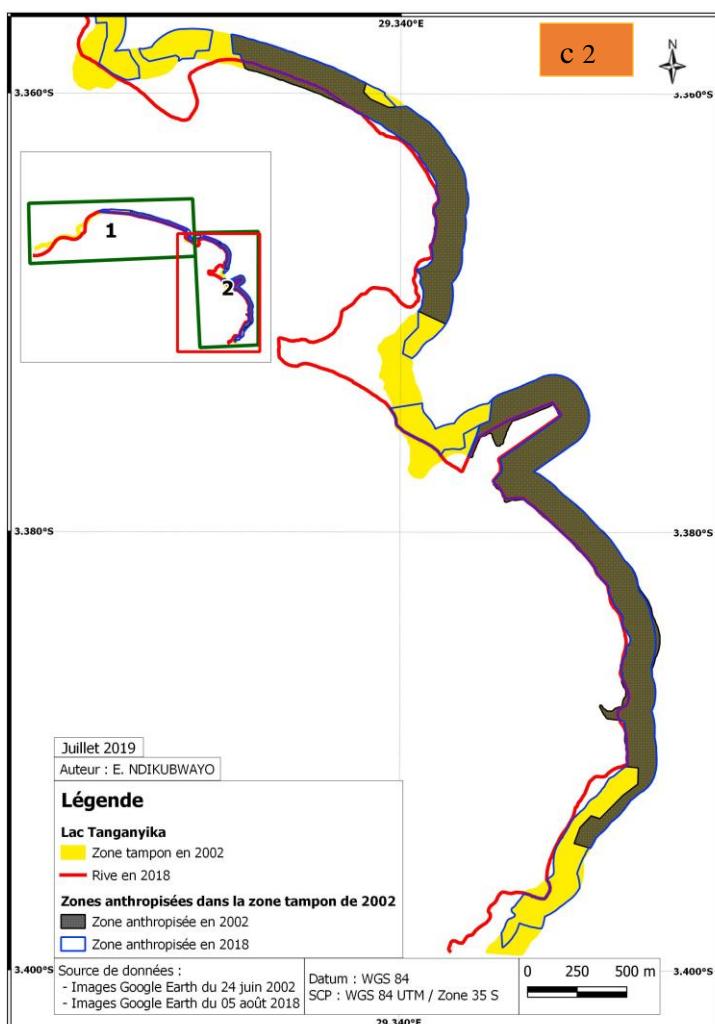
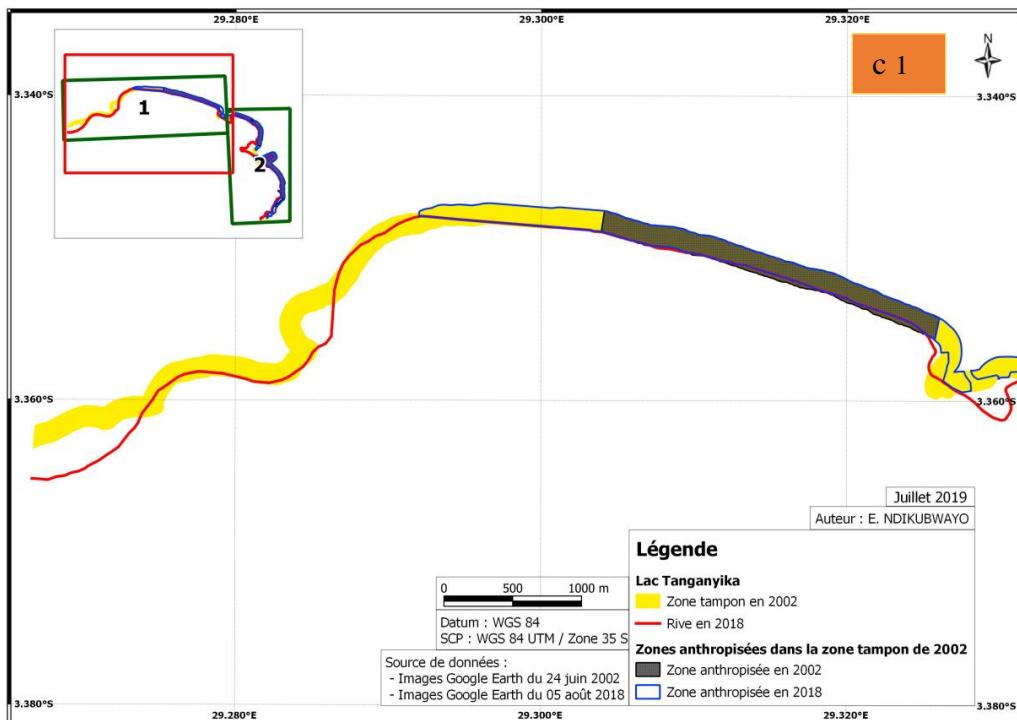
b. Rivière Ntahangwa





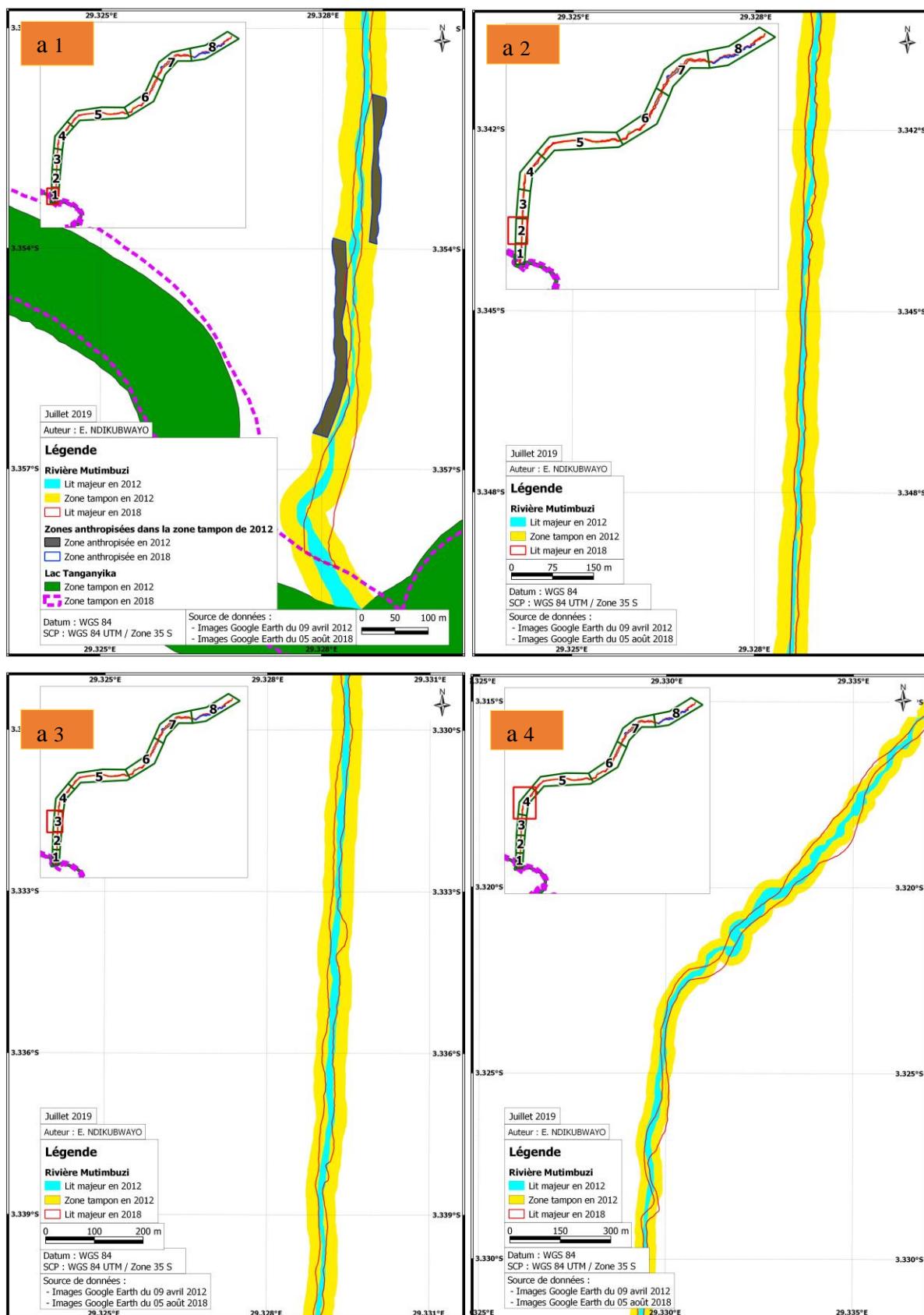


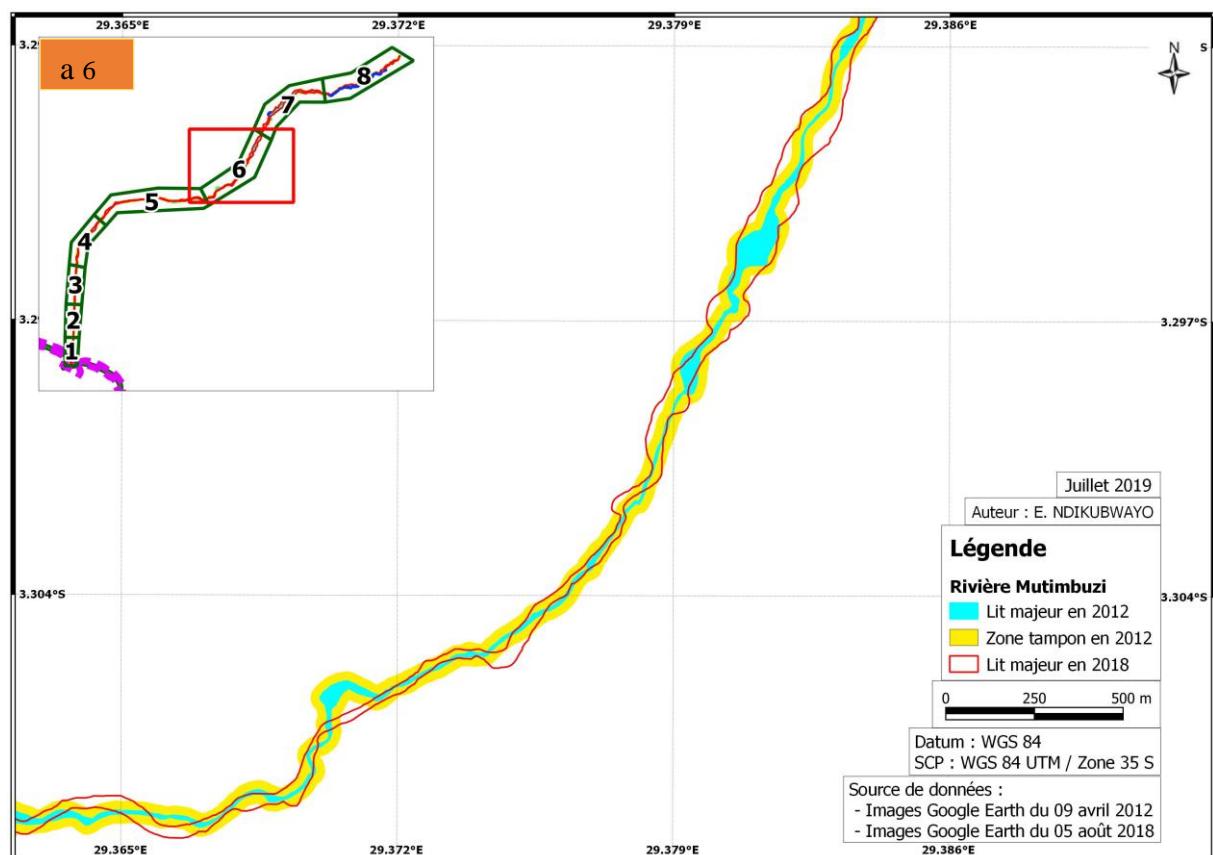
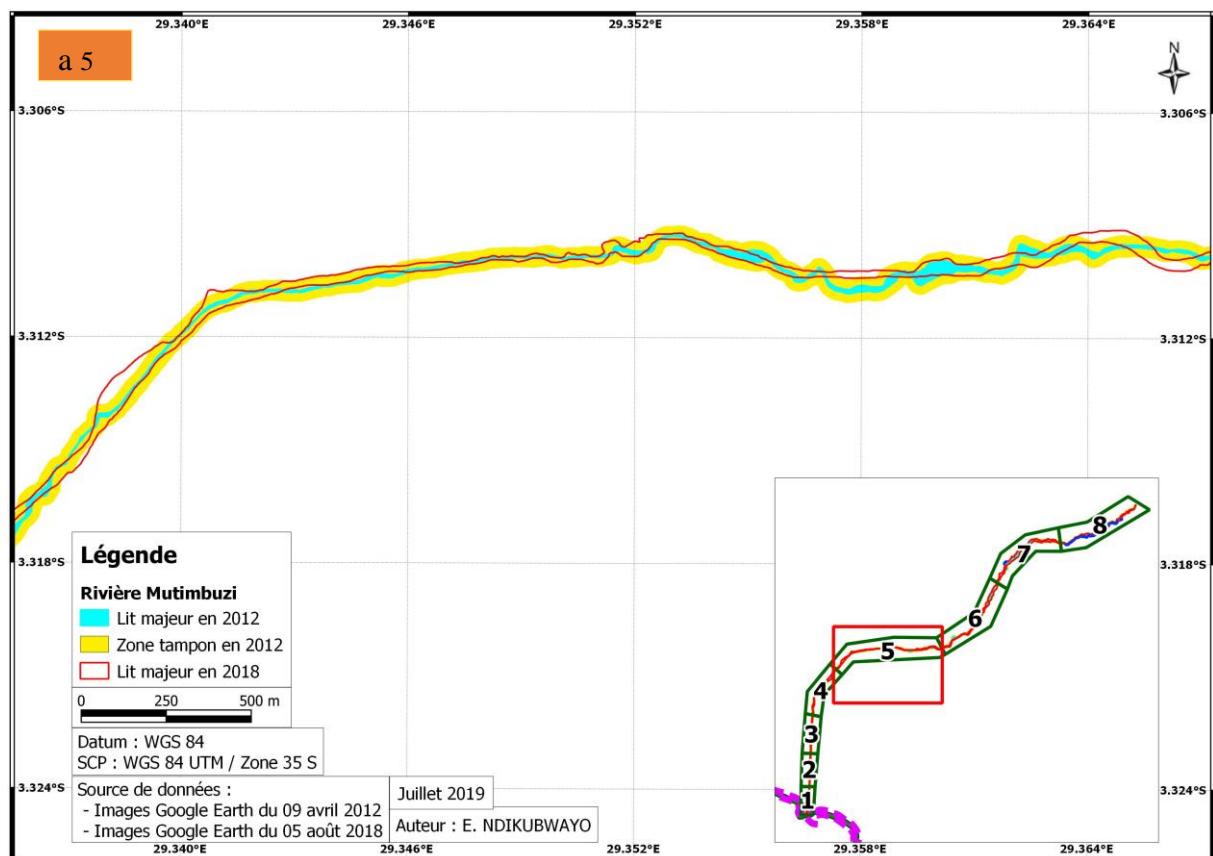
c. Lac Tanganyika

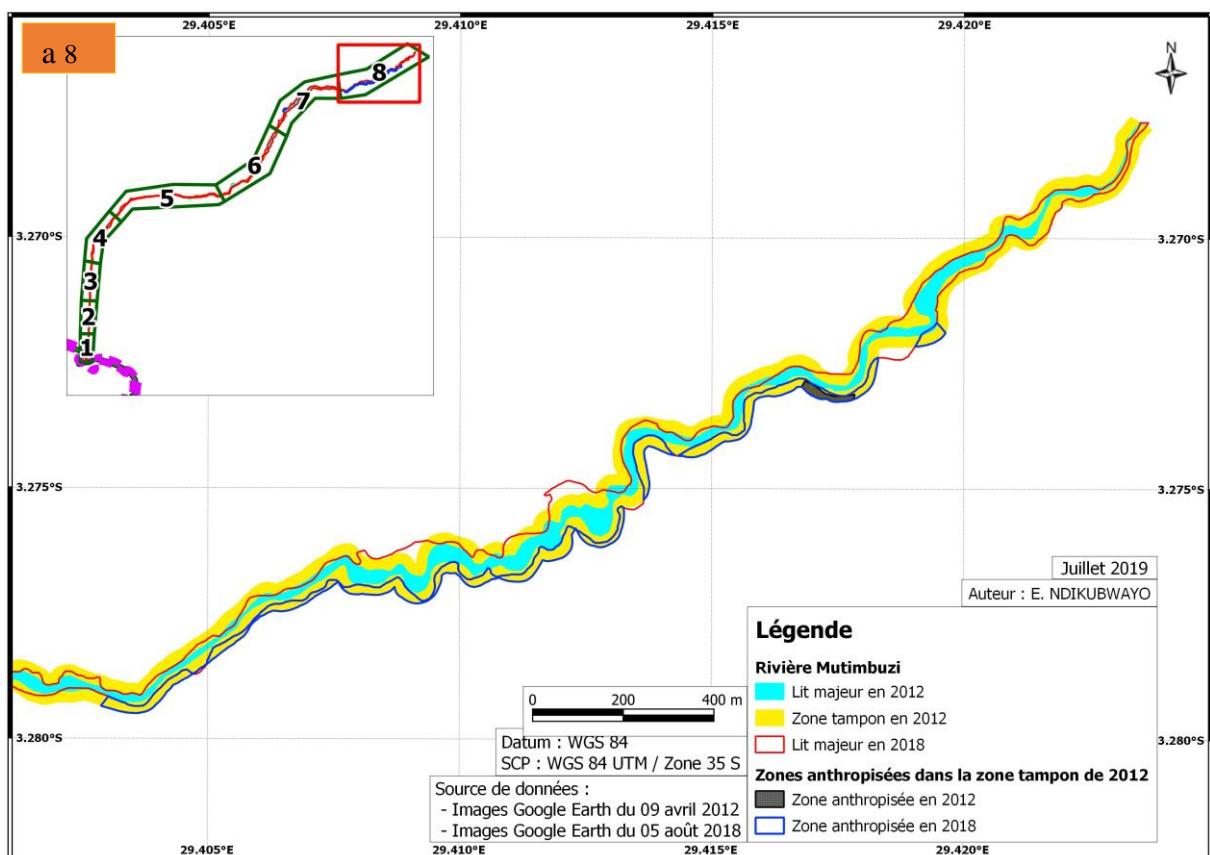
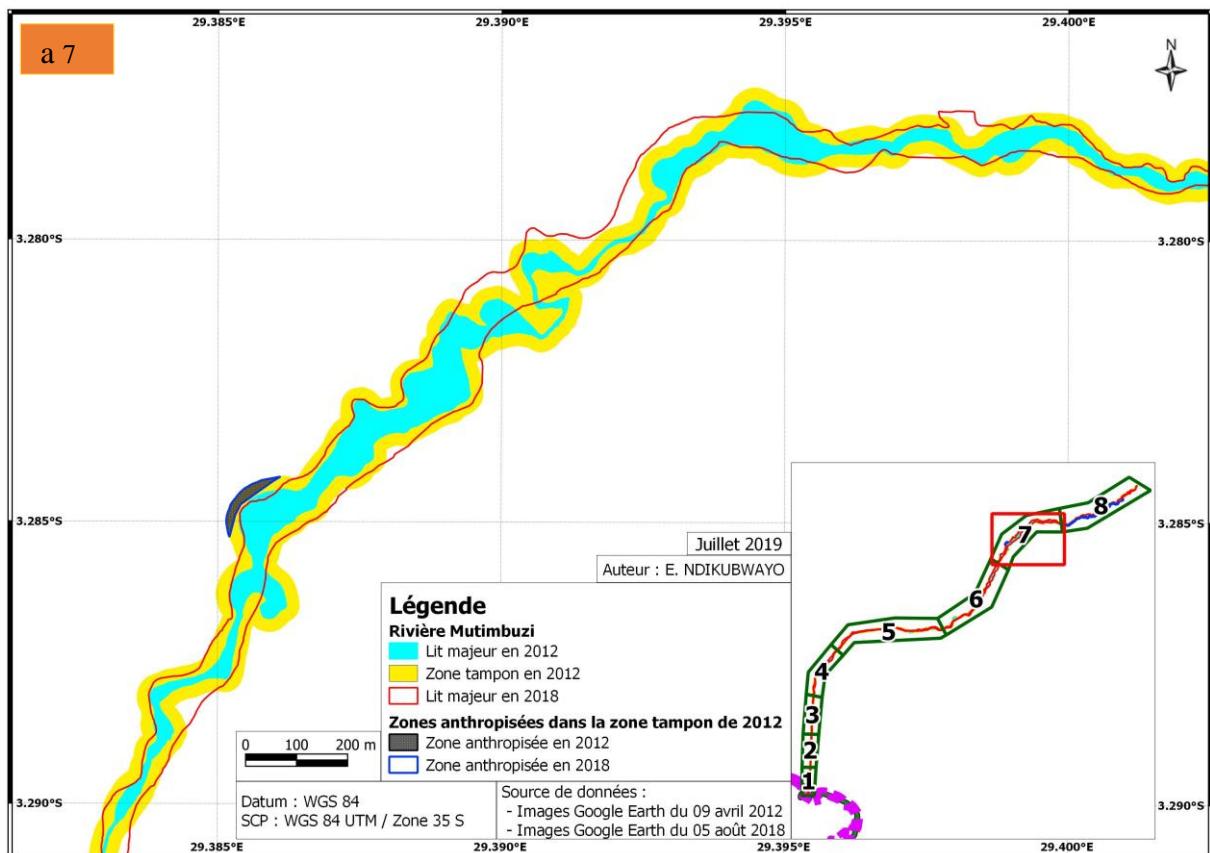


Annexe 4 : Atlas cartographique d'occupation du sol dans les zones tampons entre 2012 et 2018

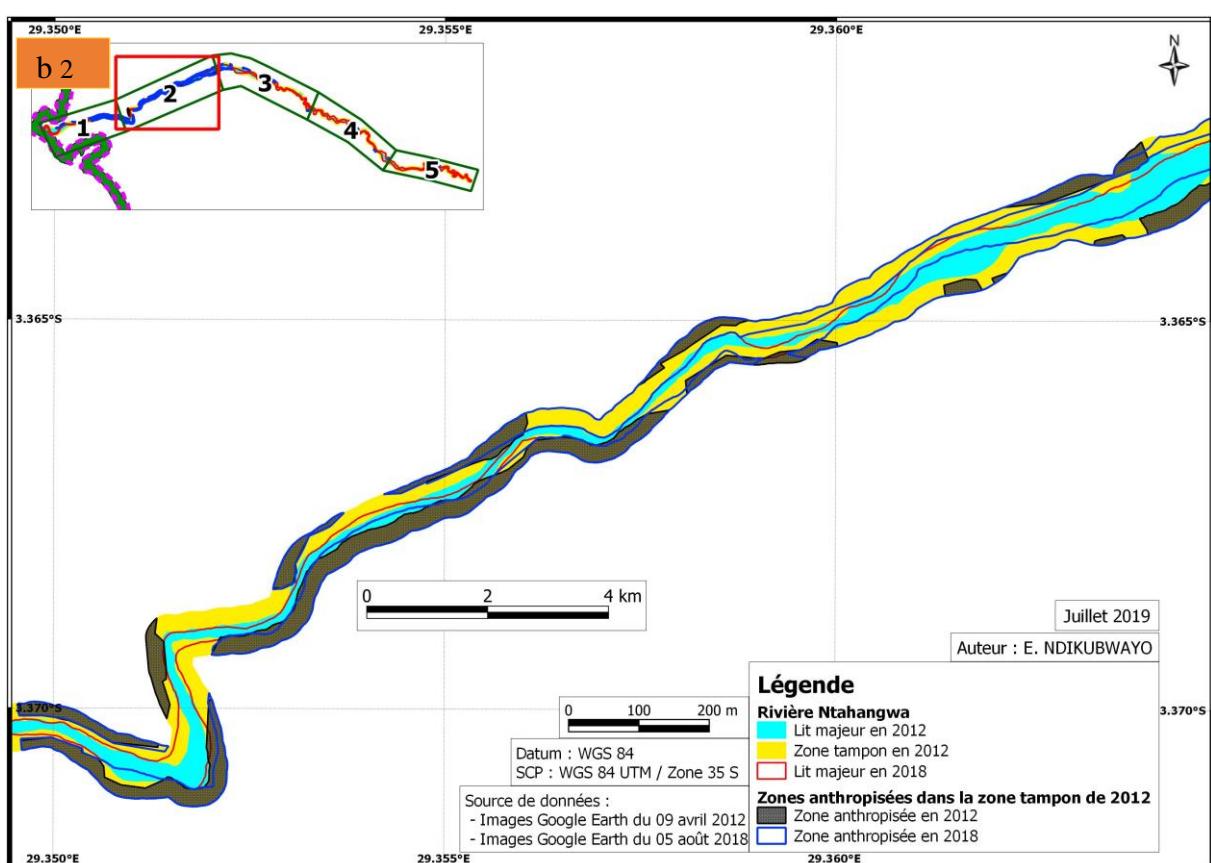
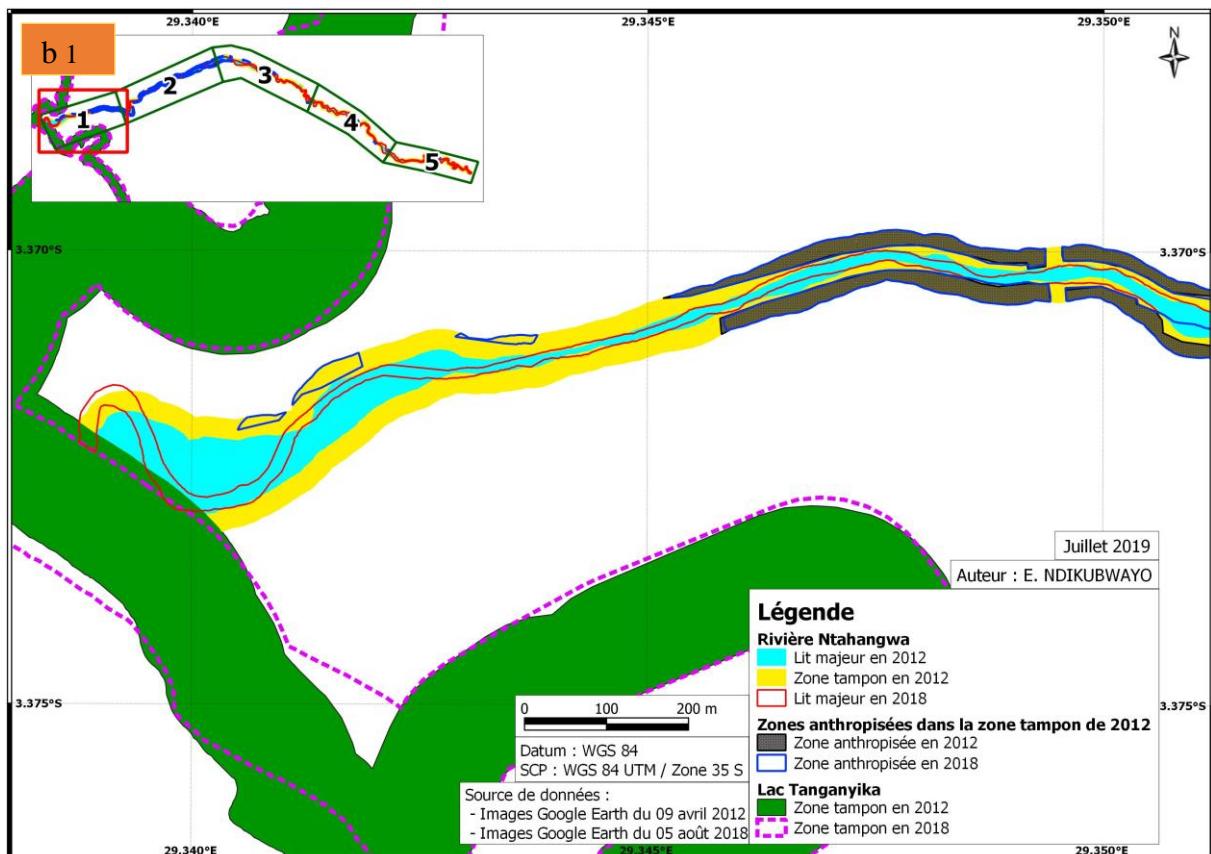
a. Rivière Mutimbuzi

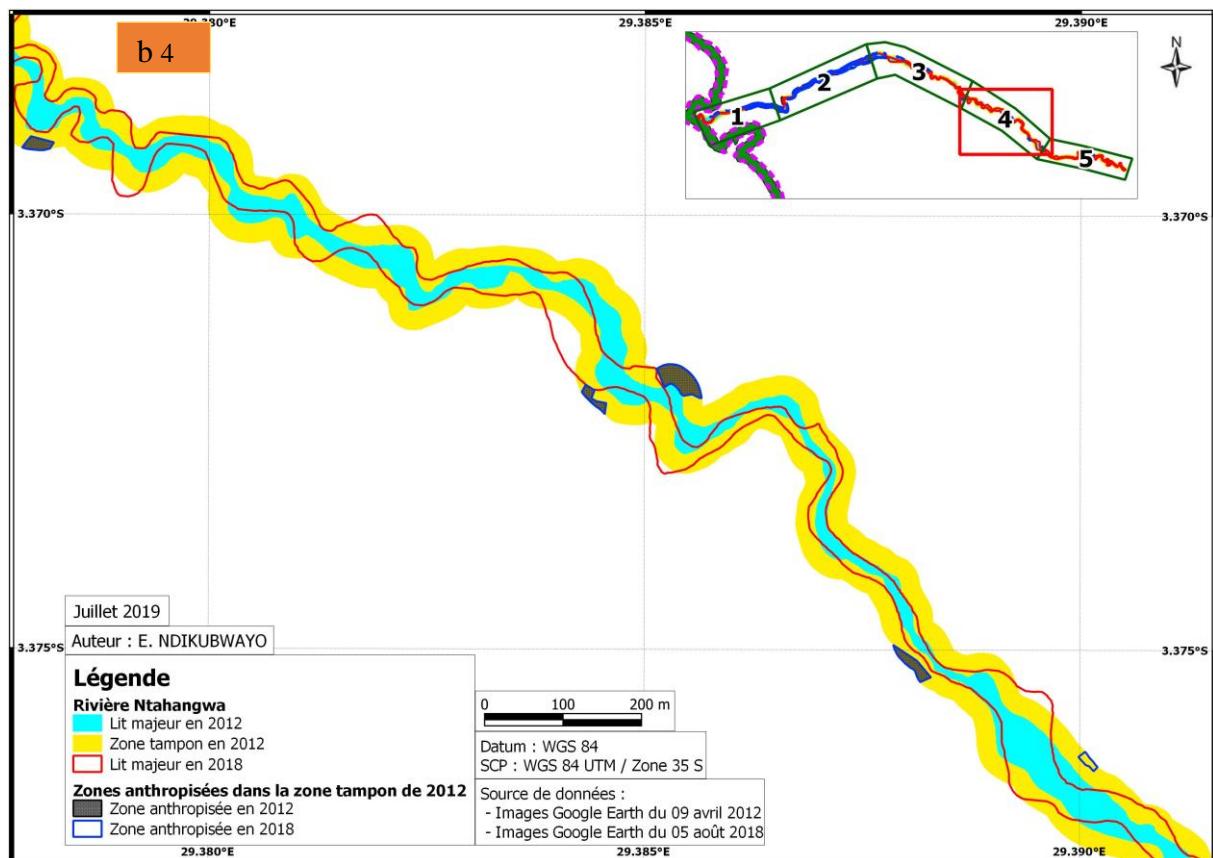
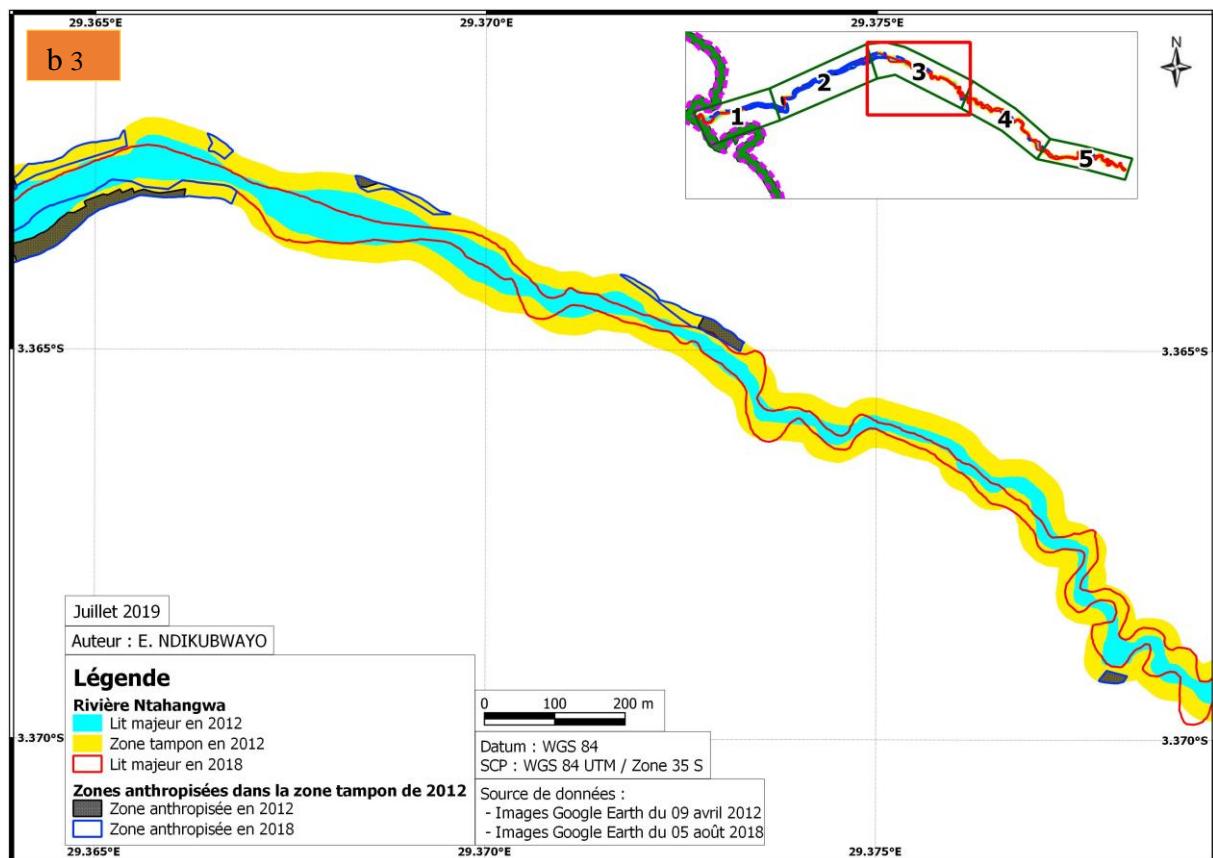


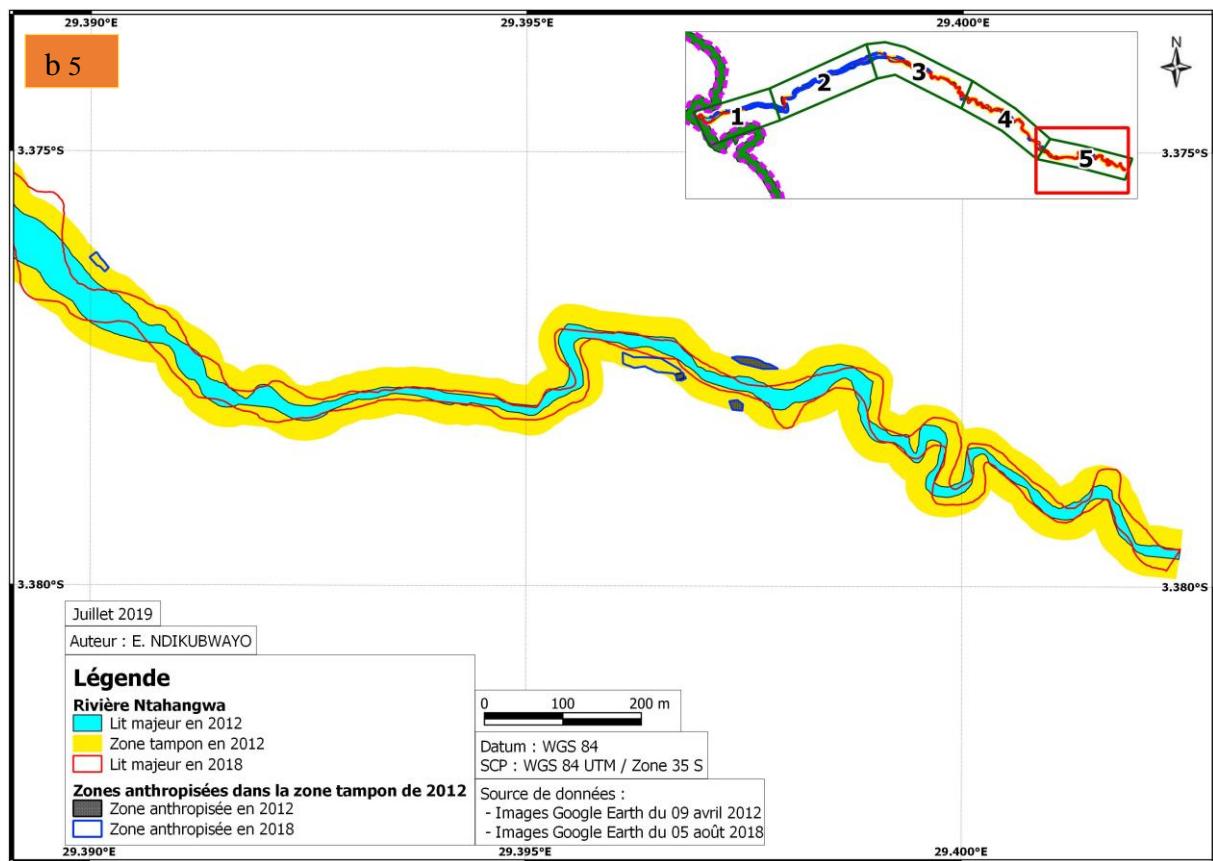




b. Rivière Ntahangwa







c. Lac Tanganyika

