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

Contribution des SIG dans l'évaluation prévisionnelle des impacts environnementaux physiques des exploitations du coltan de Kabarore, Nord-Ouest du Burundi

Mafuko Nyandwi, Blaise

2019-12
UB, Faculté des Sciences
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/156

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

UNIVERSITÉ DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

CONTRIBUTION DES SIG DANS L'ÉVALUATION PRÉVISIONNELLE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX PHYSIQUES DES EXPLOITATIONS DU COLTAN DE KABARORE, NORD-OUEST DU BURUNDI

PAR

Blaise MAFUKO NYANDWI



MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir :
Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement
Option : Génie de l'environnement

Identification des membres du Jury :

Président du Jury : Prof NDAYISHIMIYE Joël

Secrétaire du jury : Dr SINDAYIHEBURA Anicet

Directeur de mémoire : Louis NAHIMANA

BUJUMBURA, DECEMBRE 2019



Cette sœur (la planète terre) crie en raison des dégâts que nous lui causons par l'utilisation irresponsable et par l'abus des biens que Dieu a déposés en elle. Nous avons grandi en pensant que nous étions ses propriétaires et ses dominateurs, autorisés à l'exploiter.

La violence qu'il y a dans le cœur humain blessé par le péché se manifeste aussi à travers les symptômes de maladie que nous observons dans le sol, dans l'eau, dans l'air et dans les êtres vivants. C'est pourquoi, parmi les pauvres les plus abandonnés et maltraités, se trouve notre terre opprimée et dévastée, qui « gémit en travail d'enfantement ».

Pape François

Laudato Si'

2015

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Président du Jury : Prof NDAYISHIMIYE Joël

Secrétaire du jury : Dr SINDAYIHEBURA Anicet

Directeur de mémoire : Prof. Louis NAHIMANA

DEDICACE

À l'Immaculée Conception

Et à ceux qui œuvrent pour un monde plus durable.

REMERCIEMENTS

Merci !

Merci à vous qui lisez ce mémoire.

Merci à ceux qui m'ont formé et appris les Systèmes d'Information Géographique et la Gestion Intégrée de l'Environnement. Merci à ceux qui ont rendu ce travail possible.

Merci à la Nation Burundaise pour l'accueil, la fraternité et les accolades.

Merci pour les échanges scientifiques et partages d'expérience de vie quotidienne.

Merci pour les voyages et travaux pratiques. Merci pour les innombrables e-mails qui arrivaient dans ma boîte à tout instant, parfois tard dans la nuit et d'autres qu'il fallait envoyer avant minuit d'une certaine date bien précise. Merci pour les belles et documentées présentations power-point.

Merci pour les encouragements et les réconforts. Merci pour les soutiens de tout genre.

Merci à celle qui a accepté de me laisser partir étudier et supporter des longs jours de solitude.

Merci pour les week-ends, les brochettes et les fraîches bouteilles de malt Viva. Merci pour les activités sportives.

À vous tous qui étaient présents pendant mes études de Master, je dis merci !

Blaise MAFUKO NYANDWI

SIGLES ET ABREVIATIONS

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
AFNOR	Association Françaises de Normalisation
Art.	Article
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CaO	Monoxyde de calcium
CO_2	Dioxyde de carbone
COMEBU	Comptoir Minier des Exploitations du Burundi
CSLP	Cadre Stratégiques de Lutte Contre la Pauvreté
DAO	Dessin Assisté par Ordinaire
EIE	Étude d'Impact environnementale
EIES	Étude d'Impact environnementale et Social
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FAO	Foods and Agriculture Organisation
FV	Feuilles vertes
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GPS	Global Positioning Système
Ha	Hectare
IDW	Inverse Distance Weighting
ISABU	Institut des Sciences Agronomique du Burundi
Kg	Kilogramme
Km^2	Kilomètre carré
MES	Matières en suspension
MNT	Modèle Numérique de terrain
MV	Matière volatile
Nb-Ta	Niobium tantale
OBM	Office Burundais des Mines
ONG	Organisation Non Gouvernementale
PIB	Produit Intérieur Brut
PND	Programme National de Développement
PNIA	Programme National d'Investissement Agricole
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PNUE	Programmes des Nations Unies pour l'Environnement
S.A.	Société par action
SEEAC	Secretariat for Environmental Assessment in Central Africa
SIG	Système d'Information Géographique
Sn	Symbole chimique de l'étain
USD	United States Dollars

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation (modifié de la carte topographie du Burundi, feuille de Kayanza, IGN et ISABU, 1983)..... 8
Figure 2. Relief contrasté de Kabarore et hydrographie 9
Figure 3. Carte du bassin versant de la Mwogere(Turimumahoro, 2014) 10
Figure 4. Climat et mécanismes climatiques de la sous-région englobant Kabarore (Cazenave-Piarrot et al., 2015)..... 11
Figure 5. Carte pédologique du milieu d'étude (Modifié de la carte pédologique du Burundi) 12
Figure 6. Carte de distribution des filons en affleurement à Kabarore(Ntenge & Turimumahoro, 2010) 13
Figure 7. Répartition des exploitants artisanaux du Burundi en 2010 (Midende, 2010) 16
Figure 8. Évolution de la production du concentré de coltan à Kabarore en tonne (COMEBU, 2019; Denis Turimumahoro, 2014)..... 17
Figure 9. Les étapes du processus de l'EIE (Keita & Waaub, 2011; Sadler & McCabe, 2002) 21
Figure 10. Processus de découpage..... 29
Figure 11. Procédure de création des points 30
Figure 12. Création d'un MNT à partir des points par interpolation IDW 31
Figure 13. Créations des contours et table d'attribut..... 32
Figure 14. L'outil Topo to Raster des 3D Analyst Tools. 32
Figure 15. Model d'aspect après extraction..... 33
Figure 16. Extraction par "Mask"de la zone à calculer le volume 35
Figure 17. Étape du calcul de volume..... 36
Figure 18. Outils de création des points..... 38
Figure 19. Extraction des valeurs d'altitudes à partir des MNT multi années..... 39
Figure 20. Table d'attribut avec les valeurs d'altitude..... 39
Figure 21. Évolution comparative de la variation de la main d'œuvre par rapport à la production (COMEBU, 2019)..... 41
Figure 22. Situation 3D des carrières de Kivuvu 43
Figure 23. Situation 3D de Munege de 1980 et 2018..... 44
Figure 24. Carte des points de variation de volumes entre 1980 et 2018 de la zone découpée de la carrière de Kivuvu 46

Figure 25.. Carte des points de variation de volumes entre 1980 et 2018 de la zone découpée de la carrière de Munege 47
Figure 26. Localisation du bassin de sédimentation en aval des sites miniers et profil à long des drainages 51
Figure 27. Localisation des marais de la Mwogere et position des carrières de Munege et Kivuvu 53
Figure 28. Estimation de la superficie moyenne des parcelles de champ à Kabarore 54
Figure 29. Carte d'échantillonnage et données statistiques de la largeur mouillée de la zone non impactée 57
Figure 30. Carte d'échantillonnage et données statistiques de la largeur mouillée dans une zone impactée 58
Figure 31. Carte de localisation de la zone tampon de la Mwogere avec une portion zoomée du marais et zone tampon et calcule de la superficie 60
Figure 32. La pression démographique a un effet négative sur les rendements et les revenus (Desiere et al., 2013) 69
Figure 33. Évolution de la production (axe de gauche), rendement par hectare (axe de gauche) et surface cultivée (axe de droite) (Schuster et Ndimunbandi, 2018) 70
Figure 34. La pression démographique réduit la superficie cultivée par ménage et la possession du bétail (Desiere et al., 2013) 73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données SIG utilisées 28
Tableau 2. Descriptions des données spatiales 29
Tableau 3. Définition des variables de la modélisation 37
Tableau 4. Comparaison des volumes et surfaces des carrières entre la situation de 1980 et celle de 2018 45
Tableau 5. Scénarios de valorisation des marais de Mwogere 55
Tableau 6. Superficie de la zone tampon de 25 m de largeur et possibilités de valorisation ... 61

RÉSUMÉ

L'exploitation des ressources naturelles, particulièrement les ressources minérales, constitue l'une des sources des revenues les plus importantes pour les pays en voie de développement. Cependant, leurs extractions s'accompagnent par la destruction de l'environnement et impactent d'autres secteurs économiques, comme l'agriculture.

Le Burundi a investi dans l'exploitation du coltan à Kabarore au Nord-Ouest du Pays. Autour des carrières, la dégradation du paysage et l'envahissement de la Mwogere et ses marais par les rejets miniers ont impacté le secteur agricole et pollué les ressources en eau. Ce travail a évalué ces impacts environnementaux physiques en utilisant les SIG et proposé des mesures d'atténuation. Il s'est démontré que les débris des roches découpés dans les carrières sont drainés dans les cours d'eau, augmentant ainsi leur pouvoir érosif et conduisant à un envasement des bas-fonds. Ainsi, le paysage a été remarquablement modifié et dégradé entre 1980 et 2018.

La construction d'un bassin de décantation en sortie des carrières et la végétalisation des berges de la rivière Mwogere par le bambou seraient des mesures d'atténuation efficaces. Et de cette manière, après la restauration des terres des marais de la Mwogere, plusieurs activités de développement durable pourront être valorisées : l'agriculture, l'élevage en stabulation avec les feuilles de bambou comme fourrage, la séquestration du carbone par le bambou, le développement de l'artisanat de la filière bambou et la briqueterie à partir du kaolin décanté. Ces activités de protection de l'environnement, contribueront aussi à la réduction du chômage, la promotion du genre et l'augmentation des revenus mensuels des ménages de Kabarore. Ainsi, ces activités résorberaient la non-durabilité des activités minières et contribueraient au développement durable de Kabarore en particulier et du Burundi en général.

ABSTRACT

Exploitation of natural resources, particularly mineral resources, is one of the most important sources of revenue for developing countries. However, their extractions are accompanied by the destruction of the environment and disturbed other economic sectors, such as agriculture.

Burundi has invested in coltan exploitation at Kabarore in the north-west of the country. Around the quarries, the degradation of the landscape and the invasion of the Mwogere and its marshes by mining discharges have impacted the agricultural sector and polluted water resources. This work assessed these physical environmental impacts using GIS. It has been shown that rock debris cut from quarries are drained into streams, increasing their erosive power and leading to siltation of the lowlands. Thus, the landscape was remarkably modified and destroyed between 1980 and 2018.

The construction of a settling pond at the quarry exits and the revegetation of the banks of the Mwogere River by bamboo would be effective mitigation measures. And in this way, after the restoration of the Mwogere marshes lands, several sustainable development activities can be valorized: agriculture, breeding in stabling with bamboo leaves as fodder, carbon sequestration by bamboo, the development of handicrafts in the bamboo sector and brick making from decanted kaolin. These environmental protection activities will also contribute to reducing unemployment, promoting gender and increasing monthly household income in Kabarore. Thus, these activities would reduce the non-sustainability of mining activities and contribute to the sustainable development of Kabarore in particular and of Burundi in general.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

SIGLES ET ABREVIATIONS iv

LISTE DES FIGURES v

LISTE DES TABLEAUX vi

RÉSUMÉ vii

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIERES ix

AVANT PROPOS xiii

CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE 1

1.1. Contexte et Problématique 1

1.2. Objectifs de recherche 5

1.2.1. Objectif global 5

1.2.2. Objectifs spécifiques 5

1.3. Question de recherche et hypothèses 5

1.4. Organisation du travail 6

CHAPITRE II. METHODOLOGIE DE COLLECTE DES DONNEES 7

2.1. INTRODUCTION 7

2.2. GENERALITES SUR LE MILIEU D'ETUDE 7

2.2.1. Cadre géographique 7

2.2.2. Cadre géologique de Kabarore 12

2.3. CADRE CONCEPTUEL : LES SIG ET LEURS APPLICATIONS DANS LA PREVISION ENVIRONNEMENTALE 18

2.3.1. Généralités sur le processus d'EIES comme outils de prévision environnementale 18

2.3.2. Évolution et cadre institutionnel des Études d'Impact Environnemental et Social (EIES) au Burundi 24

2.4. MATERIELS ET METHODES 27

2.4.1. DONNEES, ACQUISITIONS ET PRÉTRAITEMENT 28

2.4.1.1. Données et acquisitions 28

2.4.1.2. Prétraitement des données 28

2.4.1.3. Rééchantillonnage du MNT 30m de 2018 à 10 m de résolution 30

2.4.2. DEMARCHES METHODOLOGIQUES 31

2.4.2.1. Volume des masses de terres excavées lors de l'exploitation 31

2.4.2.2. Modélisation et prédiction de l'évolution du volume des terres excavées 37

2.4.2.3. La différence de niveau entre deux MNT de 1980 et 2018 37

2.4.2.4. Cartographie des vallées de la Mwogere envahies par les rejets miniers et débris des roches 39

2.4.2.5. Détermination du coût de l'inaction de la dégradation des marais de la Mwogere en production agricole 40

CHAPITRE III. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS 41

3.1. Introduction 41

3.2. Statistique de production minière de coltan de Kabarore 41

3.3. Dégradation du paysage et prévision de la réduction des volumes des carrières 43

3.3.1. Comparaison des dimensions spatiales des carrières entre 2011 et 2018 43

3.3.2. Variations des volumes, surfaces 2D et 3D des carrières entre 2011 et 2018 45

3.3.3. Localisation des variations de volume 46

3.3.4. Interprétation 48

3.4. POSITIONNEMENT DU BASSIN DE DÉCANTATION EN AVAL DES SITES D'EXPLOITATION 51

3.4.1. Carte de localisation 51

3.4.2. Interprétation 51

3.5. ÉVALUATION DE L'ENVAHISSEMENT DES MARAIS DE LA MWOGERE PAR LES DÉBRIS DES ROCHES ISSUES DES CARRIÈRES 53

3.5.1. Superficie des marais de la Mwogere et scénarios de valorisation 53

3.5.2. Interprétation 56

3.6. PERTURBATIONS HYDROMORPHOLOGIQUES DE LA MWOGERE PAR LES DÉBRIS DES ROCHES ISSUES DES CARRIÈRES 57

3.6.1. Comparaison des largeurs mouillées d'une zone impactée de la Mwogere et d'une autre zone non-impactée 57

3.6.2. Interprétation 59

3.7. STABILISATION DES BERGES DE LA MWOGERE 60

3.7.1. Superficie de la zone tampon de 25m de largeur 60

3.7.2. Superficie et valorisation de la zone tampon 61

3.7.3. Interprétation 61

CHAPITRE IV. DISCUSSION DES RESULTATS ET MESURES D'ATTENUATION 63

4.1. INTRODUCTION 63

4.2. DÉGRADATION DES PAYSAGES DE KIVUVU ET MUNEGE 63

4.2.1. La réduction des volumes des carrières 63

4.2.2. Mesure d'atténuation 65

4.3. DÉGRADATION DES TERRES DU MARAIS DE LA MWOGERE 67

4.3.1. Répartition du marais restauré de la Mwogere en champs agricoles 67

4.3.2. Mesure d'atténuation 68

4.4. DISFONCTIONNEMENT HYDROMORPHOLOGIQUE DE LA MWOGERE 71

4.4.1. La charge solide et disfonctionnement hydromorphologique de la Mwogere 71

4.4.2. Mesure d'atténuation 71

4.5. OPPORTUNITÉS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE AUTOUR DES MINES 74

4.5.1. Agriculture dans les marais : moteur de développement et promotrice du genre 74

4.5.2. Bambou, solution écologique et filière du développement durable 75

4.5.3. Briqueterie sous la technologie HydraForm : Solution de rentabilisation de l'exploitation des ressources naturelles non renouvelables et potentiel d'essor économique à Kabarore 77

CHAP V. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS 78

5.1. CONCLUSION GENERALE 78

5.2. RECOMMANDATIONS 79

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 80

AVANT PROPOS

L'environnement et le développement durable exige que l'exploitation minière se base sur la technique de prévention. La plupart des exploitations minière en Afrique et plus particulièrement au Burundi, se font sans une étude préalable d'impact environnementale. Cette étude décrit et analyse les impacts environnementaux dans les exploitations minières à Kabarore. Nous y proposons aussi des mesures d'atténuation et de prévention basées sur des méthodes écologiques. Nous y proposons une méthodologie quantitative d'évaluation des impacts environnementaux basés sur les systèmes d'informations géographiques.

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont de nos jours un outil innovant et permettent une intégration organisationnelle de données de sources différentes. Autrement dit, c'est un système qui assure la collecte, le stockage, l'analyse et la visualisation de données. Les SIG nous offrent les outils d'aide à la prise de décision. Ils peuvent bien relever le défi en prévention d'impact environnemental dans le secteur minier artisanale. Cette étude propose donc une démarche d'évaluation basée sur les SIG pour quantifier les impacts miniers artisanales dans les mines de Kabarore.

De la quantification temporelle des volumes des terres excavées au du changement du paysages, de l'évaluation de la surface dégradée dans les vallées à des propositions des mesures d'atténuations écologiques, ce travail constitue une contribution considérable dans l'évaluation d'impacts environnementaux à Kabarore.

CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte et Problématique

Au Burundi, comme dans le reste de l'Afrique, la population est dépendante des ressources naturelles. Le plus souvent, c'est l'exportation des matières premières issues du secteur extractif qui apportent les devises au pays et stabilise le PIB. Cette dépendance à l'exploitation des ressources naturelles particulièrement les substances minérales, provoquent de graves problèmes environnementaux. Il s'agit entre autres de la désertification et de la dégradation des sols, de l'insécurité alimentaire croissante, de la raréfaction des ressources en eau, de la fragmentation et la destruction des écosystèmes... C'est pourquoi les études d'évaluation environnementales ont été initiées dont l'Étude d'Impact Environnementale et Social (EIES) et ont pris de plus en plus d'importance dans les prises de décision en matière de développement (SEEAC, 2013). La Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement précise à ce sujet qu'« une étude d'impact sur l'environnement, en tant qu'instrument national, doit être entreprise dans le cas des activités qui risquent d'avoir des effets nocifs importants sur l'environnement et qui dépendent de la décision d'une autorité nationale compétente» (Nations Unies, 1992).

Depuis deux décennies, la Région des Grands Lacs connaît un boom minier sans précédent. Cet essor attire des dizaines de milliards de dollars en investissements extérieurs et se traduit par une croissance et un développement économiques substantiels, mais comporte également de grands risques pour les sociétés africaines et l'environnement. C'est le cas du Burundi. En effet, le Burundi possède une vaste gamme de gisements de minéraux, dont l'étain, le tantale et le tungstène, ainsi que l'or, qui constituent ses principales exportations. Le sous-sol du Burundi comprend également le nickel, les terres rares, le vanadium et les matériaux de construction (Midende, 2010; Word Bank, 2016). L'extraction minière est en grande partie effectuée en exploitation minière artisanale et à petite échelle, officiellement structurée par le biais de coopératives. L'étain, le tantale, le tungstène sont exploités dans les provinces du Nord, spécialement dans la Commune de Kabarore à Munege et Kivuvu où cette étude s'est focalisée.

Le Plan National de Développement du Burundi 2018-2027 (REPUBLIQUE DU BURUNDI, 2018)soutient que le potentiel minier est non encore exploité. Pour le développer et le transformer en un véritable moteur de croissance, il faut beaucoup de mesures d'accompagnement, dont la mise en place du cadre légal et réglementaire, l'intensification des recherches minières, l'appui et l'encadrement des artisanaux miniers, la facilitation au

regroupement en coopératives, l'encouragement de la transformation des minerais sur place ainsi que le renforcement de la transparence. Nous constatons que des trois piliers du développement durable, seulement les piliers économique et social sont pris en compte par le PND pour relever le secteur minier du Burundi. Le pilier environnement n'est pas concerné pour le secteur minier. Et pourtant, Ifri-Bdi (Vircoulon, 2019) et d'autres études (Midende, 2010; Nahimana & Sendegeya, 2008) ont constaté que le secteur minier burundais est plus artisanal qu'industriel et est caractérisé par l'informalité, des techniques archaïques et des pratiques frauduleuses susceptibles d'accroître les impacts sur l'environnement. Le Plan de Développement du National du Burundi 2018-2027 n'ayant pas tenu compte de l'environnement minier de façon spécifique comme le troisième pilier du développement durable, ce dernier risquerait d'être un facteur limitant l'essor de ce secteur. Et le coût de l'inaction serait difficile à résorber pour la phase d'après mines.

Les sites de Kivuvu et Munege, concernés par cette étude, sont tenus par la COMEBU. Lors de l'obtention de cette concession en 1976, la convention entre l'État Burundais et la COMEBU stipule que cette dernière devrait remettre un circuit économique sur le lieu d'exploitation lors de la fermeture de la mine. Aussi lors du renouvellement de la convention aucune EIES n'a été élaborée. Sans la prévision environnementale, le développement issu du secteur minier de Kivuvu et Munege ne serait pas durable mais seulement apparent. Et d'ailleurs, d'autres chercheurs qui nous ont précédé ont relevé plusieurs cas systématiques d'impacts environnementaux perceptibles dans la commune de Kabarore dus aux exploitations minières.

Les impacts environnementaux dans la commune de Kabarore dus aux exploitations minières de coltan ont déjà fait l'objet de plusieurs études. Nous en présentons ici quelques-unes tout en spécifiant leurs résultats et leurs limites par rapport à notre travail.

NIYOKINDI (2013) note que les impacts environnementaux sont : l'érosion (ravinements et glissement de terrain), la dégradation (perte de fertilité), perte de terrains cultivables (dépôts d'alluvions dans les champs), la perte du couvert végétal dont le déboisement, et pour le cas spécifique de l'eau : la pollution (turbidité et changement de couleur), le dépôt de sédiments et déviations du lit des cours d'eau. Pour chaque type d'impact, l'auteur propose aussi des mesures d'atténuation dont la végétalisation des berges des rivières et la construction des bassins de décantation en aval des carrières. Ces impacts ont été aussi signalé par TURIMUMAHORO, 2014 mais tout en les définissant et les caractérisant. Et cet auteur a abouti à la définition et à la caractérisation des impacts suivants :

- Dégradation du paysage : où il affirme qu'il y a beaucoup des morts terrains et des stériles déposés au-dessus du sol sous forme des terrils.
- Destruction du couvert végétal : des activités minières entraînent un déboisement accélérant l'érosion.
- Alluvionnement des zones des bas-fonds : les marais de la rivière Mwogere en aval des sites de Kivuvu et Munege, les larges vallées de la rivière Mwogere occupées il y a quelques années par des cultures de marais se remplissent actuellement par des alluvions.

C'est sur base de certaines de ces études de caractérisation et de description des impacts environnementaux que plus tard se fera la première tentative de la modélisation des impacts environnementaux et la quantification chimique de la pollution dont la turbidité et autres caractéristiques physico-chimiques. En effet, en 2010 après avoir énuméré les impacts physiques, NTENKE et TURIMUMAHORO, ont essayé de modéliser grossièrement le volume de terre déplacé en utilisant une MNT produit de la carte topographique de 1980 et une MNT produit à partir d'une campagne de terrain au GPS. Les auteurs ont obtenu un volume de différence de 626.910 m^3. Et ils ont estimé considérant les deux carrières identiques à 1.253.820 m^3 le volume total pour les carrières de Kivuvu et Munege. Considérant la durée de 30 ans, ils ont trouvé 62.691 m^3 de terres décapées par an. Et dans leur estimations, l'exploitation pourrait durer 78.622 années, tout en précisant beaucoup de facteurs qui pourront réduire sensiblement ce délai (NTENKE et TURIMUMAHORO , 2010).

Des études de caractérisation et de la quantification physico-chimique de la pollution dans les sites de Kivuvu et Munege ont été faites aussi par NDUWAYEZU en 2013. Il a estimé et caractérisé, après une campagne de terrain au GPS, les espaces envahies par les alluvions d'origine minière. Et il a abouti aux résultats suivants (Nduwayezu , 2013) :

- État de 2013 : Les zones occupés par les alluvions grossières (Blocs-cailloux-graviers et gravier-sable) ne sont pas exploitées (3,60%), les zones à alluvions de granulométrie moyenne (cailloux-graver-sable et sable) sont exploitées temporairement (54,9%) et les zones à alluvions fins (limon-sable) sont cultivés (41,50%).
- Il note aussi que les cultures environnantes sont inondées et on y remarque les charriages de matériaux dans les lits de rivières et ruisseaux augmentant ainsi le pouvoir érosive des affluents et de la rivière elle-même.

Cinq ans avant NDUWAYEZU et SENDEGEYA avaient caractérisé la turbidité et conclu que la turbidité des eaux de la Mwogere était fortement liée aux activités minières. En effet, cet auteur a estimé le taux de la turbidité des eaux de la rivière Mwogere et a constaté que (SENDEGEYA M., 2008) :

- La couleur de l'eau est brune ou de tendance brune quand la charge (turbidité) est élevée tandis qu'elle est claire quand la charge est faible.
- Quand la charge augmente, la granulométrie du sédiment du sédiment varie du sable fin au gravier.
- Les zones sources d'eaux pollués son essentiellement Kibuba, Kivuvu et Munege.
- La cartographie de l'évolution de la turbidité montre qu'elle est uniformément répartie le long de la rivière Mwogere et de ses affluents mais en étant maximale au niveau des zones d'exploitation minière.

En 2013, au-delà de la turbidité KATARAZA M.et SINARINZI , 2013 ont détecté dans ces eaux aussi la présence des métaux magnétiques. Leurs résultats prouvent que les ruisseaux affluents de la Mwogere sont plus chargés en MES que la Mwogere et sont responsables de la turbidité élevée dans la Mwogere. En fait, ce sont ces ruisseaux qui transportent les matières des zones d'exploitation. Ils notent aussi la présence des métaux magnétiques dans la rivière issue toujours des exploitations minières. Ce sont les sédiments grossiers qui sont plus magnétiques (13,15%) que les sédiments fins (10%).

Sur le plan d'utilisation des SIG, Nkurunziza JBet Niyonzima , 2014 ont démontré que l'utilisation des SIG dans l'établissement d'une géodatabase est utile au Burundi. Lors de leur tentative de contribuer à la création d'une géodatabase, ils ont noté qu'il faut tenir en compte aussi les impacts environnementaux physiques liés aux exploitations de coltan et cassitérite dont la déforestation, la destruction des champs de culture, la pollution de l'eau et la dégradation du paysage.

Considérant les études précédentes, nous constatons que les recherches sur les impacts environnementaux se sont limités qu'à une simple catégorisation et caractérisation. En outre, les solutions proposées sont plus curatives que préventives. Et il faut prendre en en compte aussi que les méthodes utilisées précédemment pour modéliser et quantifier les impacts étaient grossières. Il s'avère donc nécessaire d'initier des études dans une approche préventive et utilisant des outils nouveaux et innovateurs des SIG, d'où le bienfondé de cette étude qui porte sur la contribution des SIG dans la prévision des impacts environnementaux physiques des exploitations de colombo-tantalite à Kivuvu et Munege (Nord-Ouest du Burundi).

En outre, le Burundi connaissant une exiguïté des terres agricoles et l'agriculture étant le moteur de son économie (le plus souvent elle est concentrée dans les marais, parfois pollués par les rejets des exploitations minières comme dans notre cas), une étude de prévision environnementale dans une perspective de développement durable, (tenant en compte l'économie, l'environnement et le social) est nécessaire pour la commune de Kabarore située dans la province densément peuplée (REPUBLIQUE DU BURUNDI, 2018).

1.2. Objectifs de recherche

1.2.1. Objectif global

L'objectif global de cette étude est de fournir une démarche prévisionnelle des impacts environnementaux physiques en utilisant les outils de SIG tout en caractérisant les impacts environnementaux liés aux exploitations minières artisanales de Kabarore.

1.2.2. Objectifs spécifiques

- Modéliser le volume des terres décapées dans les carrières de Munege et Kivuvu à partir d'une combinaison des MNT à des périodes différentes ;
- Prévoir dans deux prochaines décennies les volumes de terres à être décapés encas où la méthode d'exploitation ne change pas ;
- Évaluer les surfaces dans les marais de Mwogere envahies par les rejets miniers utilisant les SIG ;
- Calculer le coût de l'inaction en cas où ces vallées étaient aménagées pour l'agriculture,
- Prévoir, des mesures d'atténuation et de réparation pour les zones dégradées dans les marais et les berges de la Mwogere.

1.3. Question de recherche et hypothèses

Les études de prévision environnementale étant multidisciplinaires, le développement des méthodes quantitatives se sont développés. Par contre l'archivage des données dans les pays en voie de développement font parfois défaut. Développer une démarche spatio-temporelle utilisant les outils SIG de libre accès est la question de recherche principale à la quelle réponde cette étude sur la commune de Kabarore au Burundi.

Vue la géologie de la région de Kabarore et les modes d'exploitation utilisés à Kivuvu et Munege, nous pouvons avancer les hypothèses suivantes :

Hypothèse1 : Le volume des terres abattues serait de plusieurs milliers de m^3 car les filons de pegmatite exploités sont contenus dans des roches métamorphiques altérées et ce volume changerait annuellement ou par période de temps selon les périodes d'exploitation.

Hypothèse2 : La charge minérale en suspension issue des exploitations minières augmenterait le pouvoir érosif des cours d'eau autour des carrières.

Hypothèse3 : Avec les techniques d'exploitation rudimentaires, les rejets miniers et débris des roches rejetés dans les cours d'eau conduiraient à l'envahissement des sédiments dans les marais de la Mwogere qui auraient été utilisés pour l'agriculture et la valeur du coût de l'inaction serait considérable pour les revenus de la commune Kabarore.

Hypothèse4 : La construction d'un bassin de décantation des eaux issues des mines, la restauration des terres dégradées dans les marais de la Mwogere, la végétalisation de ses berges mais aussi la révision des modes d'exploitations seraient des mesures d'atténuation curatives et ultérieurement préventives pour ces exploitations minières.

1.4. Organisation du travail

Outre l'introduction générale et la conclusion générale, cette étude est structurée en cinq chapitres. Le chapitre premier porte sur les généralités sur le milieu d'étude et le cadre théorique. Le deuxième chapitre décrit les matériels utilisées et leur pré-traitement mais aussi il détaille les démarches méthodologiques qui ont servis pour obtenir les résultats qui sont présentés et interprétés au chapitre troisième. Le quatrième chapitre constitue une discussion des résultats et le dernier comprend une proposition des mesures d'atténuation des impacts environnementaux physiques dans une perspective de développement durable. Enfin le dernier chapitre porte sur un essai d'analyse des opportunités de développement durable pour résorber la non durabilité de l'exploitation minière dans la commune de Kabarore.

CHAPITRE II. METHODOLOGIE DE COLLECTE DES DONNEES

2.1. INTRODUCTION

Ce chapitre porte sur une démarche méthodologique de collecte de travail et une présentation du milieu du travail. La première partie présente le milieu d'étude sur deux aspects : géographique et géologique. Sur le plan géographique ce chapitre localise la commune de Kabarore comme milieu d'étude tout en décrivant son relief, sol, climat et végétation et son hydrographie. Par contre sur le plan géologique, nous décrivons la lithologie tout en insistant sur la tectonique de la région mais aussi sur son contexte de minéralisation en colombo-tantalite.

La seconde partie de ce chapitre porte sur un cadre conceptuel où nous présentons les termes clés et principes d'utilisation des SIG dans les études d'évaluation environnementales.

2.2. GENERALITES SUR LE MILIEU D'ETUDE

2.2.1. Cadre géographique

2.2.1.1. Localisation

Les sites de Munege et Kivuvu sont situés dans la Commune de Kabarore (Kataraza & Sinarinzi, 2013) de la province Kayanza au Nord-Ouest du Burundi (Fig.1). La commune de Kabarore est limitée administrativement :

- Au Nord par le Rwanda,
- Au Sud, d'Est à Ouest par les communes de Kayanza et Muruta de la province Kayanza et Musigati de la province Bubanza,
- À l'Ouest par la province Cibitoke,
- À l'Est par la province Ngozi.

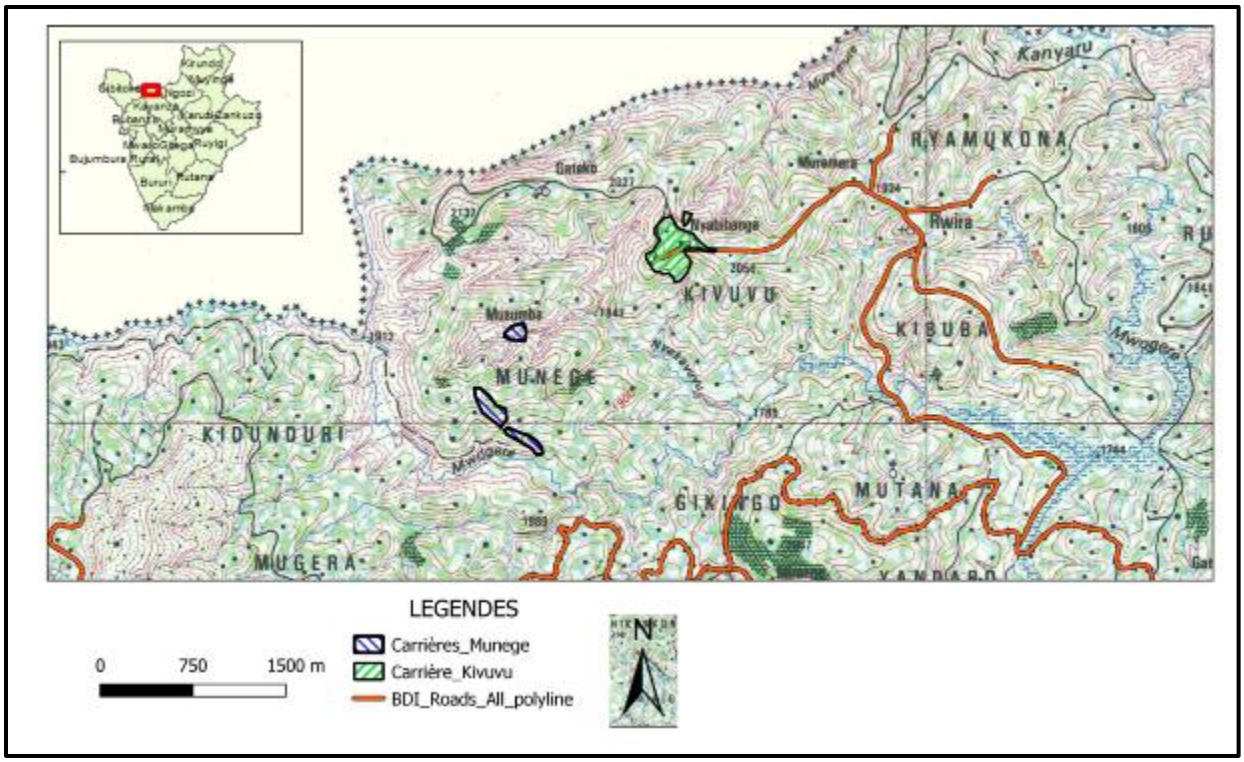


Figure 1. Carte de localisation (modifié de la carte topographie du Burundi, feuille de Kayanza, IGN et ISABU, 1983)

2.2.1.2. Relief

Notre zone d'étude chevauche sur les deux régions naturelles du Burundi à savoir le Mugamba, zone montagneuse à l'Ouest (avec les collines de Kidunduri, Kirehe, Mugera et Gikingo) et le Buyenzi, zone de plateaux centraux à l'Est. Dans tous les cas, les altitudes sont supérieures à 1600m avec 1620m comme altitude minimale et des altitudes les plus hautes supérieures à 2000m (Bucumi, 2004; Cazenave-Piarrot, Ndayirukiye, & Valtan, 2015). C'est un relief représenté généralement par des collines (Fig.02) séparées par des vallées un peu encaissées et profondes (Ntenke & Turimumahoro, 2010). Les pentes des versants des montagnes sont raides et irrégulières et présentent parfois des escarpements de terrains. Le relief décroit progressivement de l'Ouest vers l'Est.

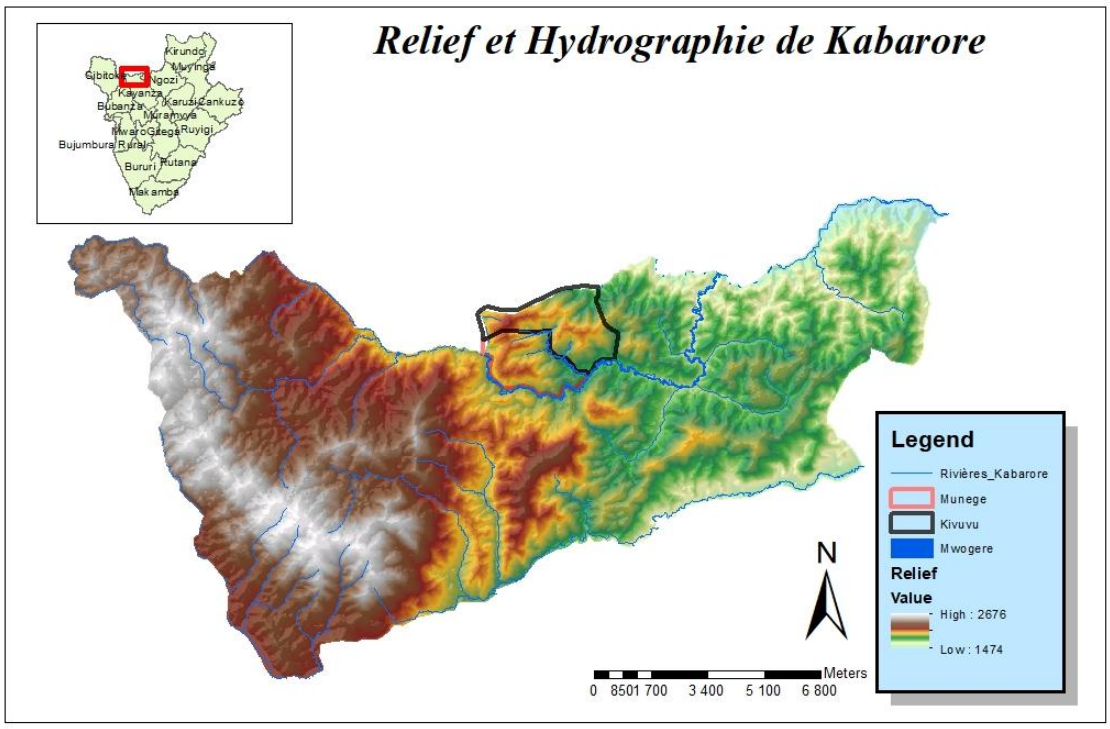


Figure 2. Relief contrasté de Kabarore et hydrographie

2.2.1.3. Hydrographie

La commune de Kabarore constitue une partie du bassin versant de la rivière Mwogere, bassin se situant à la frontière entre le Burundi et le Rwanda (Cazenave-Piarrot et al., 2015). La rivière Mwogere prend sa source dans la forêt naturelle de la Kibira et se jette dans la rivière Kanyaru à l'extrême Nord-Est de Kabarore. Ce bassin fait partie du bassin du Nil (SENDEGEYA M., 2008). La Mwogere reçoit les eaux des affluents naturels mais aussi des eaux qui proviennent des exploitations minières de plusieurs sites de son bassin dont Kivuvu et Munege.Le réseau de son bassin est suffisamment dense (fig.03).

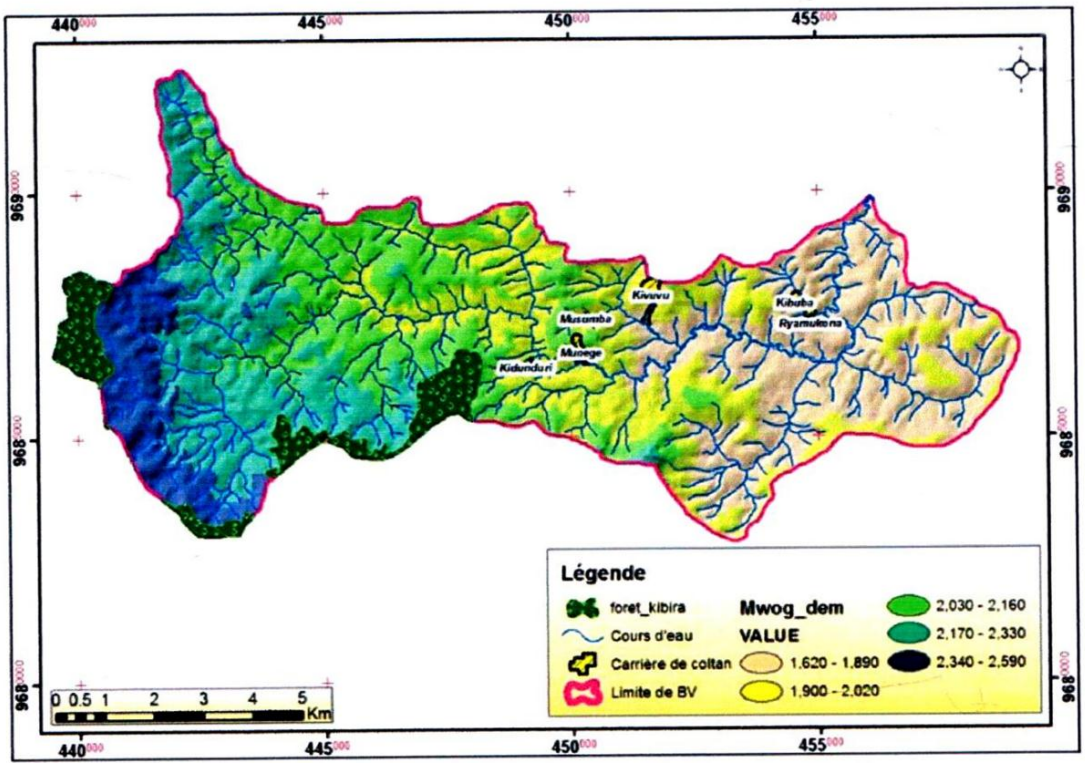


Figure 3. Carte du bassin versant de la Mwogere(Turimumahoro, 2014)

2.2.1.4. Climat

Le climat de Kabarore est celui de plateaux centraux du Burundi (CazenaveP. et al., 2015). En effet, la commune de Kabarore est située dans la zone écologique de plateaux centraux. Les précipitations varient de 1400 (vers l'Est) à 1600mm/an (vers l'Ouest) avec des maximas durant les mois de Septembre et Décembre et de Mars et Avril (SENDEGEYA M., 2008).

Dans l'ensemble de la sous-région (fig.04), les précipitations varient avec l'altitude ensuivent un régime à quatre temps. Les hautes terres sont les plus arrosées, les régions basses les plus sèches. Toutefois, il existe de nombreuses variations locales liées aux dispositions des reliefs et à l'orientation de leurs versants, aux situations d'exposition ou d'abri, aux variations des altitudes, aux brises des vallées (CazenaveP. et al., 2015). Kabarore est situé sur la crête Congo-Nil et les mécanismes climatiques et son climat sont influencés par cette position.

Climat et mécanismes climatiques

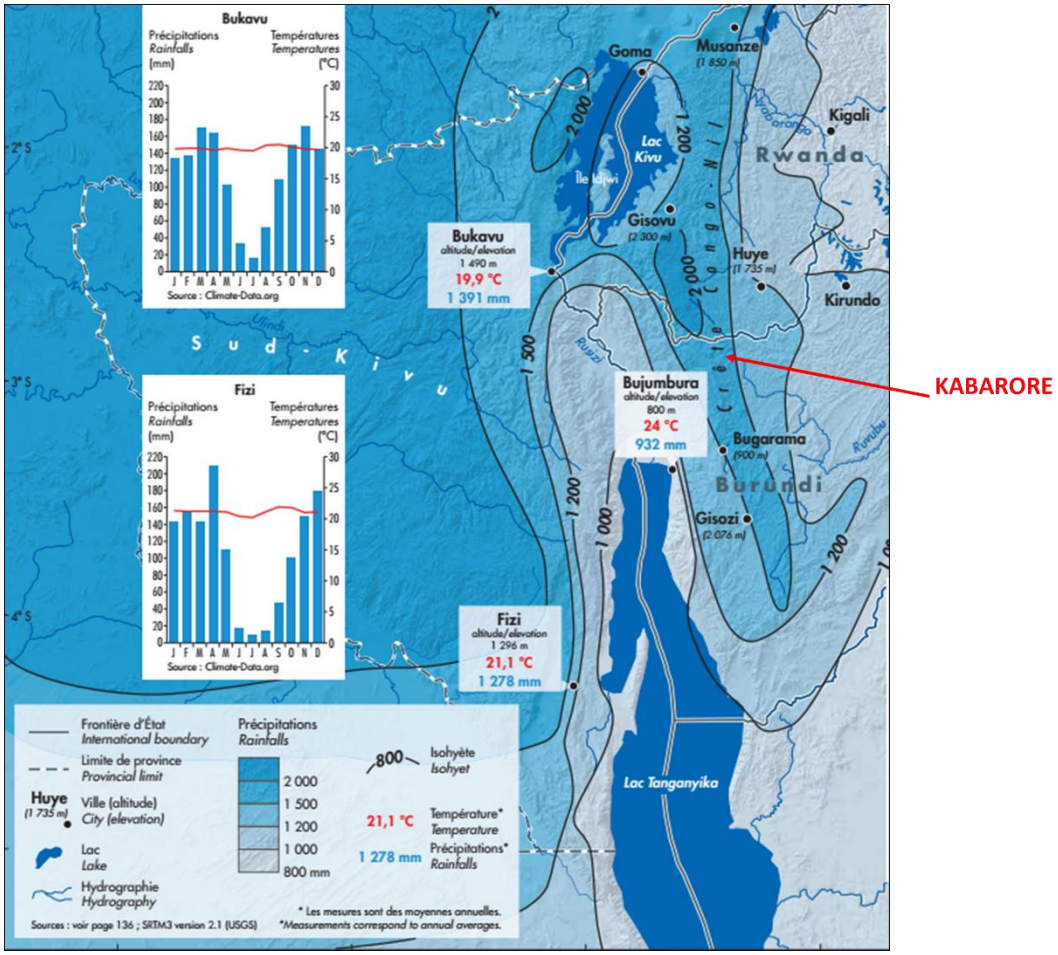


Figure 4. Climat et mécanismes climatiques de la sous-région englobant Kabarore (Cazenave-Piarrot et al., 2015)

2.2.1.5. Contexte pédologique

Les sols de la commune Kabarore sont des ferrisols (fig.05) anthropiques argileux (WAMBEKE, 1963) et améliorés par des labours fréquents et les apports organiques (Théodomir & Eric, 1997). Ces sols ont une très bonne productivité. Par contre, les fortes pentes et la découverture ont conduit à une intensification de l'érosion (Niyokindi V., 2013).

La zone d'étude et ses alentours est très peuplée (ISTEEBU, 2017) suite aux activités minières mais aussi à un bon climat et un relief favorable pour plusieurs activités agricoles. La végétation a presque disparu laissant place à des cultures vivrières comme le sorgho, le blé, la patate douce, le manioc, la banane etc. (Kataraza & Sinarinzi, 2013).

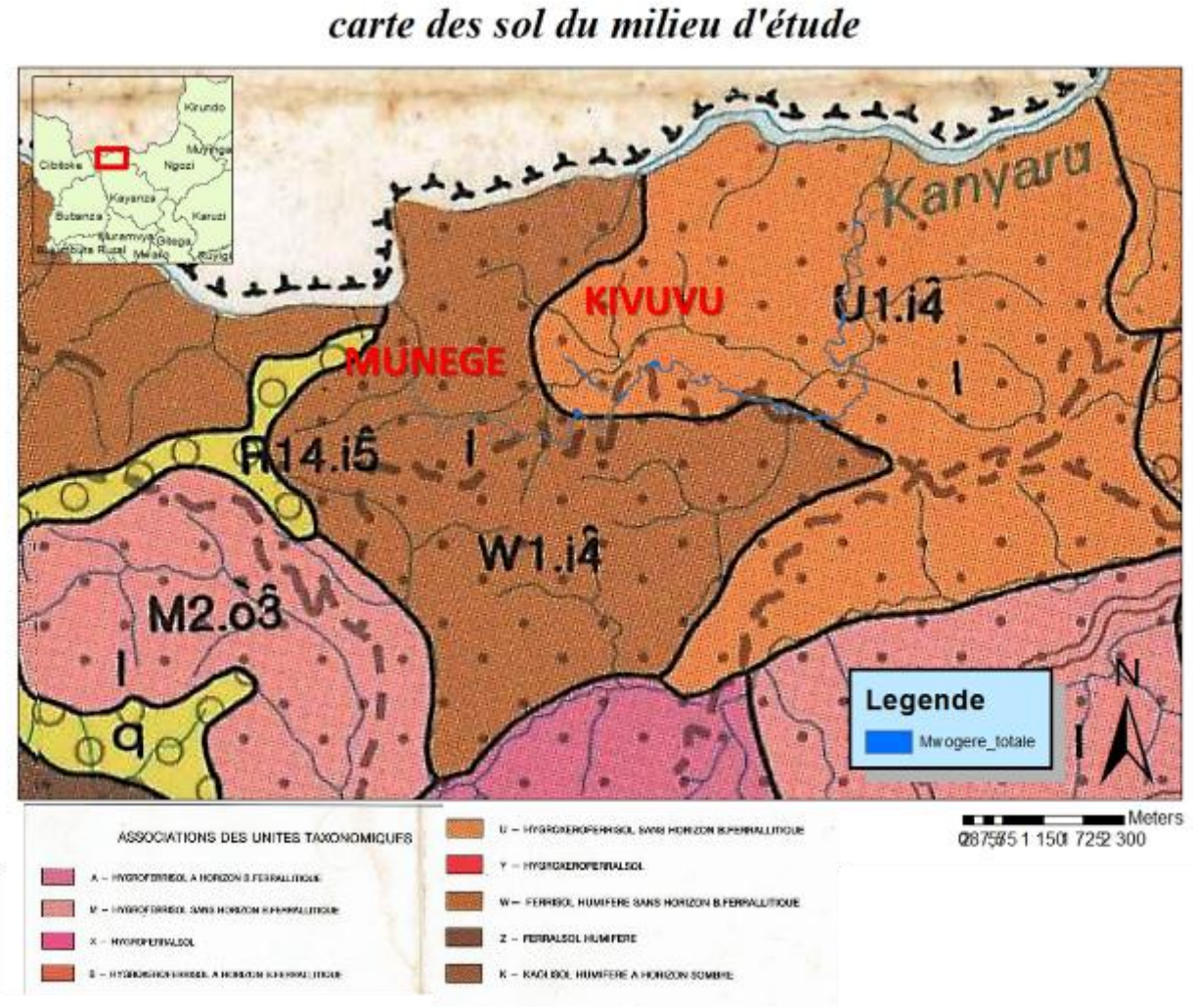


Figure 5. Carte pédologique du milieu d'étude (Modifié de la carte pédologique du Burundi)

2.2.2. Cadre géologique de Kabarore

Après une brève présentation du cadre géographique, nous présentons les aspects géologiques de Kabarore sur les plans lithologie, tectonique et minéralisation.

2.2.2.1. Lithologie

La lithologie de Kabarore est couverte par une lithologie variée. Dans la partie occidentale (colline Kinduri) affleurent les quartzites de la Formation de Bubanza. Ce sont des métaquartzites de teinte blanchâtre à grains moyens bien lités se débitant souvent en plaquettes décimétriques à métriques. Au centre, la partie de cette zone, affleurent des métapelites (schistes noirs ou phyllites grisâtres) de la Formation Ngozi.

Les granites et les pegmatites sont intrudés dans la formation de Ruganza et ces pegmatites sont altérées (Ntakarutimana & Sibomana, 2016). Ces granites souvent

pegmatitiques s'injectent dans les antiformes granitoïques plus anciennes et affectent également la formation de Ruganza (Ntenke & Turimumahoro, 2010). Des gneiss, des micaschistes, des métaquartzites, des intrusions granitiques concordent à la foliation caractérisant le complexe granitique de Kimanga (Cazenave-Piarrot et al., 2015). À Kabarore, les pegmatites affleurent (Fig.06) sur les flancs des collines, parfois dans les vallées. Elles sont fortement altérées et sont répertoriées dans les éboulis de pente, sur les talus de route et dans les niches d'arrachement de terrain (Ntakarutimana & Sibomana, 2016). Le toit des granites est souvent envahi par une suite de pegmatites et des veines de quartz et héberge du Sn, Nb-Ta.

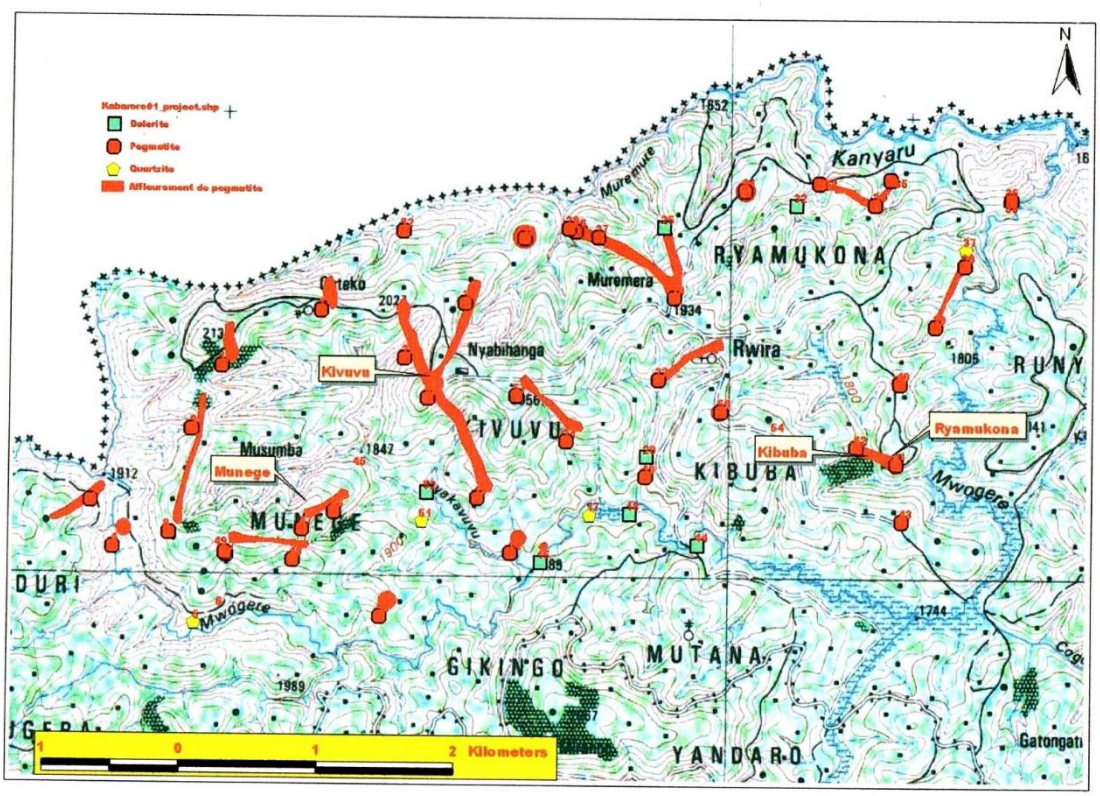


Figure 6. Carte de distribution des filons en affleurement à Kabarore(Ntenge & Turimumahoro, 2010)

2.2.2.2. Métamorphisme

Selon Sengiyumva cité par Sendegeya (SENDEGEYA M., 2008), l'étude microscopique des échantillons de roche de la région a mis en évidence la présence de chlorite, minéral du métamorphisme régional de faible degré (épizone) et de la staurotide, minéral de degré moyen (Mésozone) . De plus, la mise en évidence par cette

étude microscopique, d'une paragénèse de quartz-séricite-biotite-muscovite suggérant un faciès des amphibolites à épidote conduit à qualifier le métamorphisme de degré moyen.

Selon UWIMANA cité toujours par SENDEGEYA (SENDEGEYA , 2008), l'étude microscopique effectuée a révélé la présence d'une paragénèse quartz-biotite-muscovite avec grenat (micaschistes à grenat) qui suggère un métamorphisme régional de degré moyen ainsi que une paragénèse d'amphibolite-plagioclase-quartz (amphibole) qui donne l'idée d'un métamorphisme régional à faciès amphibolithique.

Donc, cette région de Kabarore aurait connu un métamorphisme régional compris entre celui de degré faible (c'est-à-dire de température et pression faible) et celui de degré moyen (température et pression moyenne).

2.2.2.3. Tectonique

Dans la tectonique du Burundien, les plis deviennent plus serrés à l'Ouest du Burundi où les structures tectoniques manifestent des directions variables. Dans notre zone, NTENGE, cité par SENDEGEYA (2008), souligne que le quartzite de Ruganza a subi lors du plissement burundien des micro-plissements de faible rayon de courbure format ainsi un synclinorium alors que les roches compétentes ont été faillées et diaclasées entrainant ainsi les niveaux phylliteux surincombants.

Mais du fait de la plasticité et de l'épaisseur du sol développée sur ces derniers, les traces des failles ne sont pas perceptibles sur le terrain mais peuvent être déduites par l'analyse des photographies aériennes et ces failles ont une direction NW-SE. Une faille probable est d'ailleurs mentionnée dans les formations de Ngozi.

2.2.2.4. Minéralisation

La région de Kabarore est très minéralisée en colombo-tantalite (Midende, 2010), surtout pour les sites de Kivuvu et Munege, nos sites d'étude. SENGIYUMVA et HAKIZIMANA cité par SENDEGEYA suggèrent également la présence de wolframite, quelques autres terres rares et éléments en trace d'Uranium, le Thorium. Ce sont des minéralisations associées au granite à étain et sont concentrées dans les dépôts primaires liés à des greisens et des pegmatites recoupant des schistes chloriteux et gréseux mais aussi dans les dépôts secondaires constitués d'éluvions (Nahimana & Sendegeya, 2008).

2.2.2.4. État des lieux sur les exploitations minières de Coltan à Kabarore

2.2.2.4.1. Cadre juridique et institutionnel du secteur minier au Burundi

De manière générale le secteur minier du Burundi est régi par la Loi n°1/ 21 du 15 octobre 2013 portant code minier du Burundi. En plus de cela, les exploitations minières artisanales (EMA) sont également régies par des dispositions réglementaires suivantes :

1. Décret N°100/184 du 7 Décembre 2018 portant révision du Décret N°100/112 du 30 Mai 2016 portant création, missions, organisation et fonctionnement de l'Office Burundais des mines et carrières, « OBM ».
2. La loi n° 1/010 du 20 juin 2000 portant Code de l'Environnement de la République du Burundi ;
3. La loi n° 1/015 du 11 août 2000 fixant dispositions particulières relatives aux Comptoirs d'exploitation, d'achat et d'exportation des substances minérales extraites artisanalement au Burundi ou y importées.
4. DECRET N°100/22 DU 7 Octobre 2010 portant Mesures d'application du Code de l'Environnement en rapport avec la procédure d'Étude d'Impact environnemental.

Plusieurs auteurs (Midende, 2010; Nahimana & Sendegeya, 2008; Niyokindi Violette, 2013; SENDEGEYA M., 2008)ont remarqué que le secteur minier Burundais, comme c'est le cas de Kabarore, est plus dominé par les exploitations minières artisanales. Et sur le plan réglementaire, on note une disparité dans les textes occasionnant des lacunes. En effet, Midende (2010) fait le constat selon lequel la réglementation sur les EMA au Burundi est éparpillée dans plusieurs textes, ce qui la rend difficilement applicable sur terrain. Elle accuse de fortes lacunes en ce qui concerne notamment les points suivants :

- La définition même de l'activité minière artisanale ;
- L'attribution du titre d'exploitation artisanale ;
- La nature juridique des groupements d'artisans miniers ;
- Les rôles, les devoirs, les responsabilités des différents acteurs ;
- L'encadrement de l'artisanat minier ;
- Les relations entre le titulaire (concessionnaire) et le propriétaire du terrain afin de limiter les conflits observés aujourd'hui ;
- Le régime douanier et fiscal : les taxes et redevances exigibles à chaque niveau ;
- Les responsabilités en matière environnementale ; - etc.

Sur le plan institutionnel, les départements ministériels et services gouvernementaux qui s'occupent des EMA sont également multisectoriels et non

coordonnés : Ministères en charge des Mines, de l'Environnement, des Affaires Intérieures, de la Sécurité Publique ; les administrations provinciales, communales et locales ainsi que les propriétaires des terrains rendant ainsi leur action inefficace.

2.2.2.4.2. Nombre d'artisans miniers à Kabarore

En 2010, Midende reporte un nombre total d'artisans miniers en filière métaux au Burundi de l'ordre de 10. 007.D'après ses enquêtes il les a réparties par filière et par provinces comme indiqué sur la figure suivante (Fig.8).

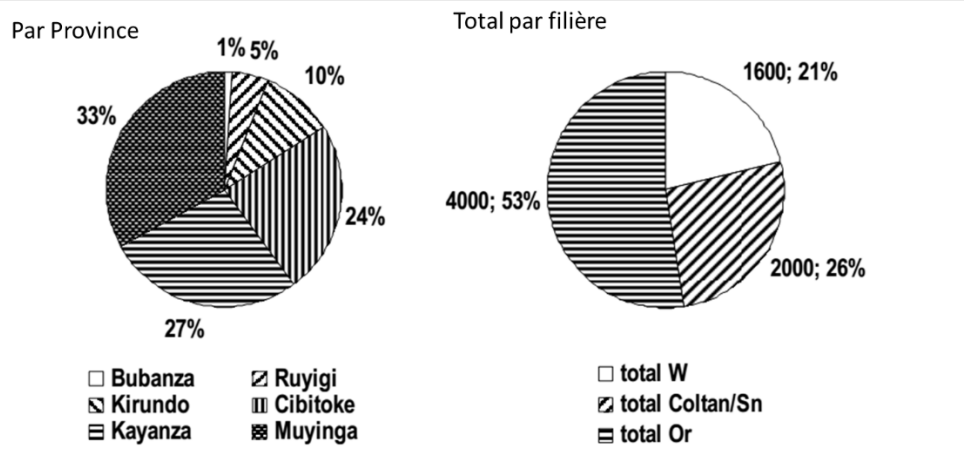


Figure 7. Répartition des exploitants artisanaux du Burundi en 2010 (Midende, 2010)

Toutefois, Midende (2010) note que ces chiffres et ces proportions changent en fonction de plusieurs paramètres. Le premier est la saison : pendant la saison des pluies, la plupart des artisans miniers abandonnent les exploitations pour s'adonner à l'agriculture. Deuxièmement, les artisans peuvent se remplacer aux différentes postes selon l'évolution des travaux et les difficultés rencontrées sur un site donné. Troisièmement, au niveau des familles et des individus, les paysans viennent à l'exploitation minière artisanale pour constituer un complément de ressource pour des revenus agricoles en baisse suite à de mauvaises récoltes dues à la sécheresse. Pour la filière coltan/cassitérite, il y a plus d'artisans miniers qui travaillent clandestinement dans la région de Kabarore en province de Kayanza. Ils se cachent pour éviter d'être recensés car ils sont supposés travailler pour la société Comptoir Minier des Exploitations du Burundi, en sigle COMEBU S.A., alors que cette société leur offre des prix très bas par rapport aux prix pratiqués par les négociants non officiels.

Pour le cas spécifique de Kabarore dans les exploitations de coltan, la COMEBU chaque année travaille avec plus des centaines d'exploitants artisanaux. On

note aussi une augmentation de ces derniers depuis 2016 avec l'augmentation de la production (Fig.08) mais cette augmentation n'est pas directement proportionnelle à la production.

2.2.2.4.3. Production du coltan à Kabarore

La commune Kabarore en province de Kayanza produit presque tout le coltan du Burundi dans la concession octroyée à la société COMEBU (Midende, 2010; Nkurunziza & Niyonzima, 2014). Les résultats des travaux d'exploration menés par cette société en 2003-2004 ont permis de calculer des réserves prouvées de 1.908 tonnes de coltan, de réserves probables de 2.504 tonnes, des réserves possibles de quelques 5.000 tonnes, réserves pouvant être exploitées pendant plus de 25 ans (Midende, 2010). Sur base de ces chiffres, la société s'était engagée à exporter 10.000 kg/mois du concentré de coltan par mois. Cette production a fortement baissé depuis 2004, elle a tourné autour de quelques 500 kg/mois, soit 6 tonnes/an. Selon les données actuelles, on note une évolution d'augmentation lente entre 2015 et 2017, avec un pic exponentiel en 2018 (Fig.08). Cette augmentation de la production est dû à la mécanisation améliorée de l'exploitation depuis 2017.Les données de 2001 à 2011 ont été tiré du travail de Ntenge et Turimumahoro de 2014 et celles de 2015 à 2018 ont été fournies par la COMEBU. Les services habilités dont l'Office Burundais des Mines n'ont pas pu fournir les données des autres années pour des raisons que l'on ignore.



Figure 8. Évolution de la production du concentré de coltan à Kabarore en tonne (COMEBU, 2019; Denis Turimumahoro, 2014)

2.2.2.4.4. Méthodes d'exploitation

Les méthodes d'exploitation à Kabarore sont actuellement semi-industrielles mais avec un volet artisanal très dominant (Nahimana et Sendegeya, 2008). En effet, pour obtenir des concentrés exportables de colombo-tantalite, le minerai extrait subissent les étapes de concentration suivantes : la phase de préconcentration se déroulant sur chantier et la phase de concentration sélective à Bujumbura (Ntakarutimana et Sibomana, 2016).

- La phase de préconcentration se fait après abattage à l'aide des machines motorisées et comprend deux étapes :
    - Ground sluicing : méthode artisanale de concentration hydrogravimétrique qui se déroule dans les rigoles de lavage par mouvements de pelletage répétés du minerai dans un courant d'eau. Pour essayer de réduire les pertes, les rigoles de concentration sont chaque fois multipliés en vue de retraiter plusieurs fois les rejets provenant des premières rigoles de concentration. Chaque rigole comprend deux zones essentielles : une zone de débourbage et une zone de concentration
    - Le panage : à l'aide de pan, on sépare les grains légers par gravimétrie-centrifuge.
- La concentration proprement dite se fait à Bujumbura dans une usine à l'aide d'un procédé bien approprié pour les minerais de coltan. Toutefois, une usine à Kabarore est en cours de construction pour renforcer le prétraitement et limiter le coût de transport vers Bujumbura des minerais moins concentrés.

C'est cette méthode d'exploitation et de concentration sur le chantier qui est la base des dégradations environnementales dans les bas-fonds car tous les rejets sont acheminés par ruissellement dans les cours d'eau.

2.3. CADRE CONCEPTUEL : LES SIG ET LEURS APPLICATIONS DANS LA PREVISION ENVIRONNEMENTALE

2.3.1. Généralités sur le processus d'EIES comme outils de prévision environnementale

2.3.1.1. But du processus de l'EIES

Le processus de l'Étude d'Impact Environnemental et Social (EIES) est une procédure interdisciplinaire et en plusieurs étapes pour s'assurer que les considérations

environnementales sont prises en compte dans les décisions concernant les projets qui peuvent avoir un impact sur l'environnement. En termes simples, le processus EIE permet d'identifier les possibles effets environnementaux d'une activité proposée et la manière d'atténuer ces effets (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010; Keita & Waaub, 2011).

Le processus EIE vise à informer les décideurs et le public des conséquences environnementales de la mise en œuvre d'un projet proposé (Keita & Waaub, 2011). Le document EIE lui-même est un outil technique qui identifie, prédit et analyse les impacts sur l'environnement physique, mais aussi social, culturel et sur la santé. Si le processus de l'EIE est bien mené, il identifie les alternatives et les mesures d'atténuation pour réduire l'impact environnemental du projet proposé (République du Burundi, 2000a). Le processus EIE joue également un rôle procédural important dans le processus décisionnel en général par la promotion de la transparence et la participation du public (Sadler & McCabe, 2002).

Il est important de noter que le processus de l'EIE ne garantit pas qu'un projet sera modifié ou rejeté si le processus révèle qu'il y aura des impacts environnementaux graves. Dans certains pays, un décideur peut, en effet, choisir l'alternative la plus nuisible pour l'environnement, tant que les conséquences sont indiquées dans l'EIE. En d'autres termes, le processus EIE garantit une décision éclairée, mais pas nécessairement une décision écologiquement bénéfique (Keita & Waaub, 2011; Prieur, 1981; Sadler & McCabe, 2002).

2.3.1.2. Acteurs du processus de l'EIES

Selon le système d'EIE, la responsabilité de produire une EIES sera assignée à l'une des deux parties : (1) l'agence gouvernementale ou ministère ; ou (2) le promoteur du projet. Si les lois de l'EIES le permettent, n'importe quelle partie peut choisir d'embaucher un consultant pour préparer l'EIES ou gérer des portions spécifiques du processus de l'EIES, tels que la participation du public ou des études techniques.

Certaines lois de l'EIES reconnaissent le conflit d'intérêts inhérent qui en résulte lorsqu'une compagnie minière ou un autre promoteur du projet embauche un consultant pour préparer une EIES. L'utilisation d'un consultant comporte le risque que le document soit biaisé en faveur de la poursuite du projet. Si un consultant est embauché par la compagnie minière, les conflits peuvent se produire si le consultant estime qu'il

recevra dans le futur d'autres travaux si le projet est approuvé, ou même des bénéfices indirects des activités connexes (par ex., consultations pour un port où le minerai sera exporté). Certaines lois exigent que les consultants soient enregistrés avec le gouvernement et/ou accrédités professionnellement dans la préparation de l'EIE comme c'est le cas du Burundi (République du Burundi, 2010). Dans certains cas, un consultant peut être requis de déposer une déclaration de divulgation de tout intérêt financier ou autre dans la réussite du projet (Keita & Waaub, 2011).

2.3.1.3. Les étapes du processus de l'E.I.E. S

Bien qu'il ne soit pas uniforme d'un pays à un autre, le processus de l'EIES, comprend généralement un ensemble d'étapes procédurales (fig.09) qui aboutissent à un rapport écrit d'évaluation d'impact qui informera le décideur si un projet proposé peut être approuvé ou rejeté.

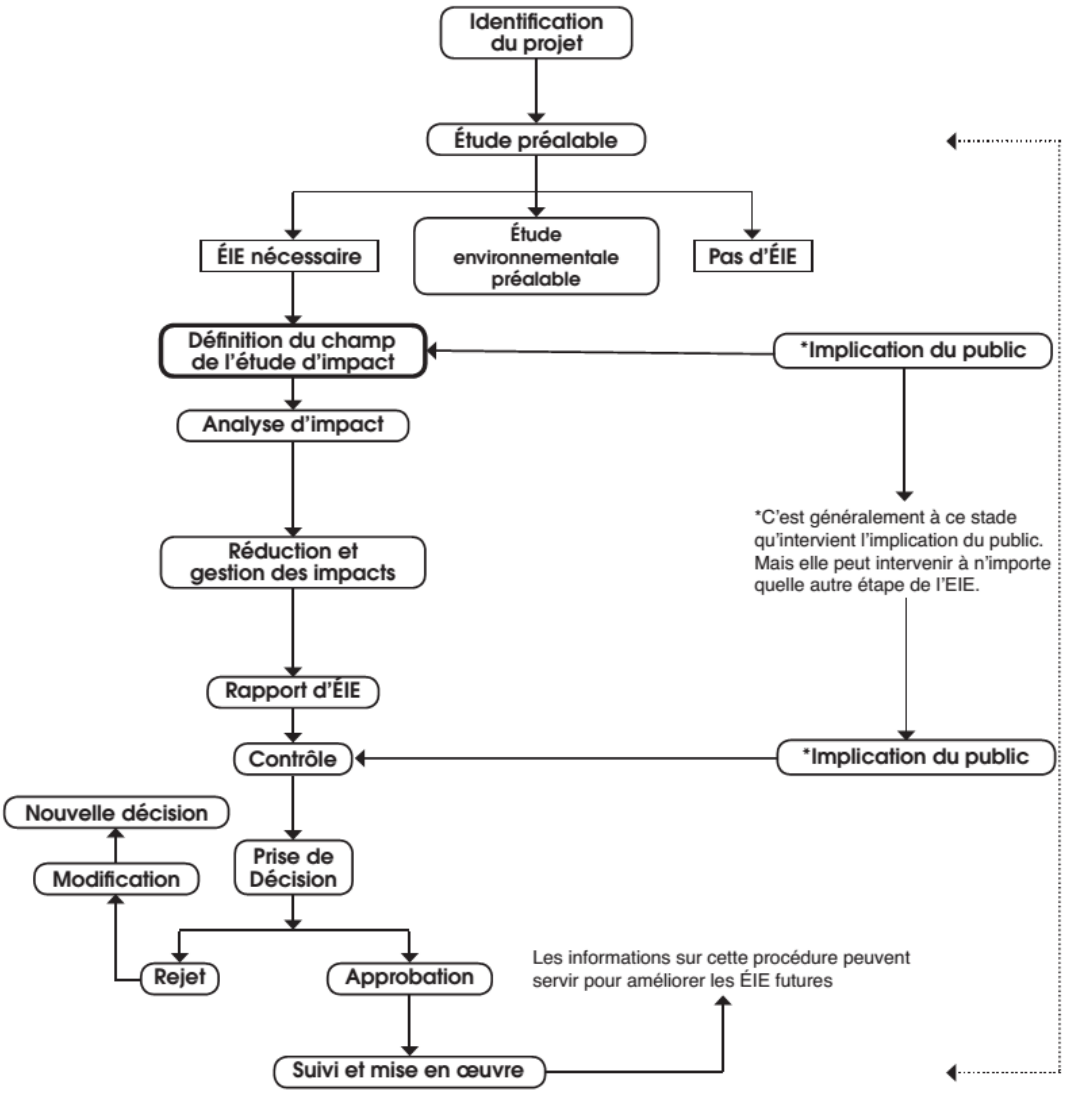


Figure 9. Les étapes du processus de l'EIE (Keita & Waaub, 2011; Sadler & McCabe, 2002)

Dans les paragraphes qui suivent, nous expliquons chaque étape d'après le *Manuel de formation sur l'Etude d'impact environnemental*du PNUE (Sadler & McCabe, 2002) mais aussi, pour chaque étape, nous indiquons l'article référant du *Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010 portant mesures d'application du Code de l'environnement en rapport avec la procédure d'Etude d'Impact Environnemental* (République du Burundi, 2010).

- **Identification et définition du projet ou activité (**Arts.4-12 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Bien que cette étape puisse paraître relativement simple, définir un "projet" pour les besoins d'une EIES peut devenir complexe et même controversé

lorsqu'il s'agit d'un grand projet d'exploitation minière, comprenant plusieurs phases, ou impliquant plusieurs sites. L'objectif de cette étape consiste à définir le projet avec suffisamment de spécificité pour déterminer avec précision la zone des impacts possibles et pour inclure des activités qui sont étroitement liées à la proposition de projet de sorte que la totalité des impacts environnementaux soit évaluée.

- **Tri préliminaire (**Arts.7-12 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Le processus de sélection détermine si un projet particulier justifie la préparation d'une EIES. Le seuil des exigences pour une EIES varie d'un pays à l'autre - certaines lois fournissent une liste des types d'activités ou de projets qui nécessitent une EIES, d'autres requièrent une EIES pour tout projet qui peut avoir un impact significatif sur l'environnement ou pour des projets qui dépassent une certaine valeur monétaire. Dans certains cas, particulièrement si les impacts possibles d'un projet ne sont pas connus, une évaluation environnementale préliminaire sera préparée pour déterminer si le projet justifie une EIES.

- **Définition du champ de l'étude d'impact (**Arts.13-18 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : L'étude de champ est une étape, habituellement impliquant le public et d'autres parties intéressées, qui identifient les enjeux environnementaux clés qui devraient être abordés dans une EIES. Cette étape fournit une des premières opportunités pour les membres du public ou des ONG pour entendre parler du projet proposé et pour exprimer leurs opinions. Le cadrage peut également révéler des activités similaires ou connectées qui peuvent survenir dans les environs d'un projet, ou identifier des problèmes qui doivent être atténués ou qui risquent de provoquer l'annulation du projet.

- **Préparation des termes de référence (**Art.16 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Les Termes de Référence servent comme une carte routière pour la préparation de l'EIES et devraient englober idéalement les enjeux et les impacts qui ont été identifiés au cours du processus de définition de l'étendue du projet. Un brouillon des Termes de Référence peut être mis à la disposition du public pour examen et commentaires. Une révision critique du public à ce stade précoce du processus constitue une occasion clé pour s'assurer que l'EIES est correctement formulée et abordera les sujets qui intéressent la communauté.
- **Préparation d'un avant-projet d'EIES (**Art.14 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Un avant-projet d'EIES est préparé en conformité avec les termes de référence et

l'éventail des sujets identifiés au cours du processus de cadrage. L'avant-projet d'EIES doit également satisfaire les exigences de contenu des lois et réglementations globales de l'EIES. Cette étape fera appel idéalement à un large éventail de spécialistes techniques pour évaluer les conditions de référence, prévoir les impacts probables du projet et concevoir des mesures d'atténuation.

- **Participation du public (**Art.15 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Les meilleures pratiques d'EIE sont celles qui impliquent et engagent le public à différentes étapes d'un bout à l'autre du processus par un échange bilatéral d'informations et d'opinions. La participation du public peut consister en des réunions d'information, des audiences publiques et des opportunités de fournir des commentaires écrits sur un projet proposé. Toutefois, il n'existe pas de règles cohérentes pour la participation du public dans les systèmes actuels d'EIES. Même au sein d'un pays donné, il peut exister des variations dans la qualité et l'étendue de la participation du public dans le processus de l'EIES, dépendant du type de projet à l'étude, des communautés qui pourraient être touchées ou des agences gouvernementales qui supervisent le projet.
- **Préparation de l'EIES final (**Arts.13-18 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Cette étape produit un rapport final d'évaluation d'impacts qui aborde les points de vue et les commentaires des parties qui ont passé en revue l'avant-projet de l'EIES. Ces commentaires peuvent entraîner des modifications ou des ajouts au texte de l'avant-projet de l'EIES. Dans certains cas, l'EIES finale contiendra une annexe récapitulant tous les commentaires reçus du public et d'autres parties intéressées et fournissant des réponses à ces commentaires.
- **La décision (**Art.19-24) Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Une décision d'approuver ou de rejeter un projet minier est généralement basée sur l'EIES finale, mais dans certains cas, une autorisation environnementale peut être tout simplement une étape dans le processus d'autorisation de la mine. La décision peut également être accompagnée de certaines conditions qui doivent être remplies, telles que le dépôt d'une garantie de réhabilitation de l'environnement ou la soumission d'un plan de gestion environnementale.
- **Révision administrative ou judiciaire** (Arts.25-33 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) **:** En fonction de la compétence juridictionnelle, il peut y avoir des occasions pour une partie de demander un réexamen administratif ou judiciaire de la Décision finale et du processus de l'EIES**.** Un recours peut aborder les failles procédurales dans le processus de l'EIES, comme par exemple le fait de ne pas tenir des audiences publiques

requises, ou peut indiquer les questions de fond que le décideur a omis de prendre en considération. La loi procédurale de révision judiciaire ou administrative d'un pays, ou parfois la loi de l'EIES elle-même, identifiera généralement les types de questions qui peuvent être soulevées dans un recours et le type d'allègement qui peut être accordé.

- **Mise en œuvre du projet** (Arts.30 Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Pourvu que toutes les exigences réglementaires soient réunies et tous les permis obtenus, le développement de la mine se poursuivra après la prise de décision sur l'opportunité du projet et une fois épuisées les nécessités de révisions administratives ou judiciaires.
- **Monitoring** (Arts.30-32) Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010) : Le Monitoring est une composante importante de la mise en œuvre du projet. Le monitoring vise trois objectifs :

(1) s'assurer que des mesures d'atténuation sont mises en œuvre ;

(2) évaluer si les mesures d'atténuation fonctionnent efficacement ; et

(3) valider l'exactitude des modèles ou des projections qui ont été utilisées pendant le processus d'évaluation des impacts.

2.3.2. Évolution et cadre institutionnel des Études d'Impact Environnemental et Social (EIES) au Burundi

L'évaluation environnementale est un instrument de gouvernance par excellence en ce qu'il rend possible l'intégration des intérêts de plusieurs acteurs. Dans un pays aussi dynamique et fragile que le Burundi, qui connaît une démographie galopante et une croissance économique rapide caractérisée par des investissements publics et privés basés sur l'utilisation des ressources naturelles, l'EIES est un instrument indispensable pour un développement durable. Et c'est cela que l'État du Burundi a compris et tentée de mettre sur pied

En effet, promulguée en mars 1992, dans le sillage des préparatifs du Sommet de la Terre, la constitution de 1992, aborde pour la première fois la question de l'environnement. Les constitutions qui vont suivre vont naturellement lui emboîter le pas. Ainsi, la constitution actuelle, promulguée en Juin 2018, stipule en son article 35 que : « L'État assure la bonne gestion et l'exploitation rationnelle des ressources naturelles du pays, tout en préservant l'environnement et la conservation de ces ressources pour les générations à venir » (République du Burundi, 2018a). La présence de la problématique environnementale dans la constitution ouvre la voie aux textes législatifs et réglementaires en la matière.

C'est le cas de la loi N°010 du 30 juin 2000 portant code de l'environnement de la République du Burundi. Elle fixe les règles fondamentales destinées à permettre la gestion de l'environnement et la protection de celui-ci contre toutes les formes de dégradation, afin de sauvegarder et de valoriser l'exploitation rationnelle des ressources naturelles, de lutter contre les différentes formes de pollution et nuisance et d'améliorer ainsi les conditions de vie de la personne humaine, dans le respect de l'équilibre des écosystèmes (République du Burundi, 2000a). Le chapitre 3 du titre II de ce code est consacré à la procédure d'EIES. Cette dernière doit obligatoirement être requise pour des projets qui risquent de porter atteinte à l'environnement. Cette loi a été complétée par un décret d'application : le décret 100/22 du 07 octobre 2010 portant mesures d'application du code de l'environnement en rapport avec la procédure d'EIES et une décision ministérielle n°770/083 du 09 janvier 2013 portant sur le cadrage dans la procédure d'EIES au Burundi. Ce sont ces deux dernières dispositions qui reprennent aussi les aspects sociaux.

De par la loi burundaise, la mise en œuvre des dispositions relatives à l'évaluation environnementale revient au ministère ayant l'environnement dans ses attributions, agissant seul ou conjointement avec les autres ministères concernés. Au niveau central, le Ministère a trois directions générales dont la Direction Générale des Forêts et de l'Environnement. Celle-ci abrite en son sein la Direction de l'Environnement qui est l'organe central en charge de l'EIES (SEEAC, 2013).

Une étude sur l'évolution des systèmes d'étude d'impact sur l'environnement en Afrique centrale réalisé par la Corporation des Associations Nationales pour l'Evaluation Environnementale en Afrique (SEEAC) centrale note un progrès au Burundi en matière d'EIES. En effet, l'analyse de l'évolution du système d'EIES montre une nette amélioration entre 2005 et 2013. Toutefois, toujours cette étude constate qu'en dépit de ce progrès, la base juridique de l'EIES au Burundi reste relativement faible et incomplète. La capacité institutionnelle est insuffisante pour gérer la procédure. La prise de décision reste une boîte noire, car non publique. Les inspections et la tenue en respect sont peu développées. L'infrastructure pour le développement des connaissances reste à améliorer. Aussi, l'efficacité de l'outil reste relativement limitée, avec beaucoup de projets qui y échappent encore et un jugement mitigé de son influence sur la qualité des projets par les participants. La direction de l'environnement qui est responsable en première instance de la mise en œuvre de la procédure, et dont la capacité à apprendre et à s'améliorer a été

jugée très bonne par le SEEAC, est engagée dans plusieurs actions qui devront davantage améliorer la situation actuelle. Ceci sera d'autant plus facile lorsqu'un nombre croissant de parties prenantes s'approprieront de l'outil.

2.3.3. Utilisation des SIG dans les études environnementales

L'étude d'impact en environnement est un instrument de planification et de recherche qui prend en considération l'ensemble des facteurs environnementaux, d'un point de vue physique (Javed & Khan, 2012; Souhila Benkaci, Dehbia Abir a, Aziz Oumellal, 2018), biologique (Acosta et al., 2011; Gis & Flood, 2014; Gourmelon, 2003; Santo & Sánchez, 2002) et humain (Charou, Stefouli, Dimitrakopoulos, Vasiliou, & Mavrantza, 2010; Craynon, Sarver, Ripepi, & Karmis, 2015; Senthil Kumar, S. Arivazhagan, 2013). L'étude d'impact considère également les intérêts des différents partis en vue d'éclairer les prises de décision (Senthil Kumar S., Arivazhagan S., 2013) pour une gestion durable de l'environnement.

La multitude de variables analysées peut rendre la compréhension difficile. Les SIG sont donc des outils efficaces afin de synthétiser l'information et faciliter la compréhension globale de l'étude (Bonifazi et al., 2014; Gourmelon, 2003; Javed & Khan, 2012). Les SIG sont particulièrement efficaces pour illustrer les étapes descriptives (La description du milieu naturel et la description détaillée du projet) et l'analyse des impacts.

Par exemple, les SIG peuvent être utilisés pour le recensement des espèces dans un milieu donné, ainsi que pour localiser l'ensemble des sites potentiels de construction d'un projet. En superposant ces deux variables à l'aide des SIG, il est alors beaucoup plus facile d'avoir une vue d'ensemble des impacts d'un projet de construction sur le milieu naturel (Nkurunziza& Niyonzima, 2014; S. Senthil Kumar, S. Arivazhagan, 2013).

2.4. MATERIELS ET METHODES

La méthodologie développée pour obtenir les résultats de cette étude est conçue comme une innovation pour les études d'évaluation environnementale, considérées comme outils de développement durable. Pour rendre le développement durable possible, il faut réduire la charge des impacts sur l'environnement. Ces impacts sont plus complexes, plus importants de par leur échelle et ont des effets potentiels plus lourds qu'il y a une trentaine d'années, lors de l'introduction de l'ÉIES, comme outils de prévision environnementale. Actuellement au Monde, les études de prévision environnementales sont entravés par plusieurs facteurs en leur défaveurs (Lizotte, 2017).Et de façon spécifique pour le pays en voie de développement comme le Burundi, pour des raisons de priorité et nécessité d'émergence économique et de mauvaise gouvernance, deux facteurs interviennent en défaveur des EIES : le temps et les moyens financiers et matériels (Lizotte, 2017). Ainsi les EIES sont parfois négligées, élaborées à la hâte ou partiellement et juste pour des raisons administratives.

D'autre part, il s'est démontré (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010; Sadler & McCabe, 2002) que les SIG sont des outils innovants pouvant relever ces défis. En effet, actuellement, on dénombre plusieurs plates-formes d'acquisition des données SIG de libre accès (par exemple US Geological Survey, Google, Bing Map…) mais aussi le traitement d'informations environnementales avec les outils SIG permet une visualisation globale des impacts mais aussi des mesures d'atténuation. C'est ainsi que la méthodologie de cette étude est développée dans cet optique et est basée sur les données de libre d'accès. La démarche méthodologique de ce travail constitue l'objet de ce chapitre. Cette étude est prédictive avec des résultats issus d'une analyse quantitative et qualitative de données spatiales historiques déduites des MNT, de l'orthophoto du Burundi de 2012, autres images landsat et des données statistiques minières obtenues dans la littérature.

Dans ce chapitre, les matériels SIG et les données sont décrits et nous en précisons leurs acquisitions. D'autre part, pour chaque résultat attendu, une démarche méthodologique est explicitée tout en déterminant les matériels SIG et le logiciel utilisé. Nous décrivons aussi les pré-traitements appliqués sur les matériels d'entrée ou input.

2.4.1. DONNEES, ACQUISITIONS ET PRÉTRAITEMENT

2.4.1.1. Données et acquisitions

Les données utilisées dans notre étude sont des données rasters (Modèle Numérique de Terrain, MNT ou en anglais Digital Elevation Model, DEM) à partir desquelles une série des données vectorielles (shapefiles) seront extraites. Nous présentons dans le tableau ci-dessous (Tableau 1) la nature des rasters, leurs propriétés, leurs acquisitions et les types et natures des données vectorielles qui y seront extraites.

Tableau 1. Données SIG utilisées

N°	**Données d'entrée (Input)**		**Données de sortie (Output)**	
	Raster (MNT)	Acquisition	Données vectorielles	Utilisations
1	MNT 1980 10m de résolution	MNT issue des courbes de niveau de la carte topographique du Burundi de 1980 de feuille de Kayanza	- Courbes des niveaux - Reliefs - Réseaux Hydrographiques - Bassins versants	• Surfaces 2D et 3D des carrières de Kivuvu et Munege • Volume 3D des carrières de Kivuvu et Munege
2	MNT 2018 de 30 m de résolution	MNT acquis le 06 Janvier 2019 téléchargé sur https://e4ftl01.cr.usgs.gov//		

2.4.1.2. Prétraitement des données

Le prétraitement des MNT a consisté à découper les MNT aux limites des sites de Kivuvu et Munege et les rééchantillonner pour le ramener à 10m. En effet, par manque d'un MNT de haute résolution (10 m par exemple), nous avons utilisé le MNT de libre accès de 30m. Nous avons utilisé ArcGIS 10.4 comme logiciel.

L'outil de découpage d'ArcGis 10.4 permet de découper (Fig.10) une partie d'une classe d'entités en utilisant une ou plusieurs entités (pour notre cas un MNT) d'une autre classe d'entités comme emporte-pièce. Il est particulièrement utile pour la création d'une nouvelle classe d'entités, également nommée zone d'étude ou zone d'intérêt, contenant un sous-ensemble géographique des entités (Kivuvu et Munege pour notre cas) d'une autre classe d'entités plus importante (ArCGIS Desctop, 2015).

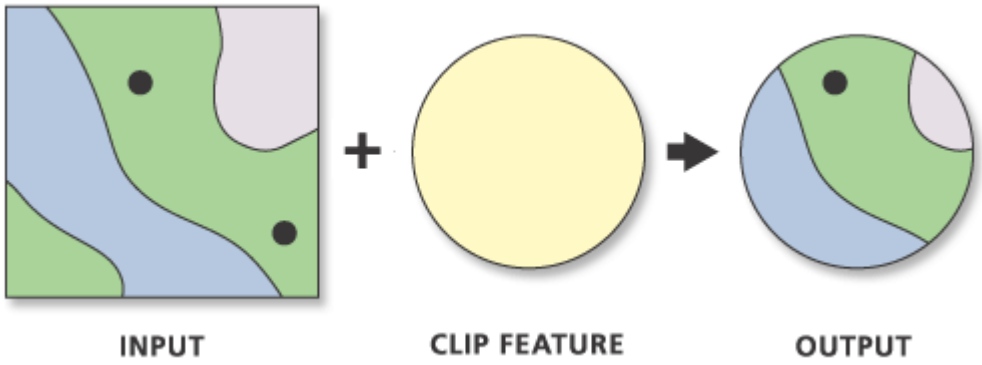


Figure 10. Processus de découpage

Le tableau ci-après (Tableau 2) détaille et décrit les paramètres des données spatiales d'entrée et les données de sorties.

Tableau 2. Descriptions des données spatiales

Paramètre	**Explication**	**Type de données**
In_features	Entités à découper.	Feature Layer
Clip_features	Entités utilisées pour découper les entités en entrée.	Feature Layer
Out_feature_class	Classe d'entités à créer.	Feature Class
Cluster_tolerance (Facultatif)	Distance minimale séparant toutes les coordonnées d'entité, ainsi que distance de déplacement possible d'une coordonnée sur X ou Y (ou les deux). Définissez une valeur supérieure pour les données dont les coordonnées sont moins précises et inférieure pour les données d'une précision extrêmement élevée.	Linear unit

Les valeurs attributaires des classes d'entités en entrée sont copiées vers la classe d'entités en sortie. Toutefois, si l'entrée représente une ou plusieurs couche(s) créée(s) par l'outil **Générer une couche** et que l'option **Règle de division** est activée pour un champ, alors un quotient de la valeur attributaire en entrée est calculé pour la valeur attributaire en sortie. Pour notre cas, ça sera des aires de surfaces délimitées par les courbes de niveaux. Lorsque l'option Règle de division est activée, chaque fois qu'une entité est fractionnée dans une opération de superposition, les attributs des entités résultantes sont

égaux à un quotient de la valeur attributaire de l'entité en entrée. La valeur en sortie dépend du quotient de division de la géométrie d'entité en entrée. Par exemple, si la géométrie en entrée a été divisée en parties égales, la moitié de la valeur attributaire de l'entité en entrée est affectée à la valeur attributaire de chaque nouvelle entité.

2.4.1.3. Rééchantillonnage du MNT 30m de 2018 à 10 m de résolution

Les travaux de calcul de volumes de terre à partir des MNT nécessitent des MNT de haute résolution. Dans notre cas, nous devrions utiliser le MNT du Burundi de 2012 de 10m de résolution. Cependant, après analyse de ce MNT, nous avons constaté qu'il est légèrement lissé au niveau des carrières minières de Kivuvu et Munege. Par contre, le MNT de 30m présente mieux la variation d'allure du terrain, c'est-à-dire lors de son acquisition, il a reconnu même à 30m de résolution les carrières de Kivuvu et Munege. Cependant, pour le ramener dans les mêmes conditions que le MNT que nous avons généré à partir de la carte topographique, nous l'avons rééchantillonné à 10m.

Pour le rééchantillonnage du MNT, nous avons utilisé une technique qu'ArcGIS prévoit en passant par la conversion du MNT à 30m en point avec des altitudes. En effet, la première étape est de transformer le MNT en point par l'outils **Conversion>From Raster>Raster to point (**fig.11).

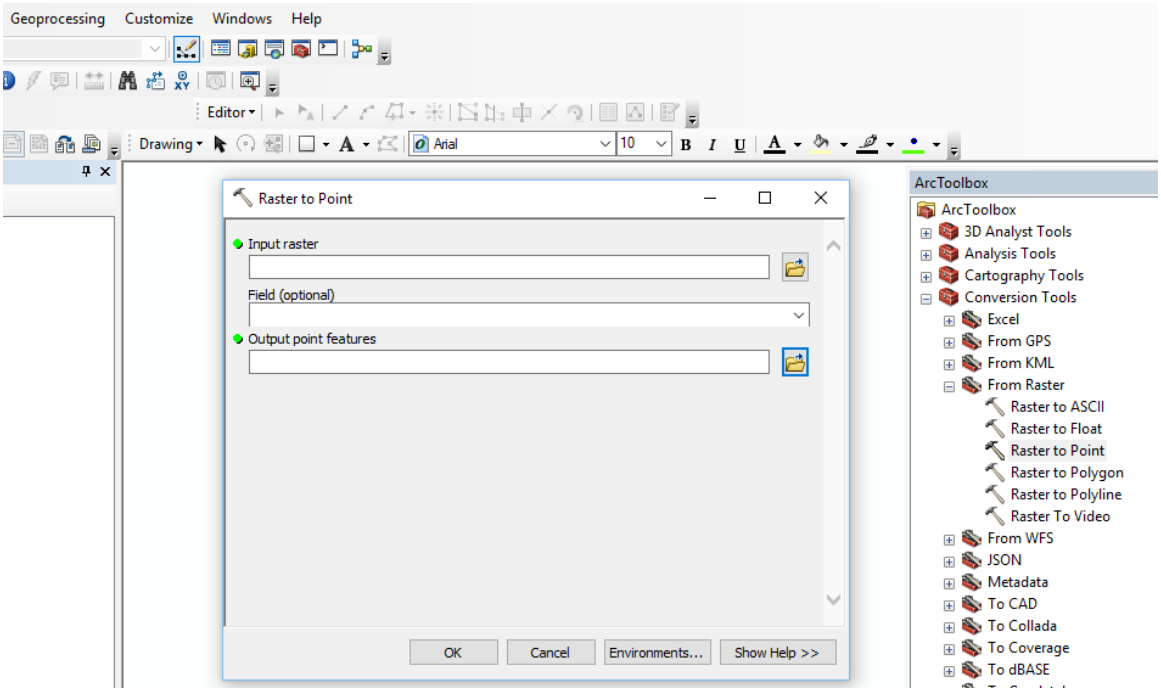


Figure 11. Procédure de création des points

La couche d'entrée est le raster de 30m et on détermine l'emplacement du fichier des points créés (fig.14).

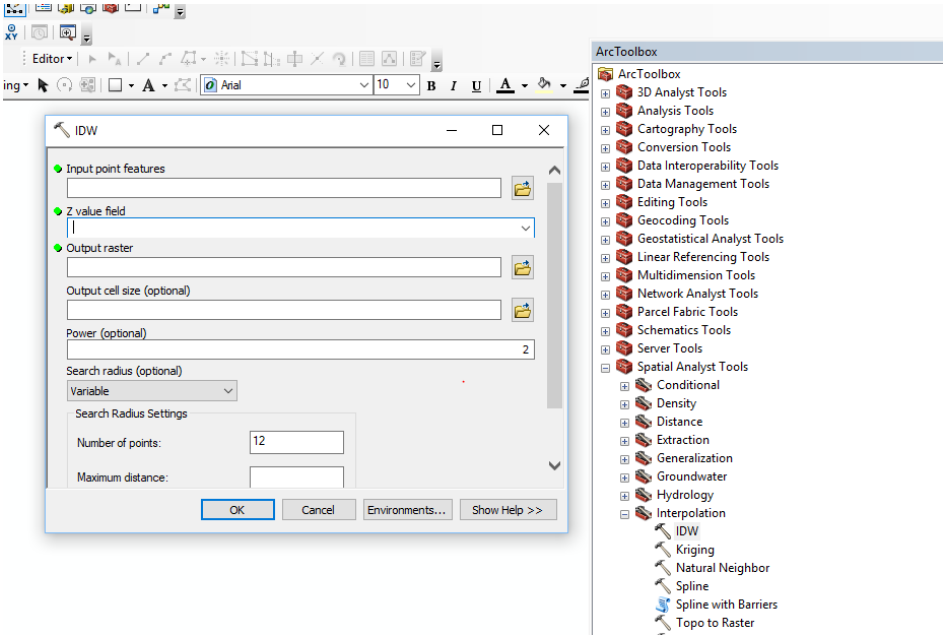


Figure 12. Création d'un MNT à partir des points par interpolation IDW

À l'aide de l'outils IDW d'Interpolation (fig.12), on entre la couche des points tout en spécifiant le dossier de sortie et le nom du MNT. Deux éléments importants à noter sont la valeur du champ Z c'est-à-dire l'altitude des courbes de niveau mais aussi la résolution (out put cell size). Ici, on note 10m comme résolution. Les autres champs peuvent être considérés par défaut. Le MNT généré à partir de point sera de 10 m de résolution.

2.4.2. DEMARCHES METHODOLOGIQUES

2.4.2.1. Volume des masses de terres excavées lors de l'exploitation

Les méthodes d'exploitation utilisées par COMEBU à Kivuvu et Munege sont semi-mécaniques. L'ouverture de carrière au bulldozer, l'extraction manuelle des matériaux kaolinitiques, l'usage intensif de l'eau pour la concentration du minerai et l'érosion ont profondément modifié la morphologie du paysage tant au lieu d'extraction du minerai qu'en aval. Nous calculons donc ici l'évolution du volume des terres excavés à l'aide des MNT de différentes périodes. ArcGIS comprend plusieurs procédures de calcul des volumes, mais la principale et celle utilisée est celle de calcul de volume à partir des courbes de niveau extraites d'une MNT. Les paragraphes qui suivent décrivent cette procédure.

L'Extraction des courbes de niveaux d'un MNT permet d'avoir une série de lignes de contour extraites d'un raster (Fig.13). Elles représentent à quelle hauteur se situe chacune d'elle et c'est ainsi que nous étudierons le volume existant des carrières de Kivuvu et Munege.

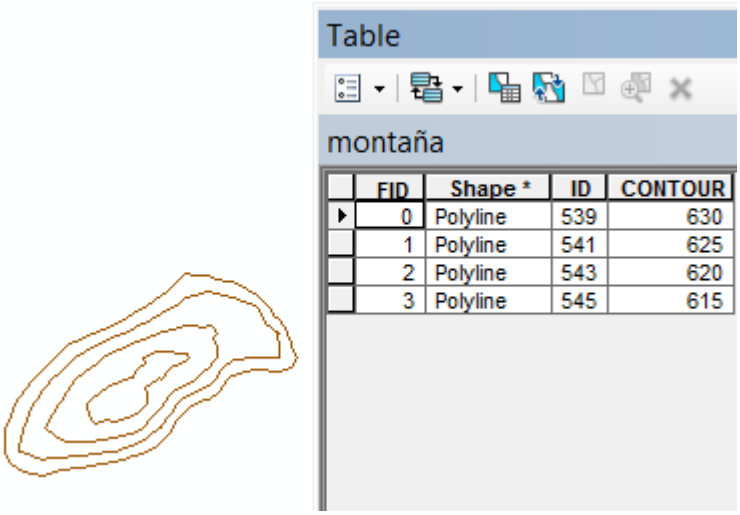


Figure 13. Créations des contours et table d'attribut

Premièrement nous avons créé la forme du Raster. On utilise l'outil**''Topo to raster''**se retrouvant dans les outils 3D : **3D Analyst Tools>Raster Interpolation>Topo to Raster (**Fig.14).

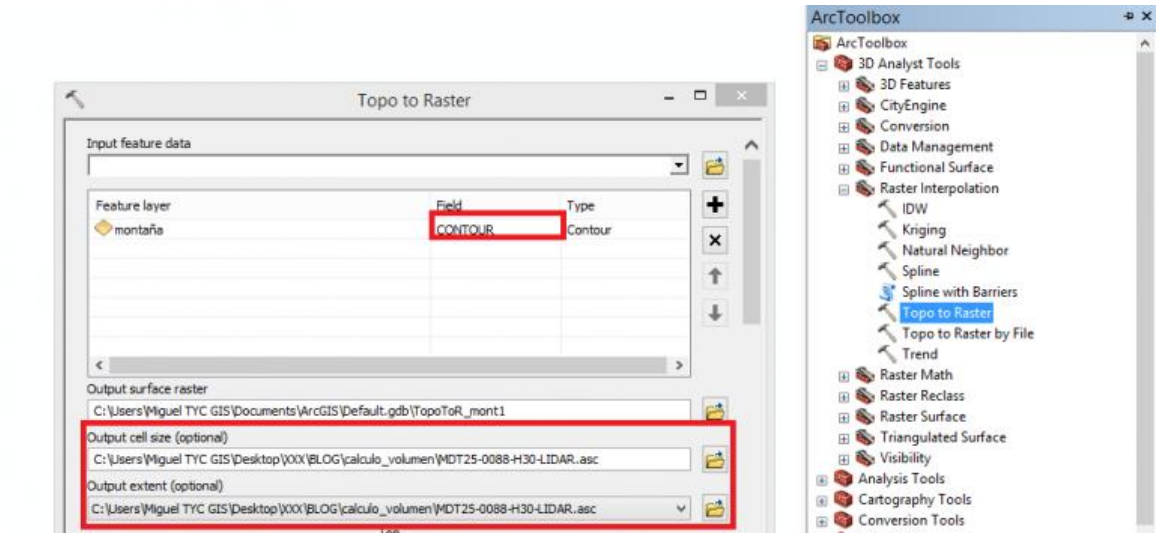


Figure 14. L'outil Topo to Raster des 3D Analyst Tools.

Réalisons que dans l'option ''**field''** il y est sélectionné le champ qui réfère à l'altitude. Pour notre cas, les courbes de niveau ou ''contours''. Les champs ''**cell size''** et

‘‘extent’’ field sont sélectionnés à partir du Raster qui a permis d’extraire les courbes de niveau. Et on obtiendra quelque chose de similaire comme cette figure ci-dessus (Fig.15).

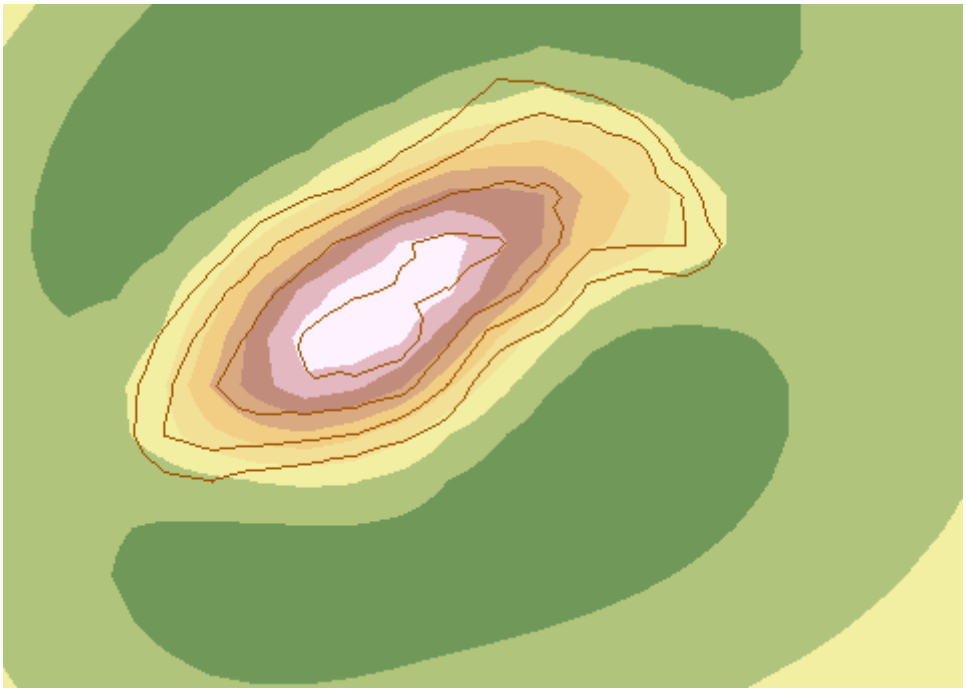


Figure 15. Model d'aspect après extraction

Après cela il faut maintenant délimiter (**delineate**) la zone à calculer. Nous l’avons extrait par ‘‘mask’’ et pour cela on a besoin d’un ‘‘mask’’ qui sera la base de la montagne pour notre cas la carrière de Kivuvu ou de Munege. Nous avons sélectionné la ligne de base à l’aide d’un outil spécialisé et choisir ‘‘**Extract’’** par clic droit sur la couche (fig.16).

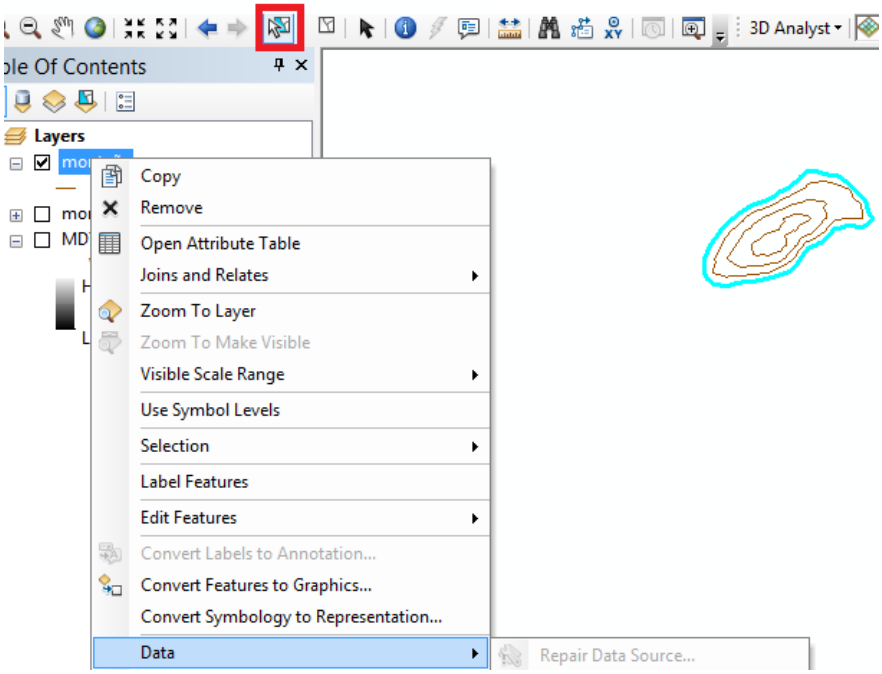


Figure 16. Détermination de la ligne de base pour le calcul de volume

Et comme c'est une ligne nous avons besoin de la superposer sur le polygone ; en ArcGIS, on procède comme suit (Fig.16) : **Data Management Tools>Features>Feature Polygon.**

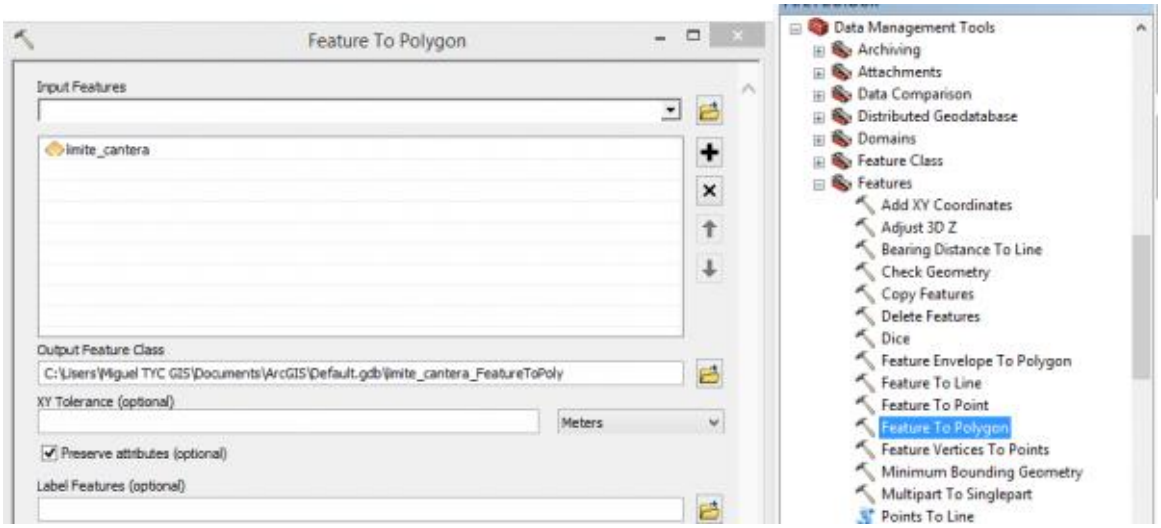


Figure 17. Superposition de la ligne de base sur le polygone de volume

Ici la base du polygone nous l'avons extrait par **‘‘**mask''et on l'utilise comme ‘‘mask'' (fig.18) **: Spatial Analysis Tools>Extraction>Extract by Mask.**

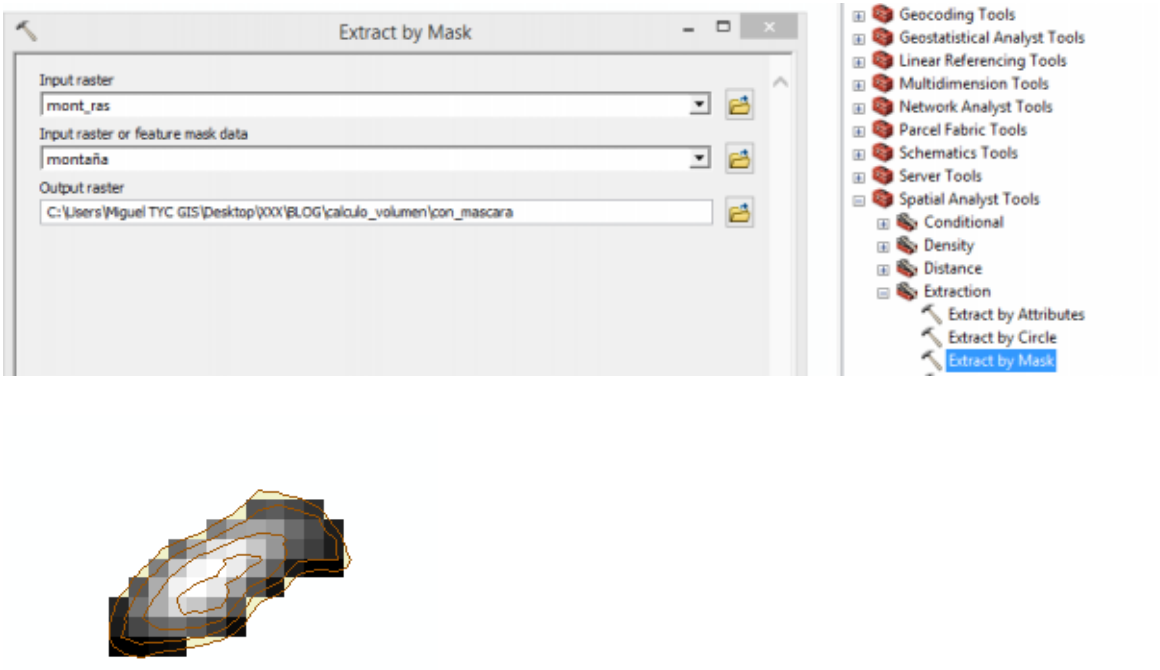
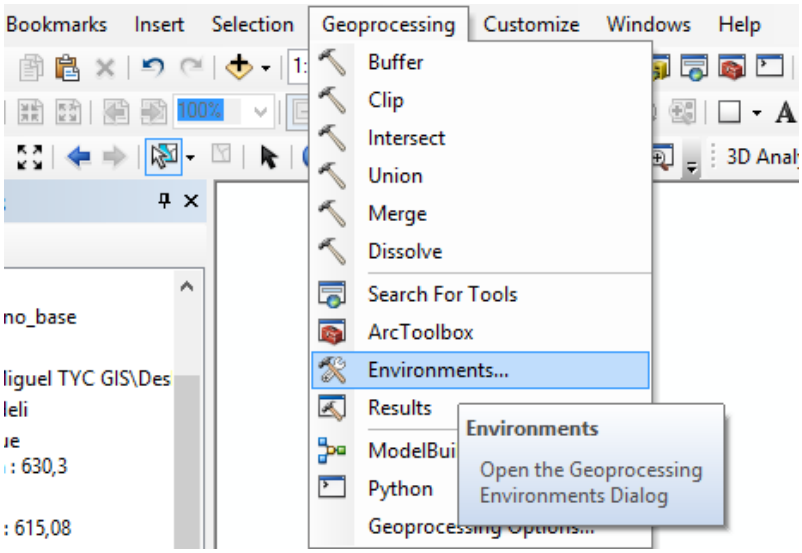


Figure 16. Extraction par "Mask"de la zone à calculer le volume

Avant de calculer le volume, nous devons d'abord décider et faire le choix entre les deux options ‘‘**above’’** ou ‘‘**below’’**et paramétrer l'environnement **(Environment settings)** préparé en tenant compte des coordonnées géographiques et l'analyse du raster (Fig.19).



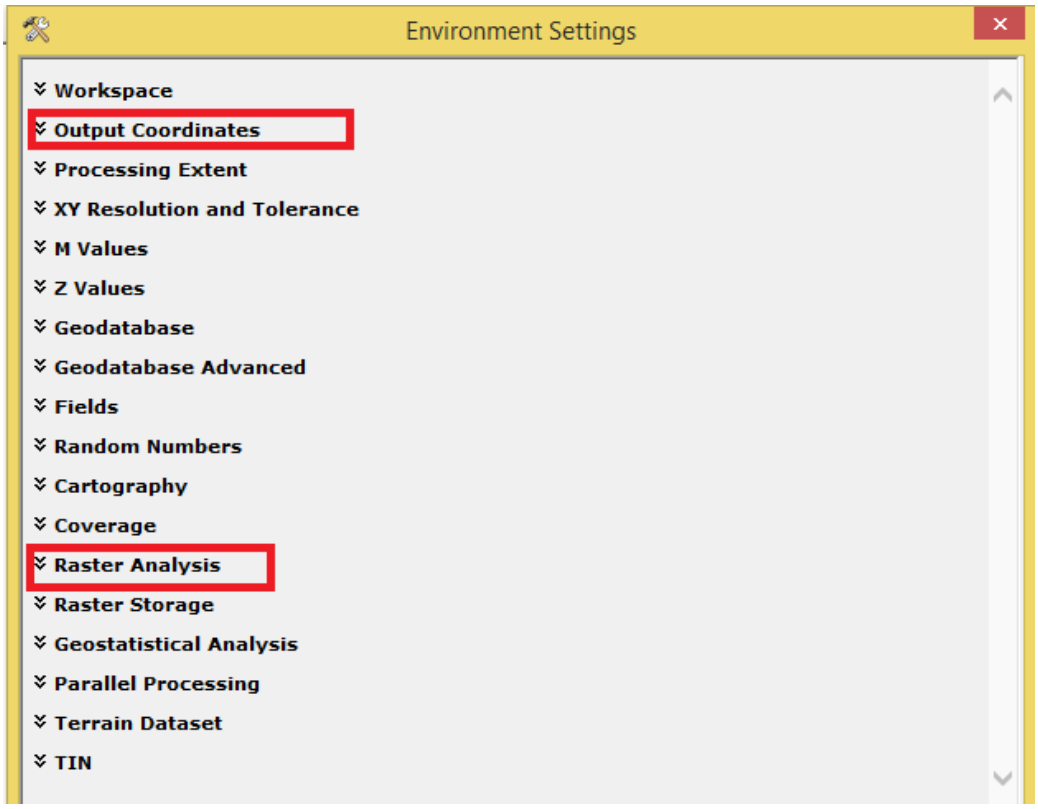


Figure 19. Décision de la partie à évaluer le volume et paramétrage de l'environnement

Pour notre étude consistant au calcul du volume des carrières de Kivuvu et Munege, le choix doit être ‘‘**Below’’** puis **3D Analyst Tools>Functional surface>Surface Volume (**Fig.20).

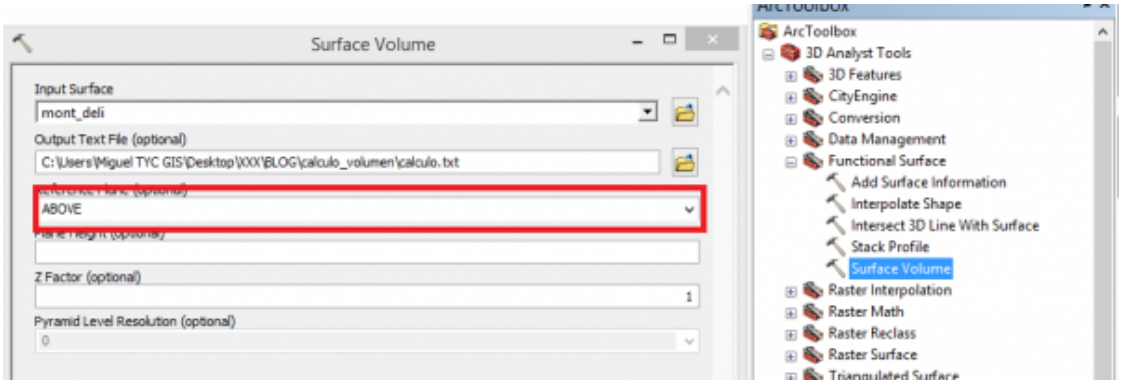


Figure 17. Étape du calcul de volume

Le volume s’obtient en ouvrant le fichier *text* qui accompagne le shapefile dans le dossier d’enregistrement. Et ce fichier donne la surface 2D, la surface 3D et le volume.

2.4.2.2. Modélisation et prédiction de l'évolution du volume des terres excavées

Les premiers résultats de notre étude dont la méthodologie est décrite par lapremière section de ce chapitre ont consisté à déterminer les différences de volume des terres excavées. Cette variation de volume étant due aux travaux d'exploitation minière, deux variables explicatives (tableau 03) peuvent être corrélées à cette variable expliquée. Il s'agit du temps et la production du coltan (Denis Turimumahoro, 2014).

Tableau 3. Définition des variables de la modélisation

Variable expliquée		**Variables explicatives**	
Y	Volume des terres excavées	X1	Durée
		X2	Production du coltan

Les autres données statistiques sur la production minière ont été fournies par la COMEBU complétées par des données de la littérature.

2.4.2.3. La différence de niveau entre deux MNT de 1980 et 2018

Après la création du MNT de 1980 à partir des courbes de niveau de la carte topographique et à partir du MNT de 2018, un calcul de différence de niveaux par point d'observation a été élaboré.

La première étape consiste à la création des points qui serviront de position de différence de niveau. Pour cela, on utilise l'outil **Create random points** de la boîte d'outils **Data Management/FeatureClass**. Dans la boîte de dialogue qui s'ouvre (Fig.21) il faut spécifier le nom du fichier de sortie mais aussi l'emplacement. Il y ajoute le fichier vecteur déterminant les limites, ici Kivuvu ou Munege.

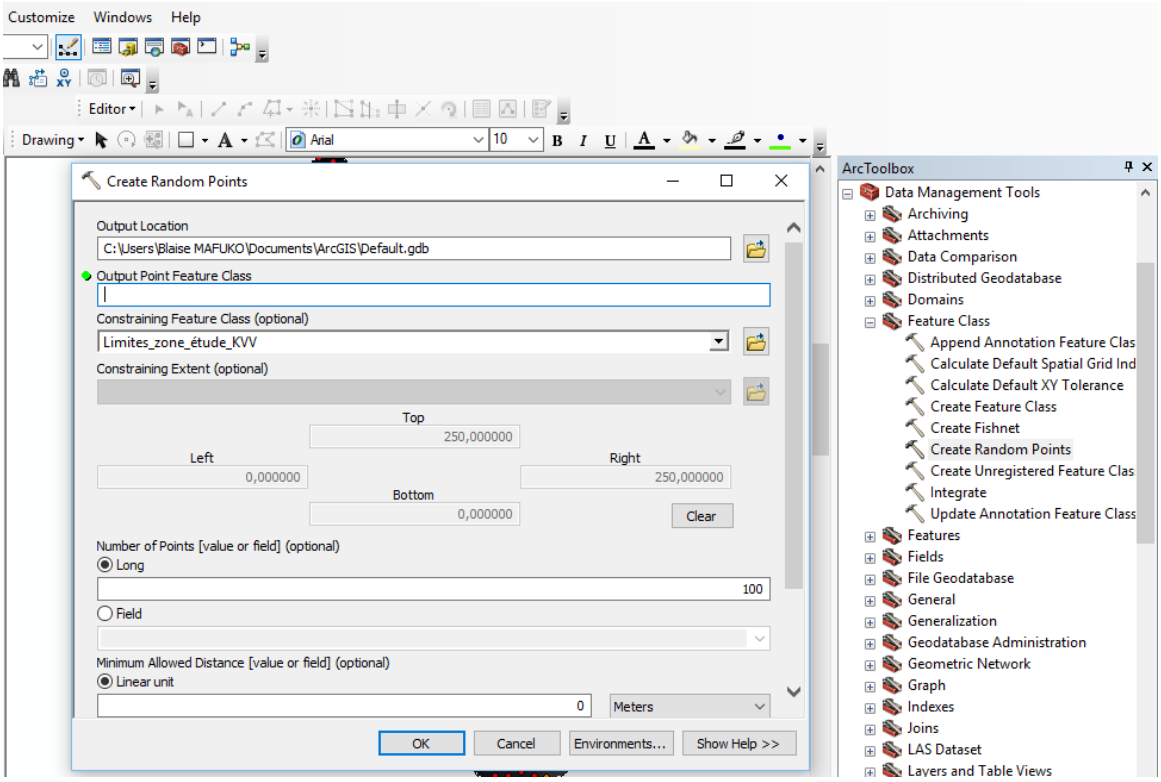


Figure 18. Outils de création des points

La deuxième étape consiste à générer des valeurs à attribuer aux points à partir des plusieurs rasters. Ici, il s'agit des altitudes qu'il faut générer à partir des MNT de 1980 et 2018 qui s'ajoute à la tableau d'attribue de fichier vecteur généré avant. On utilise à cet effet l'outil d'extraction **Extract multi values to point** du groupe d'outils **Spatials analyst** (fig.22). Il faut déterminer le fichier dont la table d'attribut, doit être complété. Dans notre cas c'est ce sont les points générés à la première étape. Ensuite, on ajoute les deux MNT qui fournissent les valeurs d'altitude c'est-à-dire les MNT de 1980 et 2018 (Fig.22).

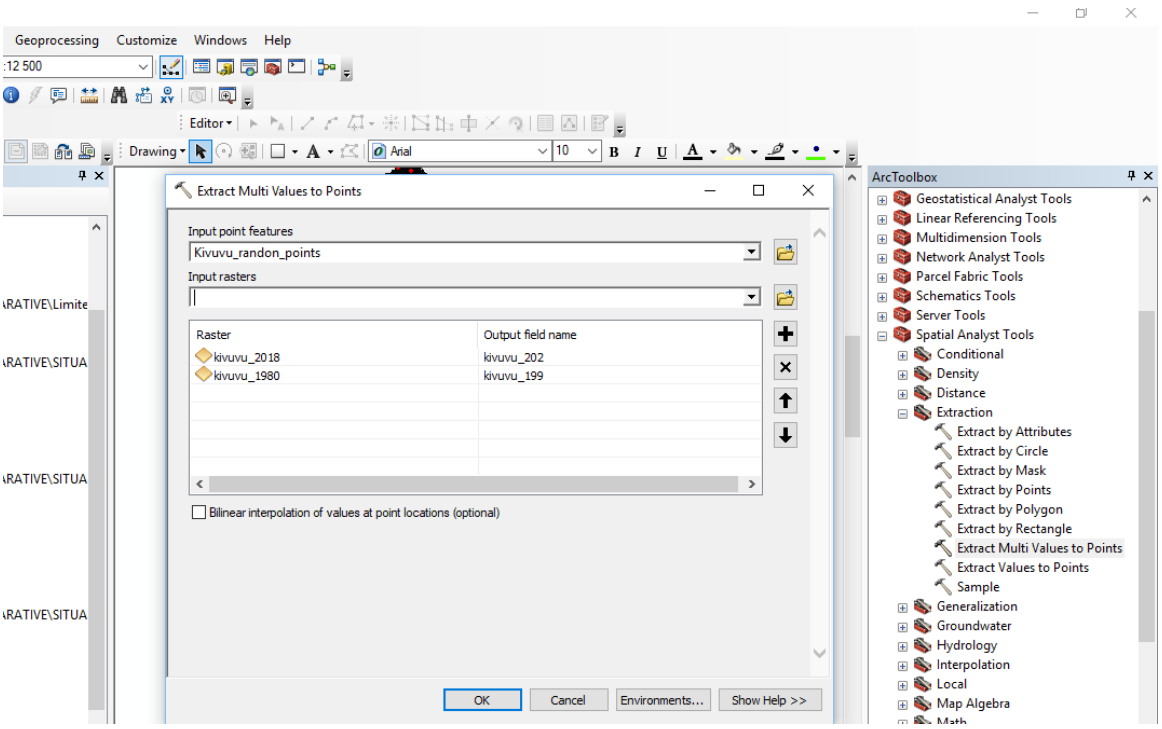


Figure 19. Extraction des valeurs d'altitudes à partir des MNT multi années.

La table d'attribut du fichier s'ouvre avec deux colonnes avec les altitudes de chaque point. Une colonne de différence d'altitude entre 1980 et 2018 est obtenue par l'outil **Field calculator** par un clic droit sur la colonne fig.23).

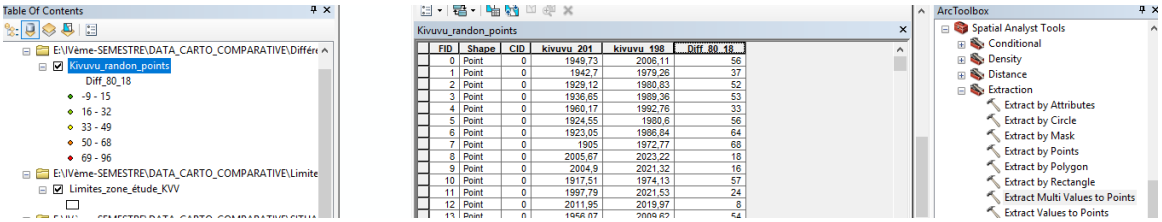


Figure 20. Table d'attribut avec les valeurs d'altitude

2.4.2.4. Cartographie des vallées de la Mwogere envahies par les rejets miniers et débris des roches

Les méthodes d'exploitation à Kivuvu et Mwogere sont encore rudimentaires. Les rejets des exploitations minières et les débris des roches issus des excavations sont entrainées dans la rivière Mwogere directement ou à travers ses affluents. La cartographie de zones dégradées en aval des Kivuvu et Munege a été effectués en différentes période et l'évolution du dynamique du paysage a été dégagée. Pour y parvenir nous avons utilisé trois matériels : la carte topographique de 1980, l'orthophoto du Burundi de 2012 et l'image Landsat 2018 fourni par GoogleEarth. La superposition des couches permet de comprendre la dynamique de la Mwogere qui serait en grande partie influencé par les

matières en suspension issues des travaux miniers. Un coefficient de variation de la surface par unité de temps sera calculé et servira de calculer le coût de l'inaction de la dégradation des marais de la Mwogere.

2.4.2.5. Détermination du coût de l'inaction de la dégradation des marais de la Mwogere en production agricole

Après avoir cartographié et calculé la surface des marais non exploités de la Mwogere, et en comparant avec les données de production par hectare des marais du Burundi de la province Kayanza (où le climat et le sol avoisinent ceux qui auraient été Kabarore), une étude statistique prédictive en barre plots avec R à été faites. D'aprèsle coefficient de variation de la surface par unité de temps, la valeur du coût de l'inaction global de 1980 à 2018 a été estimé.

CHAPITRE III. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

3.1. Introduction

Les exploitations minières de coltan de Kabarore, comme dit dans le premier chapitre, sont conduites par la société COMEBU. La majeure partie des travaux est concentrée dans les carrières de Kivuvu et Munege. Une démarche méthodologique basée sur les SIG a permis d'obtenir plusieurs résultats d'impacts environnementaux physiques, déterminant leur nature et ampleur. Une modélisation prévisionnelle s'en est découlé. C'est l'objet de ce chapitre. Ce chapitre porte donc sur une présentation et une interprétation des résultats d'évaluation des impacts environnementaux physiques. Ces résultats portent sur :

- L'analyse des données statistiques minières de COMEBU à Kabarore,
- La prévision de la réduction des volumes des carrières de Kivuvu et Munege et ses mesures d'atténuation ;
- L'évaluation de l'envahissement des marais de la Mwogere par les débris des roches issues des exploitations minières et ses mesures d'atténuation,
- La perturbation hydromorphologique de la Mwogere par les débris des roches issus des exploitations minières et ses mesures d'atténuation.

3.2. Statistique de production minière de coltan de Kabarore

Le graphique ci-après présente les données statistiques de production couplet à la main d'œuvre. Il analyse la variation de la main d'œuvre en fonction de la production.

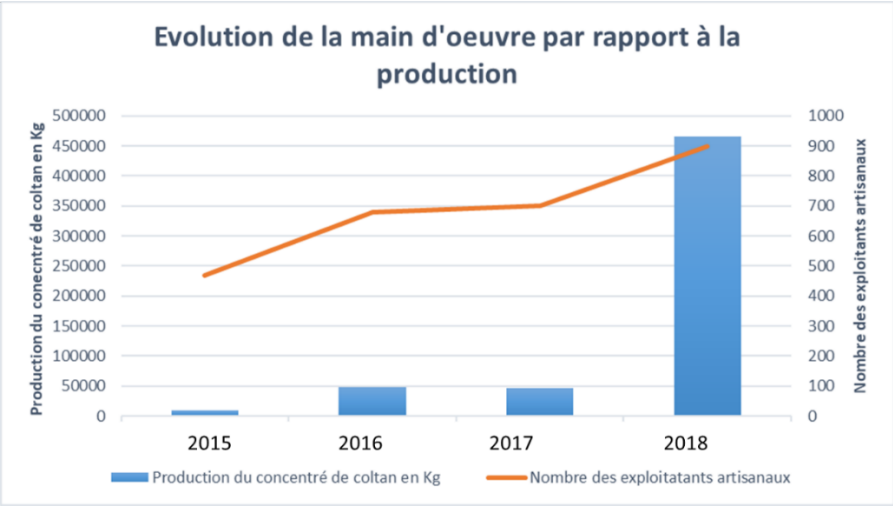


Figure 21. Évolution comparative de la variation de la main d'œuvre par rapport à la production (COMEBU, 2019)

Commentaires : La Figure 24 illustre les données statistiques disponibles chez COMEBU et au regard de cette figure la main d'œuvre varie avec la production du concentré. Les données avant 2015 n'ont pas été accessible. Mais cette variation n'est pas proportionnelle. En effet, pour une augmentation de 97,8% de production entre 2016 et 2018, la main d'œuvre augmenté que de 47,7%. Et cela est justifiable du fait que la main d'œuvre ne constitue pas le seul facteur de production dans ces exploitations semi-industrielles de COMEBU. La production est fonction aussi de la teneur du corps minéralisé exploité, la mécanisation, le taux de récupération lors du traitement du minerai, l'occurrence des accidents de travail dans la mine.

3.3. Dégradation du paysage et prévision de la réduction des volumes des carrières

3.3.1. Comparaison des dimensions spatiales des carrières entre 2011 et 2018

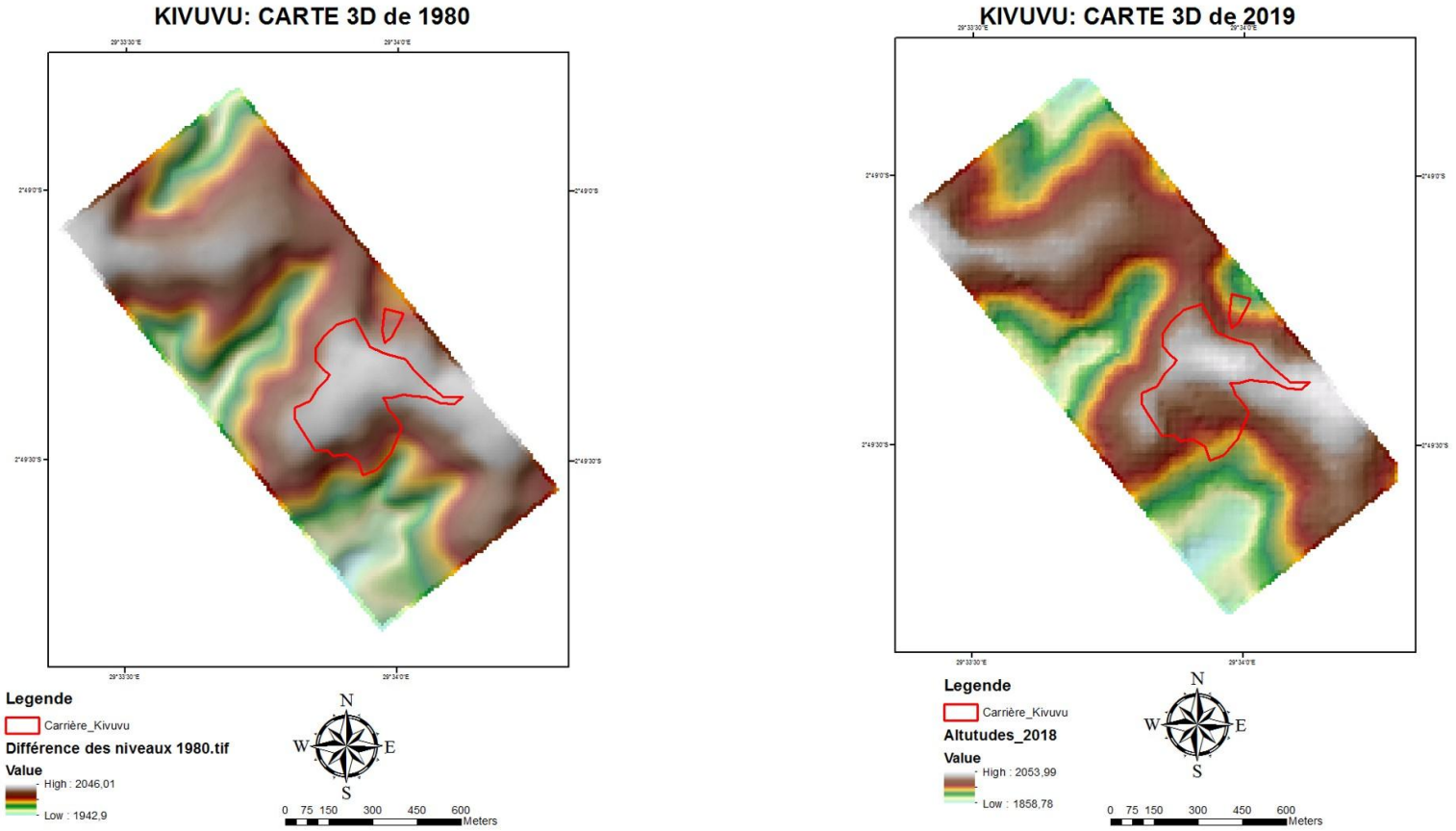


Figure 22. Situation 3D des carrières de Kivuvu

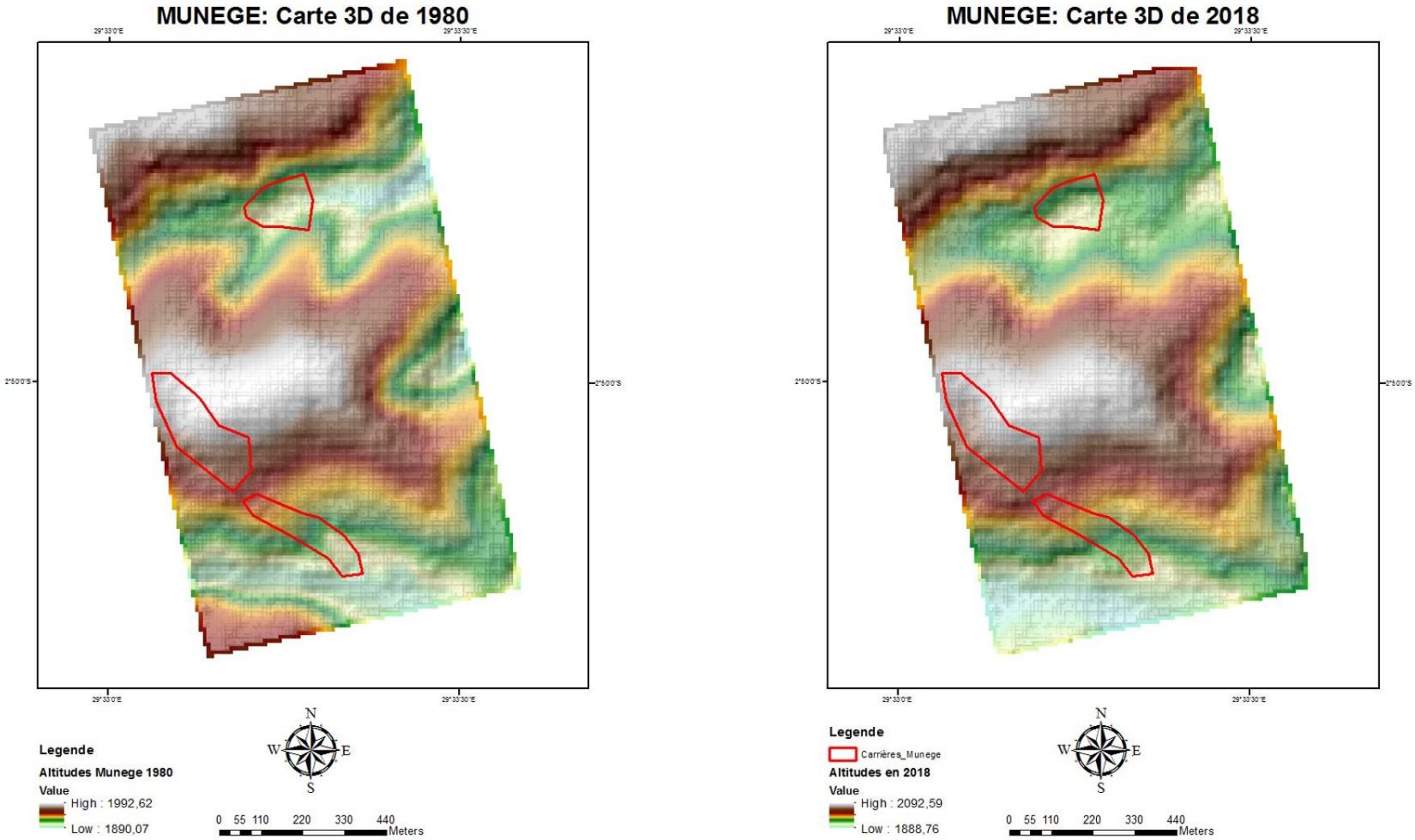


Figure 23. Situation 3D de Munege de 1980 et 2018

Commentaires : Au regard des figures 27 et 28, nous constatons une variation de l'aspect du relief autour des carrières (polygones rouges). La variation est plus prospectable sur les contours des collines mais aussi les vallées longées par les drainages miniers provenant des carrières.

3.3.2. Variations des volumes, surfaces 2D et 3D des carrières entre 2011 et 2018

Tableau 4. Comparaison des volumes et surfaces des carrières entre la situation de 1980 et celle de 2018

A. KIVUVU	**1980 MNT 10m (Topo to raster)**	**2018 (10m)**	**Différence entre 1980 et 2018**
Surface 2D en m^2	1340000	1339300	700
Surface 3D en m^2	1371725	1460584	-88858
Volume en m^3	195773842	143685666	52088171
B. MUNEGE			
Surface 2D en m^2	1197100	1195400	1700
Surface 3D en m^2	1232830	1301810	-68979
Volume en m^3	64219569	116857497	-52637928

Commentaires : Ce tableau comprend les résultats du calcul des volumes des carrières entre la situation de 1980 et celle de 2018. Nous constatons que Kivuvu présente un taux de réduction de 26,6% par contre Munege présente une augmentation de volume de52637928 m^3. Pour les deux carrières, nous constatons une augmentation de la surface 3D et une réduction des surfaces 2D.

3.3.3. Localisation des variations de volume

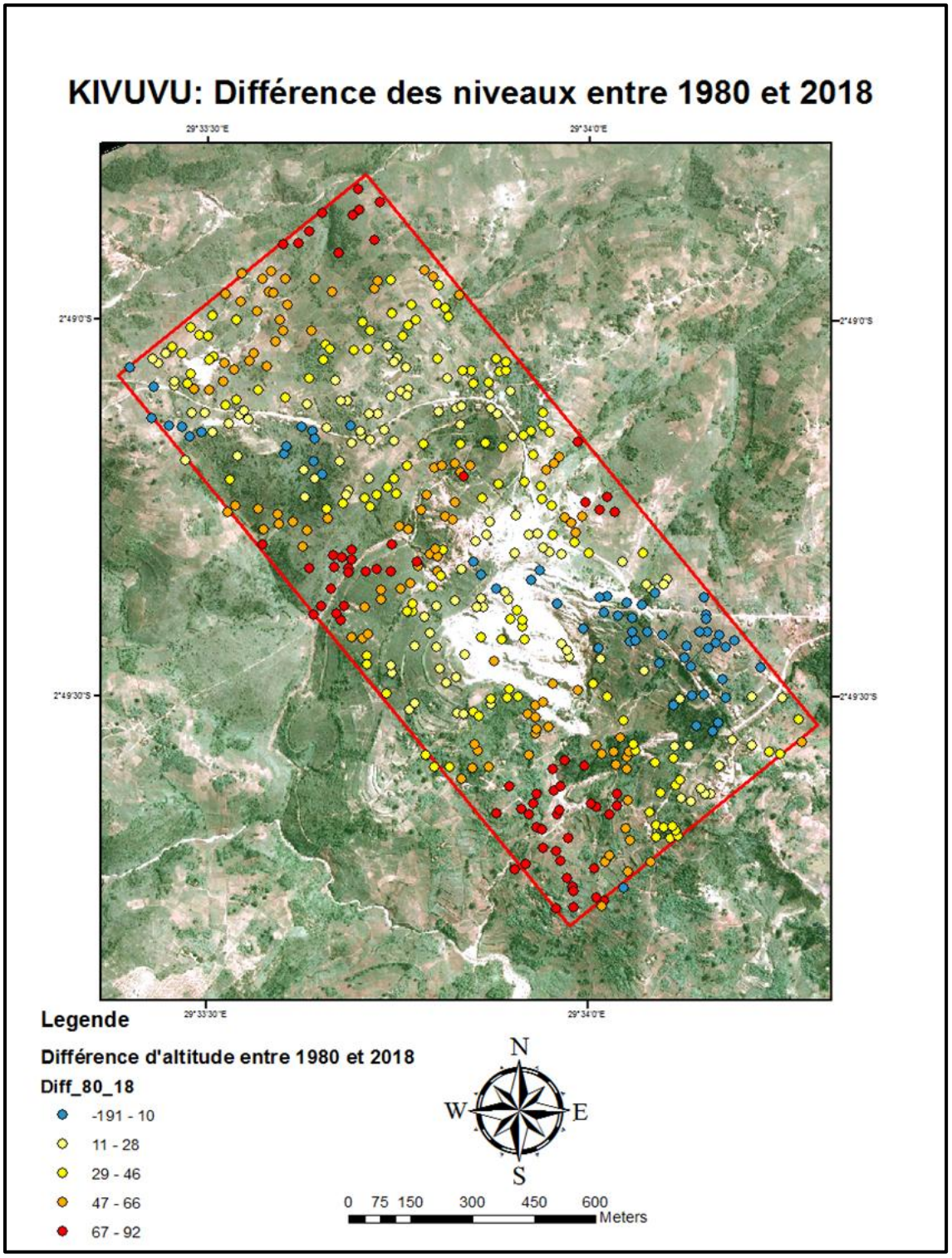


Figure 24. Carte des points de variation de volumes entre 1980 et 2018 de la zone découpée de la carrière de Kivuvu

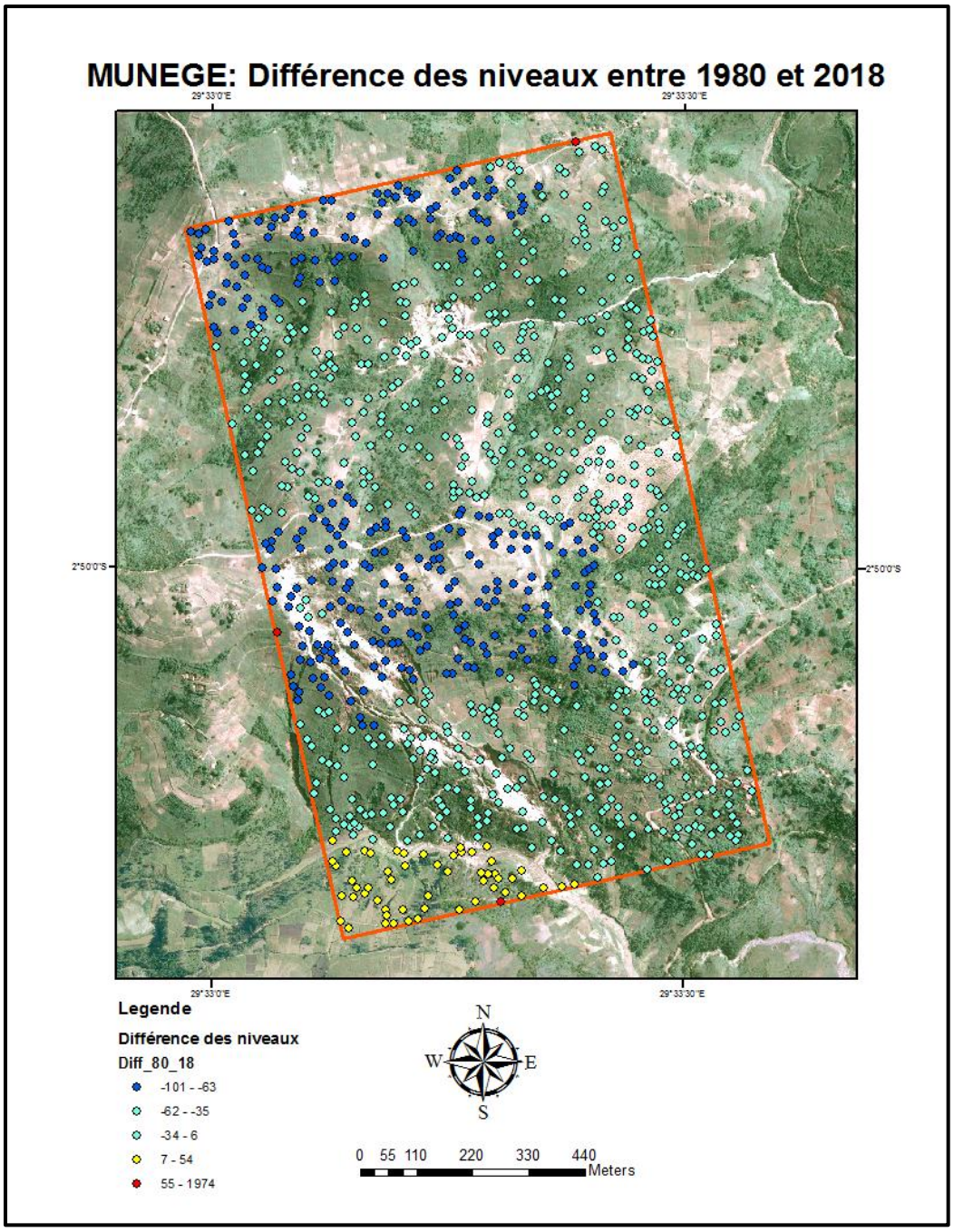


Figure 25.. Carte des points de variation de volumes entre 1980 et 2018 de la zone découpée de la carrière de Munege

Commentaires : La différence entre les MNT de 1980 et 2018 a donné des points avec des classes de différence de volumes (Figs.27 et 28). Les points jaunes, oranges et rouges se classent respectivement par classe de degré croissant du niveau de variation de volume. Les points bleus (foncés et clairs) représentent les endroits où il y a eu accumulation des débris des roches et donc l'augmentation du volume. L'ensemble des points a été superposé sur l'ortho photo de 2012 pour analyser la localisation des emplacements des variations de volume.

3.3.4. Interprétation

3.3.4.1. Variation des volumes

Les deux MNT de la région de Kabarore utilisés ici proviennent des sources différentes. L'un de 1980 est issue des courbes de niveau de la carte topographique de 1980 et a été téléchargé sur portail d'ASTER 30m (https://search.earthdata.nasa.gov/search). Précisons que le MNT de 30m de résolution a été haussée à 10m de résolution. Ces deux MNT nous ont permis de calculer les volumes des carrières entre les deux périodes. Les volumes ont été calculés en tenant en compte l'altitude la plus basse pour chaque carrière (Fig.27 et 28). À Kivuvu, elle était de 1857m et de 1888m pour Munege.

Eu égard à ces résultats (Tab.04), la zone découpée pour la carrière de Kivuvu avait un volume de 195773842,1234m^3 en 1980 contre 143685666,1499m^3 en 2018 soit une réduction de 26,6%%. Par contre, pour la zone découpée de la carrière de Munege le volume a augmenté de 52637928,31m^3soit 45%. La différence des résultats entre les deux carrières est justifiée par la méthode d'exploitation, le taux d'érosion et la précision du MNT de 2018.

En effet, la carrière de Kivuvu est mécanisée et les débris sont déplacés hors de la carrière, cela conduit à la réduction du volume de la colline. La mécanisation conduit à la fragmentation poussée de la roche encaissante et ainsi l'effet de goutte de pluie serait plus prononcé pour Kivuvu que Munege. Cette augmentation de volume observée à Munege serait due à trois facteurs :

L'effet de foisonnement des roches lors de l'exploitation : le taux de foisonnement ne peut pas être calculé ici par l'utilisation des MNT, il faut une démarche méthodologique appropriée et adapté à la mécanique des roches. Toutefois, lors de l'exploitation, les roches schisteuses encaissantes de la pegmatite augmentent des volumes. Naturellement, ces sont des roches dures et très compactes. Leur fragmentation s'accompagne toujours par une augmentation des volumes.

La résolution aussi de 30m ramenée à 10m serait aussi un autre facteur ne permettant pas une évaluation nette de variation de volumes. En effet, la technologie spatiale d'acquisition des MNT ne permet pas parfois de détecter les nettes variations topographiques d'un terrain. Trois caractéristiques principales permettent d'avoir un

aperçu rapide d'un modèle numérique de terrain et de juger de son adéquation à un besoin particulier (Gourmelon, 2003) :

- Sa résolution, c'est-à-dire la distance entre deux points adjacents du MNT ;
- Sa couverture géographique : les zones géographiques pour lesquelles des données sont disponibles ;
- La qualité des données : elle dépend de l'application ou non de traitements de correction des données après leur récupération. En effet, certaines méthodes d'acquisition laissent des artefacts dans les données (des zones brouillées sur des lignes côtières du fait de l'écume des vagues qui fausse les échos radar, des « trous » lorsque des nuages étaient présents lors d'un relevé satellitaire…).

Enfin, l'itinérance par tâtonnement des creuseurs d'un endroit à autre et l'utilisation des outils rudimentaires d'exploitation occasionnent l'entassement des débris des roches excavés à la surface. Ainsi, le volume du terrain augmente par foisonnement. La détermination de l'orientation des espaces où le volume de terrain a varié (points 3.3.3 et 3.3.4.3) permet de reconfirmer l'effet de l'exploitation minière sur la destruction du paysage.

3.3.4.2. Variation des surfaces 2D et 3D

La surface 2D représente l'aire géographique en projection horizontale de la carrière par contre la surface 3D tient compte de la surface avec la troisième dimension c'est-à-dire l'altitude. Que pour Kivuvu ou Munege, toutes les deux carrières présentent une similitude des résultats (Tab.5). Les surfaces 2D ont diminué de 1980 à 2020 de 700m^2 pour Kivuvu contre 1700m^2 pour Munege. Par contre, la surface 3D a augmenté pendant cette période de 20 ans ; bien que cette augmentation soit minime (presque 5% pour Munege et 6% pour Kivuvu), l'augmentation de la surface 3D est justifiée par l'entassement des débris de roches après exploitation.

3.3.4.3. Localisation des emplacements des points de différence de volumes

Les cartes des figures 29 et 30 présentent les points de différence de niveau sur l'espace découpé regroupant les carrières de Kivuvu et Munege. Pour Kivuvu, nous constatons comme le résultat de calcul de différence de volume (Tab.04) l'a indiqué, une variation de volume quasi généralisée. Cependant, une spécification de l'emplacement de cette réduction s'observe. En effet, les points rouges et jaunes (Fig.27), représentant les points à forte réduction de volume, sont localisés dans le prolongement des cours d'eau

de drainages de résidus de lavage de la pegmatite. Cela confirme l'hypothèse selon laquelle la charge minérale en suspension des eaux dans le drainage des exploitations augmente le pouvoir érosif des cours d'eaux à Kabarore. Une analyse précédente de la turbidité de la rivière Mwogere en 2013 avait aussi confirmé cette hypothèse (Kataraza & Sinarinzi, 2013). Et au niveau de la carrière de Kivuvu, une réduction de volume est aussi signalée mais pas très prononcée. Cela serait justifié par le phénomène de foisonnement des débris des roches. Signalons aussi qu'à certains endroits (points bleus), une augmentation de volume est notée. Si on analyse cet emplacement par rapport au fond de l'orthophoto de 2012, on constate que les points représentent les entreposages des anciens débris des roches issues des exploitations antérieures.

L'interprétation générale de la carte de Munege (Fig.328) permet de déduire une augmentation de volumes généralisée due certainement au foisonnement des débris de roches et une exploitation avec des techniques rudimentaires. Toutefois, on note toujours une réduction des volumes (points orange et jaune) dans le prolongement des cours d'eau, ici la Nyakavovo.

3.3.4. Analyse prévisionnelle de réduction de volume

L'analyse prévisionnelle de réduction de volume est faite seulement pour la carrière de Kivuvu, Munege n'ayant pas affiché une réduction nette de volume. Pour cette période de 38 ans le volume des terres réduit annuellement à Kivuvu est de 1370741 m^3. Ainsi, pour ramener l'espace découpé regroupant les carrières à une surface plane de 1857m d'altitude, il faudrait presque 143 ans, considérant les mêmes conditions d'exploitations et un volume initial estimé en 1980 à 195773842m^3.

Ces résultats paraissent plus réalistes que ceux de Ntenge et Turimumahoro (2010). En effet, ils ont retrouvé un taux de réduction annuelle de 626910m^3 et une période de 78622 ans pour que la carrière soit épuisée. Ces résultats auraient été surestimés à cause de la démarche méthodologique non adaptée (Ntenge & Turimumahoro, 2010). Après la génération du MNT à partir des courbes de niveau de 1980, le MNT de 2009 a été produit à partir des points GPS récoltés sur terrain. Cette méthode conduit à des incertitudes car la carrière étant constituée des débris des roches entassées et instables, certains endroits seraient inaccessibles. Dans leur travail, ils n'ont pas aussi fixé la surface de référence de base. Ainsi, les incertitudes et la non fixation de la surface de base conduiraient à une surestimation du volume. Précisons toutefois que

dans leur travail, ils préconisent plusieurs facteurs qui pourraient réduire ce temps de 78622 ans.

Notons aussi que la réduction de volumes n'est pas seulement liée seulement aux exploitations minières mais aussi à l'érosion généralisé au Burundi et surtout dans cette région de la crête Congo-Nil (Cochet, 1996; Rishirumuhirwa, 1994; Simonard, Duchaufour, Bizimana, & Mikokoro, 1994).

3.4. POSITIONNEMENT DU BASSIN DE DÉCANTATION EN AVAL DES SITES D'EXPLOITATION

3.4.1. Carte de localisation

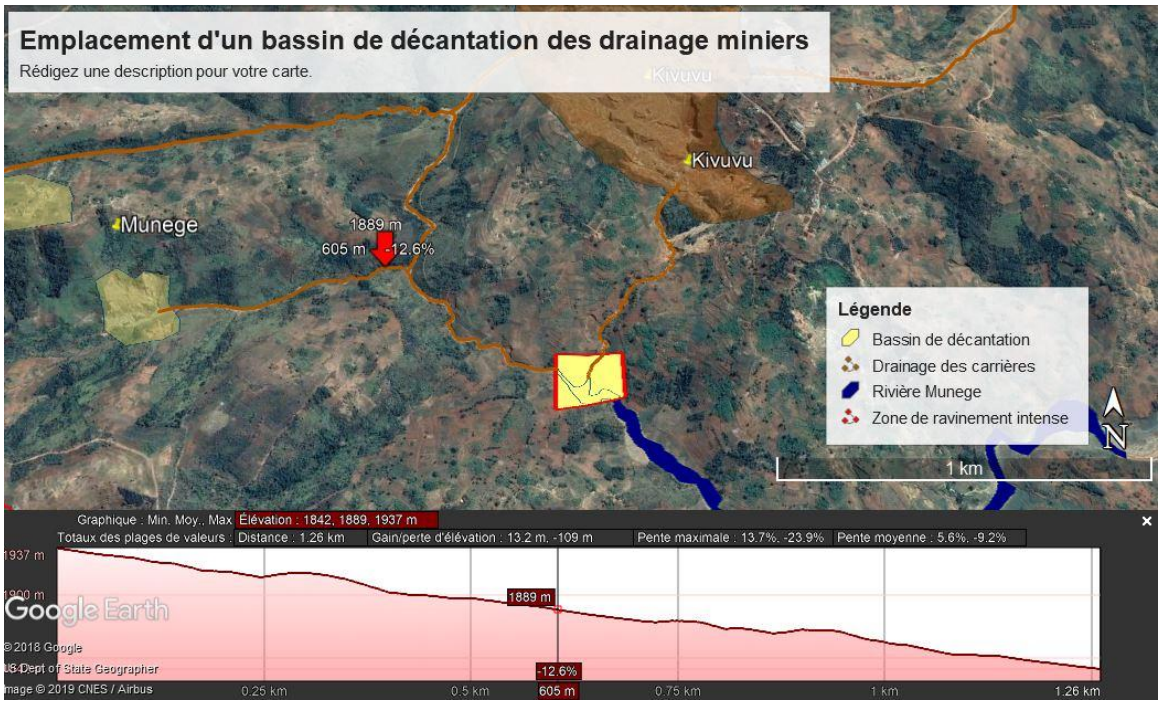


Figure 26. Localisation du bassin de sédimentation en aval des sites miniers et profil à long des drainages

Commentaire : Après une analyse de la pente dans la région et se servant du réseau hydrographique autour des mines, une position idéale (polygone jaune sur la figure 31) a été déterminée pouvant recueillir les drainages miniers de Kivuvu et Munege.

3.4.2. Interprétation

La rivière Mwogere draine les rejets des débris des roches provenant des carrières de Kivuvu et Munege. Ces drainages miniers sont facilités par la topographie (Fig.29). En effet, il existe une dénivellation de 75m entre Kivuvu (2000m d'altitude de moyenne) et la Rivière Mwogere. De son côté la carrière de Munege est située à une altitude moyenne de 1960m soit 45m une dénivellation au point de contact avec la rivière Mwogere. Et le

profil à long représenté sur la carte de la figure 18 montre un cas de la dénivellation d'un drainage de la carrière Munege. Cette dénivellation est de 95 m entre 1937 m à Munege et 1842 à point de contact du drainage avec la Mwogere. Après analyse de la variation topographique et les points d'inflexion des drainages nous avions proposé un bassin de décantation des débris des roches situés autour du point des coordonnées UTM 35M 785370 mE et 9687195 mS.

3.5. ÉVALUATION DE L'ENVAHISSEMENT DES MARAIS DE LA MWOGERE PAR LES DÉBRIS DES ROCHES ISSUES DES CARRIÈRES

3.5.1. Superficie des marais de la Mwogere et scénarios de valorisation

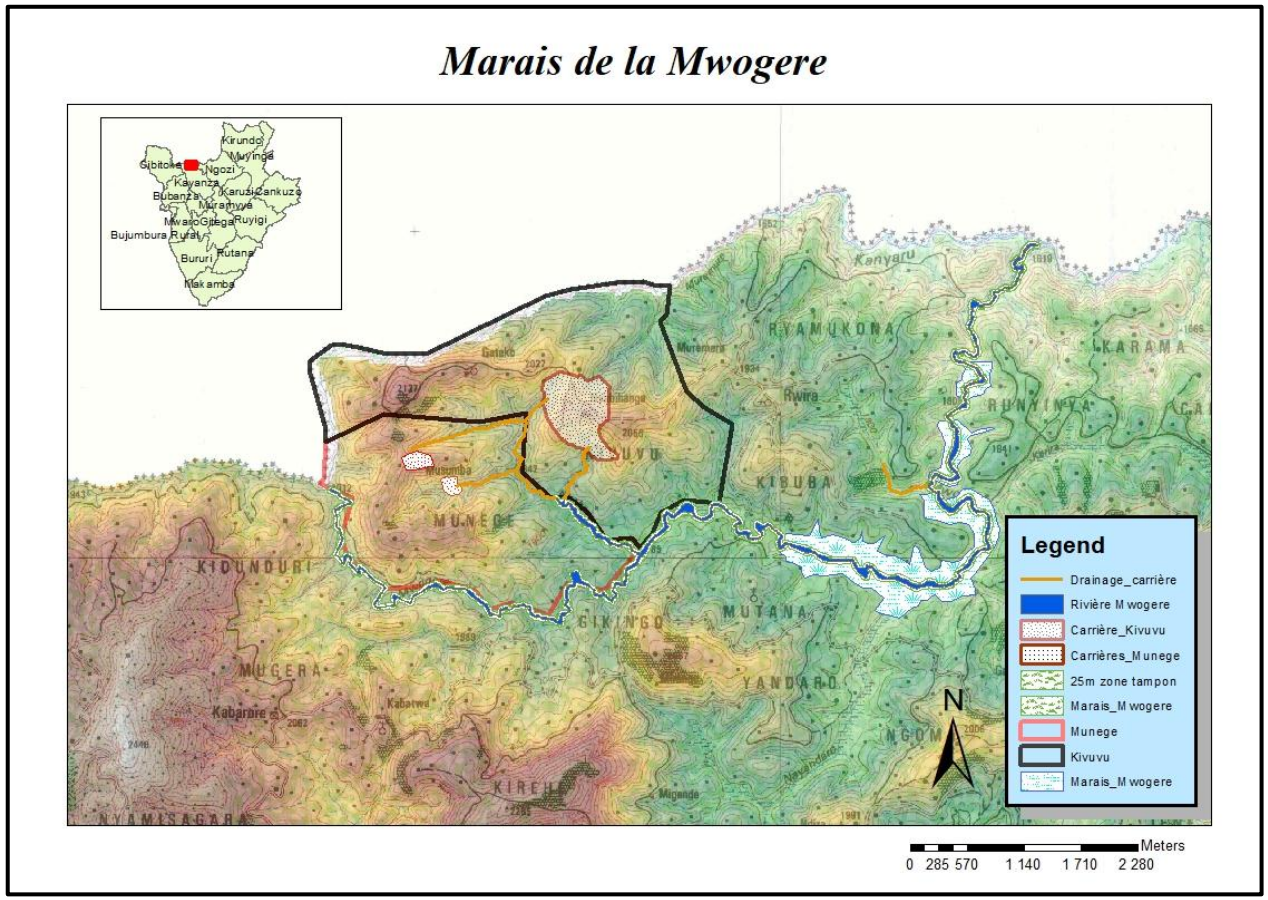


Figure 27. Localisation des marais de la Mwogere et position des carrières de Munege et Kivuvu

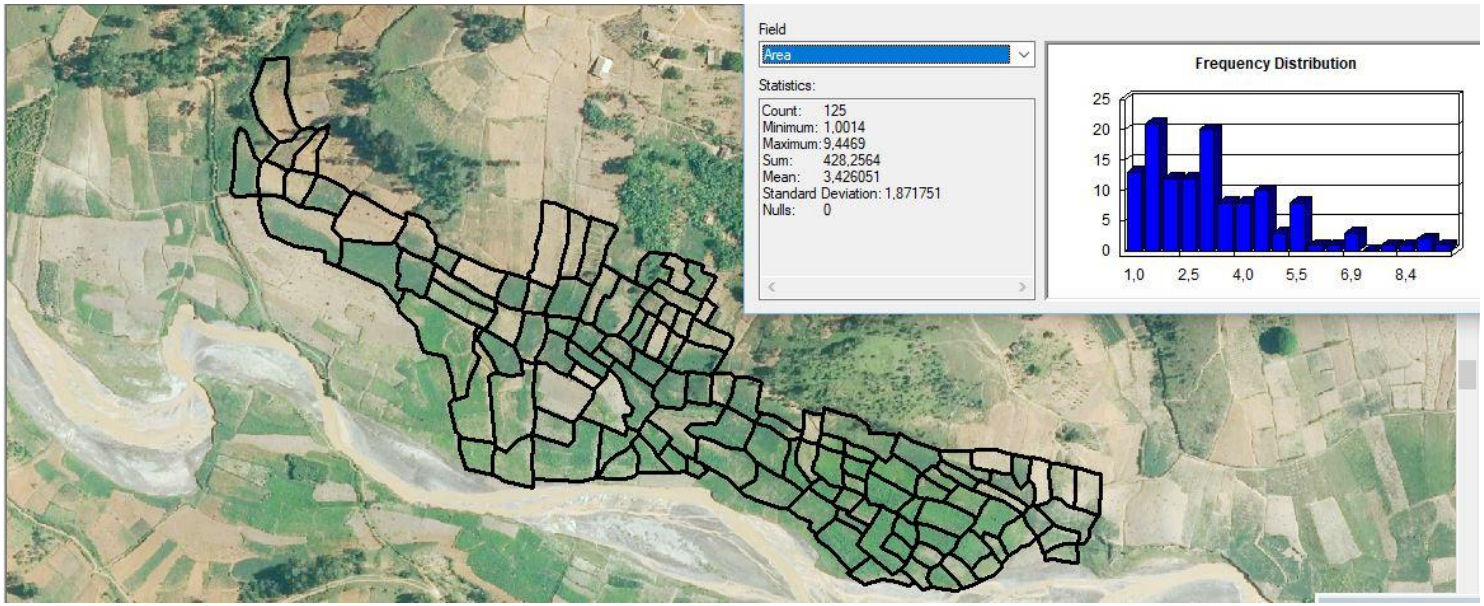


Figure 28. Estimation de la superficie moyenne des parcelles de champ à Kabarore

Commentaires : La carte de la figure 31 positionne les marais de la Mwogere par rapport aux activités minières. Une portion de la région aménagée en champ a été servie de modèle pour déterminer la superficie moyenne de parcelle de champ dans la région. Sur 125 champs échantillonnés représentant 428.256ares, la superficie moyenne a été de 3,426ares. Précisons toutefois que la plupart des champs ont des superficies inférieures à cette moyenne (Fig.31). En effet, l'écart-type est de 1,87, la superficie maximale étant de 9,44 ares contre le minimum de 1,001 ares. Pour le scénario de valorisation des marais (Tableau 5), nous avons considéré la moyenne car elle se rapproche à l'espace moyen général des champs dans les marais du Burundi mais aussi la petitesse des champs observée sur l'image satellitaire serait peut-être dû à la diversification des cultures dans les marais.

Tableau 5. Scénarios de valorisation des marais de Mwogere

A. Exploitation agricole vivrière					
Marais de la Mwogere	Superficie en ha	Champs de superficie moyenne de 3,42 ares		Champs de superficie moyenne de 2 ares	
		Nombre des parcelles	Nombre d'exploitants en raison de 3 parcelles par personne	Nombre des parcelles	Nombre d'exploitants en raison de 3 parcelles par personne
A	10,14	296,491	98,830	507	169
B	16,69	488,012	162,671	834,5	278,1666667
C	11,3	330,409	110,136	565	188,3333333
Totaux	38,13	1114,912	371,637	1906,5	635,5
B. Exploitation industrielle théicole					
	Superficie en ha	Production Feuille verte (4705Kg/ha/an)	Transformation Thé Sec TS (3,25Kg de FV/1Kg TS[1])	Valeur Exportation au niveau de Mombasa (0,13USD/Kg de TS)	Valeur exportation en FBu (1867,3FBu/1USD[2])
Marais de la Mwogere	38,13	179401,65	55200,50769	7176,066	13 399 868,04

[1] L'Annuaire des statistiques du Burundi 2017 (ISTEEBU, 2017) étant le seul annuaire disponible lors de la rédaction de ce mémoire et n'étant précis par rapport au rendement et prix du thé, nous avons considéré des statistiques se trouvant dans une étude de FAO de 2018 (Schuster & Ndimunbandi, 2018)

[2] Le taux de change considéré est la moyenne journalière du 18 Octobre 2019 (BRB, 2019).

3.5.2. Interprétation

Le tableau 5 ci-dessus compare deux scénarios de valorisation des marais de la Mwogere. Dans le premier scénario, l'objectif est plus social qu'économique. Ainsi, ce scénario révèle le nombre des parcelles de champs et agriculteurs locaux : 1115 champs de 3,42 ares pour 371 personnes en raison de 3 parcelles par individu ou encore 1906 parcelles de champ de 2 ares pour 635 personnes toujours en raison de 3 champs par personne.

Par contre le deuxième scénario a un objectif plus économique que social. Ainsi, ce scénario porte sur la valorisation des marais de Mwogere en une exploitation agricole industrielle du thé. En effet, le choix du thé est justifié par son adaptation aux conditions agro-écologiques de Kabarore, le Buyenzi (ANGORAN, 2004; République du Burundi - Ministère de l'agriculture et de l'élevage, 2017; Schuster & Ndimunbandi, 2018). Ces résultats révèlent que sur 38,13 ha, il est possible d'obtenir une production annuelle de 179401,65Kg de feuilles vertes avec un rendement de 4705Kg/ha/an. OBT ayant augmenté le taux de transformation du thé vert en thé sec de 3,25Kg de feuilles vertes par 1Kg thé sec (Schuster & Ndimunbandi, 2018), à l'exportation, cela remporterai 13 399 868,04 FBu au taux de 1867,3FBu/1USD.

3.6. PERTURBATIONS HYDROMORPHOLOGIQUES DE LA MWOGERE PAR LES DÉBRIS DES ROCHES ISSUES DES CARRIÈRES

3.6.1. Comparaison des largeurs mouillées d'une zone impactée de la Mwogere et d'une autre zone non-impactée

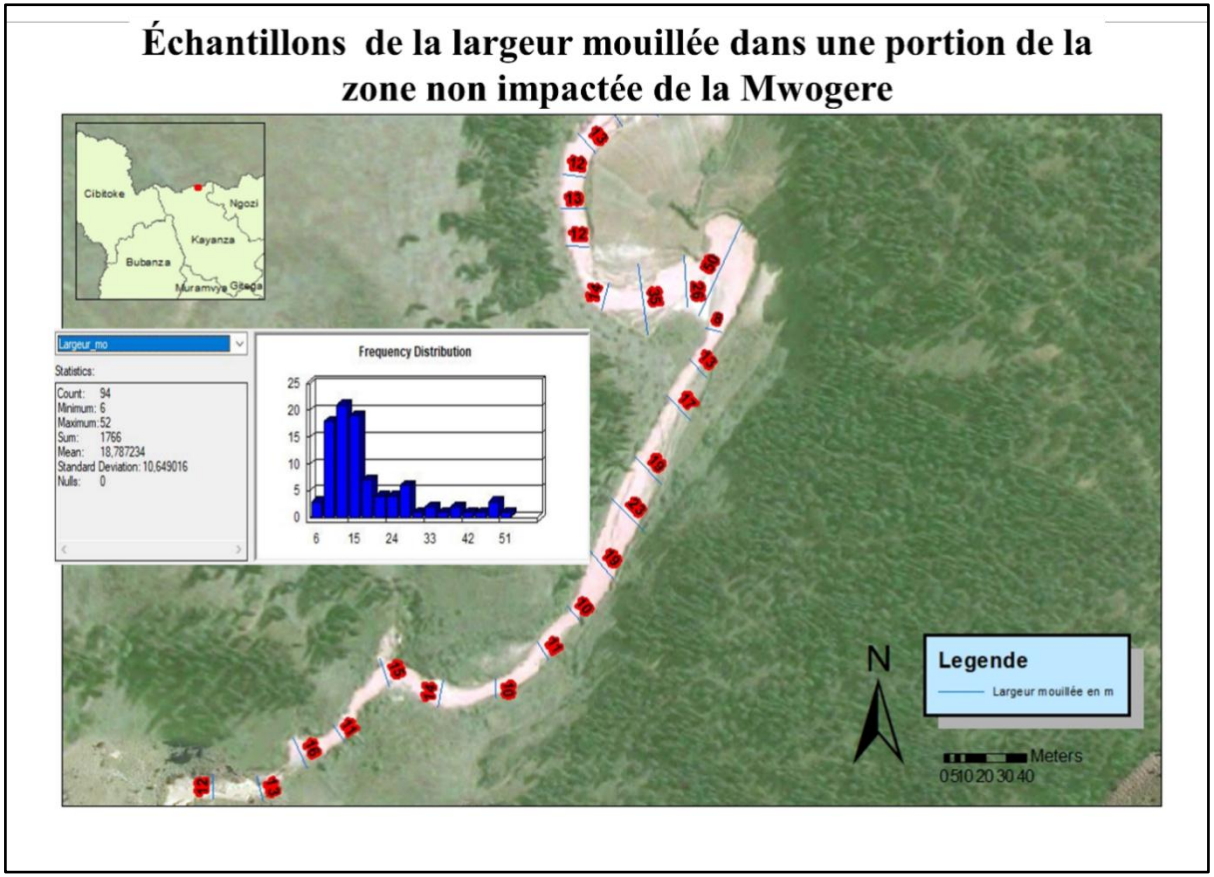


Figure 29. Carte d'échantillonnage et données statistiques de la largeur mouillée de la zone non impactée

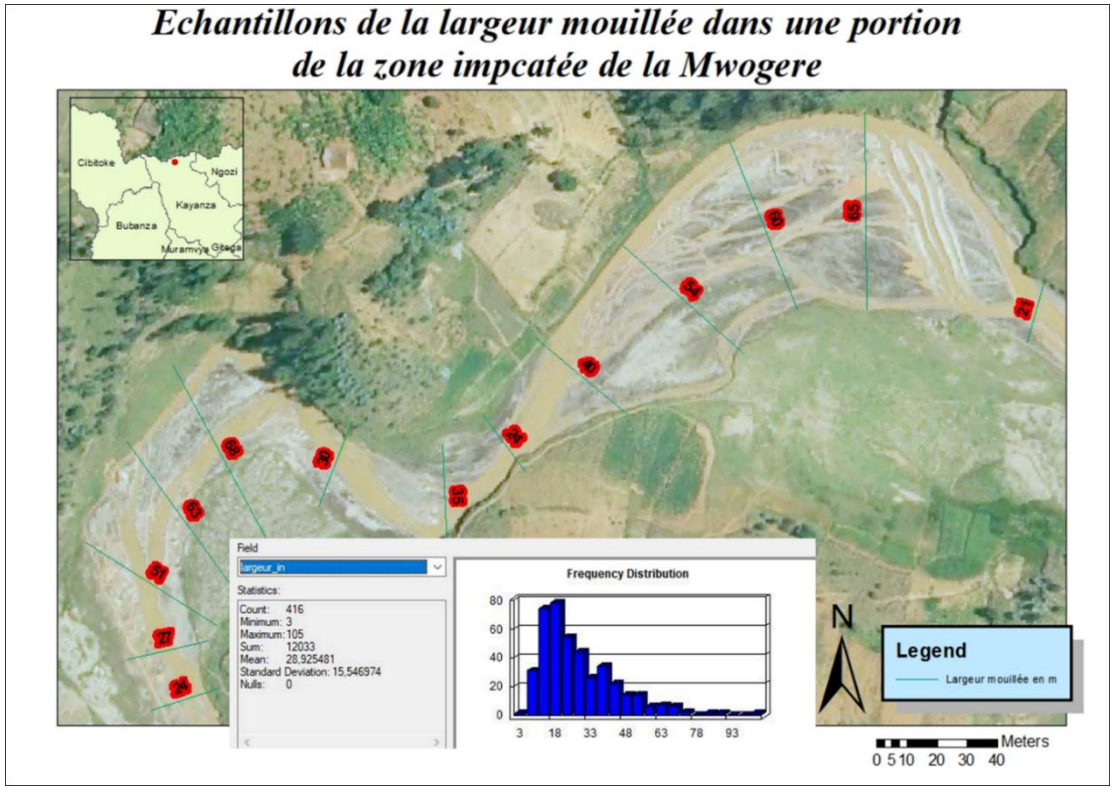


Figure 30. Carte d'échantillonnage et données statistiques de la largeur mouillée dans une zone impactée

Commentaires : les figures 34 et 35 indiquent deux portions de la Mwogere, la première étant non impacté par les drainages des rejets miniers et le deuxième non. Les figures portent aussi les données statistiques de variations de la largeur mouillée. Les résultats ont été obtenus à partir des images Landsat de Juillet 2018. Cette période a été choisie pour limiter toutes les influences des précipitations abondantes de saisons de pluie. Ainsi, la variation est liée seulement par les drainages miniers.

3.6.2. Interprétation

Un des paramètres de caractérisation hydromorphologique d'un cours d'eau est sa largeur. On peut estimer la largeur dit largeur à pleins bords (qui se mesure généralement au niveau des points d'inflexion entre deux sinuosités afin de limiter les « surlargeurs ») ou dit largeurs mouillées (observables dans les sinuosités actives caractérisées par un fort retrait de la berge concave lors des crues et un dépôt simultané sur la rive concave). Pour caractériser l'impact des rejets des débris des roches dans la Mwogere, c'est ce deuxième type de largeur dit mouillée que nous avons mesuré entre deux tronçons, l'un drainant les rejets miniers (Fig.32) et l'autre situé dans une zone non impactée (Fig.33).

Les largeurs mouillées entre les deux tronçons de la Mwogere ne sont pas les mêmes. La largeur maximale plus élevée dans la partie de la Mwogere impactée (105m) par les rejets miniers est presque la moitié dans la partie non-impactée (52m). L'écart-type dans la partie impactée est de 15,54m et 10,64m dans la partie non-impactée, représentant une différence de 31,53%. Cette variation est due au dépôt des débris des roches charriés dans la rivière en aval des carrières de Munege et Mwogere.

3.7. STABILISATION DES BERGES DE LA MWOGERE

3.7.1. Superficie de la zone tampon de 25m de largeur

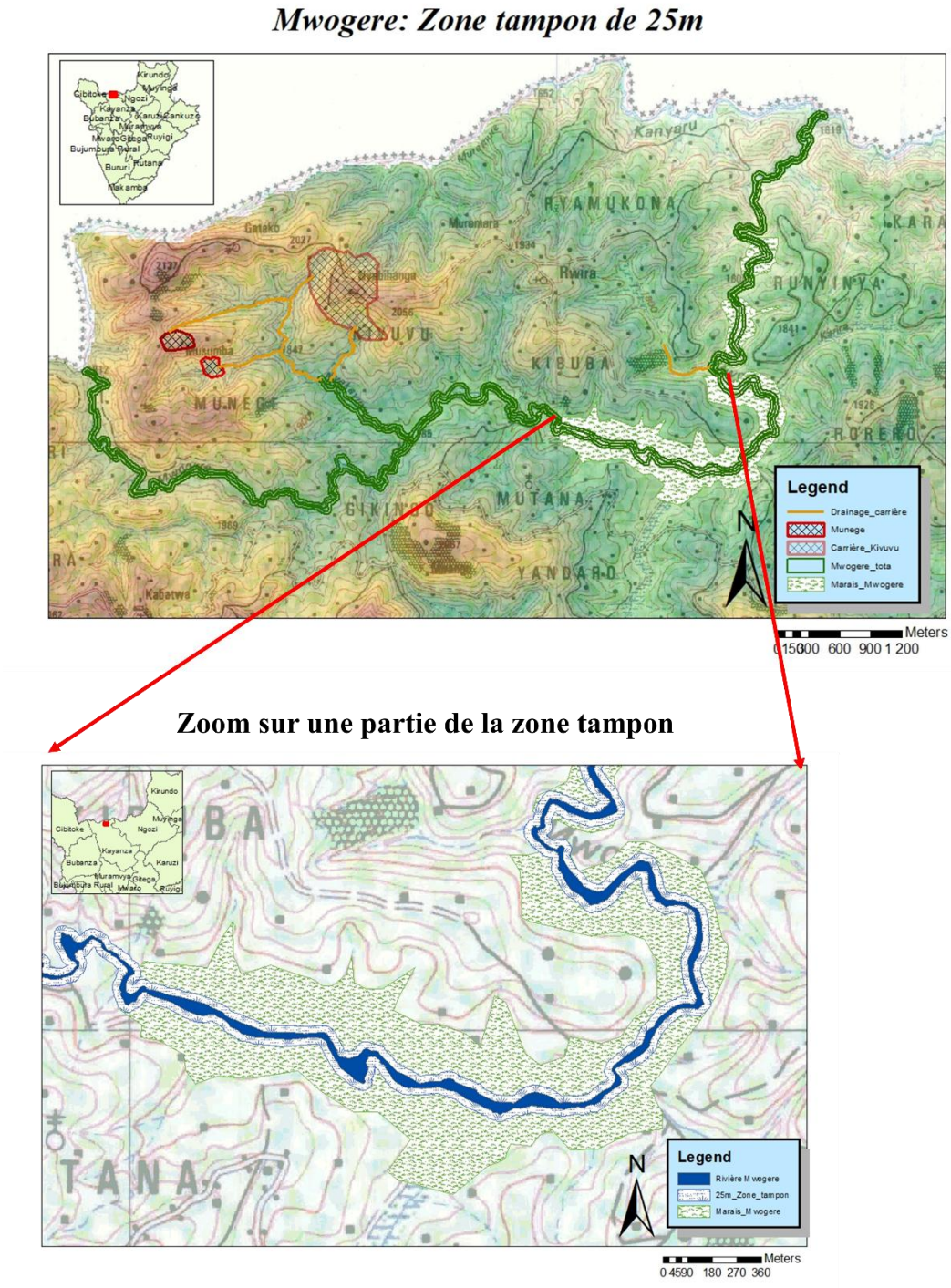


Figure 31. Carte de localisation de la zone tampon de la Mwogere avec une portion zoomée du marais et zone tampon et calcule de la superficie

Commentaires : la carte de la figure 34 localise la zone tampon autour de la Mwogere avec un zoom sur les marais agricoles de la Mwogere. Nous constatons que la végétalisation de

cette zone serait une solution de protection de ces marais des inondations mais aussi serait aussi une opportunité de plusieurs activités comme démontré ici-bas.

3.7.2. Superficie et valorisation de la zone tampon

Tableau 6. Superficie de la zone tampon de 25 m de largeur et possibilités de valorisation

A. Rentabilité pastorale de la zone tampon en bambou		
Surface zone tampon (ha)	Têtes de moutons nourris (2moutons/23 ares)[3]	Têtes de Chèvre nourris (3chèvres/23ares)
3657,06	31 800,52	47 700,78
B. Capacité de séquestration du CO_2 par la zone tampon en bambou		
Surface zone tampon ha	Séquestration du carbone à l'âge de 3 ans en t C (51 t C/ha)[4]	Valeur sur le Marché Carbonne en USD (40$USD/tC)[5]
3657,06	186 510,06	7 460 402,40

3.7.3. Interprétation

La législation burundaise de protection de l'environnement prévoit une zone tampon de 25m sur les berges de rivières. Pour le cas de la Mwogere cette distance n'est pas végétalisée conduisant l'érosion des berges. Une cartographie de cette zone (Fig.20) a permis d'obtenir la surface totale de 3657,06 ha (Tableau 6).

La végétalisation par le bambou est proposée comme solution à la protection mais aussi à la restauration des fonctions écologiques de cette zone. Ainsi, au-delà de ces fonctions, cette zone peut être aussi source de fourrage pour31800 moutons et 47700 chèvres (tableau 6) qui peuvent être élevés en stabulation dans la région en raison de 2 moutons et 3 chèvres

[3] La filière bambou n'étant pas encore très développée au Burundi, aucune étude n'est disponible sur l'utilisation du bambou comme fourrage. Ainsi, nous avons pris comme référence une étude réalisée en Éthiopie (K. Embaye, Weih, Ledin, & Christersson, 2005) car elle a utilisé des espèces adaptées au Burundi dont *Oxytenanthera abyssinica*et, *Sinarundinaria alpina*et nous estimons les conditions écologiques plus voisines à celles de Kabarore par rapport aux études de l'Asie (Inde, Chine, Indonesie…), une région par excellence du bambou.

[44] La capacité de séquestration du CO_2est fonction des plusieurs paramètres : l'espèce du bambou et son âge, les conditions écologiques, le système de gestion de l'espace…Par exemple, en Chine le taux de séquestration du carbone peut varier énormément juste à cause du mode de gestion de l'espace (Yiping, Yanxia, Buckingham, Henley, & Guomo, 2010) : les écosystèmes forestiers de bambous soumis à une gestion extensive, selon cette étude, ont un stock de carbone plus élevé (288,5 t C / ha) que les systèmes de gestion intensive (262-227 t C / ha). Cependant, les plantations gérées de manière intensive augmentent le stock de carbone dans la partie du canopée des bambous (51-74 t C / ha) par rapport aux plantations gérées de manière extensive (39-51 t C /ha). Pour notre cas, nous avons considéré un taux moyens après comparaison des plusieurs sources et facteurs (Gu et al., 2019; Jyoti Nath, Das, & Das, 2009; Lujala, Lein, & Rød, 2015; Nath & Das, 2012; Vogtländer et al., 2014; Zhou et al., 2011).

[5] Le prix du carbone est très fluctuant et instable sur des courtes durées. Aucun système de régulation des cours de carbone n'est encore opérationnel pouvant permettre d'avoir le prix fixe régulièrement. Pour le cas de ce travail nous avons considéré les prévisions de l'Union Européenne pour la période de 2020-2030 pour que l'accord de Paris soit respecté (Union Européenne, 2019).

nourris par le fourrage des bambou issues sur une aire de 23 ares de la zone tampon. Enfin, cette zone peut être valorisée comme zone de séquestration du CO_2. En effet, sur 3657.06ha avec un taux moyen de 51 t C/ha, cette zone pourra séquestrer 1865010,06 tonnes de carbone inorganique sous forme de CO_2. Et sur le marché carbone selon le Protocole de Kyoto, la zone tampon vaudrait 7460402,40 USD avec un prix moyen de 40$US par tonne de carbone séquestrée.

CHAPITRE IV. DISCUSSION DES RESULTATS ET MESURES D'ATTENUATION

4.1. INTRODUCTION

Ce chapitre porte sur des discussions des résultats présentés et interprétés précédemment. Dans le chapitre précèdent, nos résultats ont décelé trois impacts physiques liées à l'exploitation du coltan dans les mines de Kivuvu et Munege. Il s'agit de la dégradation du paysage dans les carrières, la destruction des marais de la Mwogere par le débris des roches issues des exploitations minières et la perturbation du régime hydromorphologique de la Mwogere. La destruction du paysage étant dû aux travaux miniers d'exploitation conduisant à la réduction des volumes des collines de Kivuvu et Munege, nous discutons ici des autres facteurs qui peuvent être la cause de réduction du volume. Au-delà des débris des roches venant des exploitations minières, le sol des marais de la Mwogere a été détruit aussi dans sa structure édaphique par d'autres causes. La dynamique de la Mwogere pourrait faire varier ses dimensions. Enfin, la pente, la nature des roches, la nature des berges, le débit…sont des facteurs aussi qui peuvent modifier l'hydromorphologie. Telles sont les éléments de discussion de nos résultats en rapport avec les impacts environnementaux physiques de Kabarore. En outre, nous avons présentés des résultats des impacts environnementaux physiques avec des possibilités des mesures d'atténuation. Les mesures d'atténuation sont :

- La construction d'un bassin de décantation,
- La végétalisation des berges de la Mwogere par le bambou,
- La valorisation des marais de la Mwogere après restauration en parcelles agricoles ou exploitation industrielle théicole. Nous discutons ainsi des capacités de valorisation de ces deux espaces : la zone tampon et les marais de la Mwogere.

Ces mesures d'atténuation avaient déjà été proposées par nos prédécesseurs (Denis Turimumahoro, 2014; Kataraza & Sinarinzi, 2013; Nahimana & Sendegeya, 2008; Nduwayezu Eric, 2013; Ntakarutimana & Sibomana, 2016; Ntenke & Turimumahoro, 2010). Mais ils ne se sont limités qu'à les citer sans une quantification

Ce chapitre est donc structuré selon les trois impacts environnementaux ci-hauts et après la discussion des résultats en rapport avec un impact environnementaux, nous discutons aussi des mesures d'atténuation.

4.2. DÉGRADATION DES PAYSAGES DE KIVUVU ET MUNEGE

4.2.1. La réduction des volumes des carrières

Recalcule variation des volumes a été fait sous base d'une zone découpée de Kivuvu et Munege. Les résultats de calcul de différence des volumes de carrières entre 1980 et 2018 ont été de 26% de réduction pour Kivuvu et 45% pour Munege d'augmentation relative (tab.5).

Nous constatons que les deux carrières ne présentent pas les mêmes résultats. La justification de cette situation est compréhensible en tenant compte la différence des méthodes d'exploitation minière dans les deux carrières.

- La mécanisation développée à Kivuvu, contrairement à Munege, permet de stocker les débris des roches dans la carrière même et on exploite seulement le filon (Midende, 2010; Nahimana & Sendegeya, 2008), l'élargissement de la carrière se fait par déplacement des débris des roches vers un autre milieu au point que le volume totale de la colline ne varie pas assez. Une partie toutefois ces débris des roches étant très fragmentés s'érodent et se transportent dans la rivière Mwogere.
- Un deuxième facteur pouvant justifier ce taux de variation de volume de Kivuvu le taux de foisonnement dû à l'abattage (MARTIN, 2012; Mouaad & Souhib, 2015) des roches schisteuses et gneissiques pour la découverture des filons de pegmatites. Ces roches généralement sont très dures bien que dans la zone parfois elles sont altérées. Leur abattage conduit donc à un foisonnement provoquant une augmentation de leur volume.
- L'augmentation de volume de Munege est justifiée aussi par d'autres facteurs. En effet, on note à Munege une exploitation rudimentaire où les débris des roches sont entassés sur la surface avec un taux de foisonnement considérables. L'exploitation n'y est pas mécanisée. La découverture des filons des pegmatites se font artisanalement avec des outils rudimentaires conduisant à l'ouverture de tête d'érosion.
- Outre le foisonnement, le deuxième facteur qui pourrait influencer la variation des volumes à Munege est mode d'exploitation (Midende, 2010). En effet, à Munege l'exploitation se fait généralement dans les dépôts alluvionnaires et le remuage des sédiments se fait par des outils rudimentaires. Certains drainages de Kivuvu sont drainés et déposés dans cette zone. Cette accumulation des débris des roches provenant des autres carrières font augmenter le volume de la zone découpée de Munege.
- Un dernier facteur serait l'acquisition non performante des MNT. Les technologies de pointe d'acquisition de MNT au Burundi a été développé que pour une résolution de 10m. cette MNT de 2012, toutefois présente un relief lissé sur les carrières. Le MNT ASTER de 2018 par contre reconnait les carrières avec un léger arrondissement. Ces insuffisances de précisions du MNT de 2018 pourrait aussi justifier une variation des résultats.

- Les surfaces 3D de Kivuvu et Munege entre 1980 et 2018 ont augmenté respectivement de 88858m^2 et68979 m^2. Pour Kivuvu cette augmentation est justifiée par la méthode d'excavation mécanisée. Les bulldozers et pelles hydrauliques déplacent des masses de terre du mort terrain pour dégager les filons minéralisés. Par contre, pour Munege la surface est aussi liée à l'accumulation des sédiments à la surface. Remarquons aussi la réduction de la surface 2D est élevé pour Munege (1700m^2) que Kivuvu (700m^2). Cela est justifié par la possibilité que les sédiments soient entassés par mécanisation avec une forte pente contrairement à Munege avec des techniques rudimentaires. Mais aussi la zone découpée de Munege est large que celle de Kivuvu.

4.2.2. Mesure d'atténuation

Les mesures d'atténuation proposées ici sont de deux types selon la possibilité de faisabilité. La première mesure d'atténuation consiste à une mesure de premier niveau d'ambition moins élevé c'est-à-dire de moindre coût. Il s'agit de l'installation d'un bassin de décantation des drainages miniers en aval des carrières avant la jonction avec la Mwogere. La deuxième proposition d'une mesure d'atténuation est le changement du mode d'exploitation. Cette deuxième proposition est de score d'ambition plus élevé mais plus rationnelle.

4.2.2.1. Installation d'un bassin de décantation en aval des carrières

L'exploitation du minerais de coltan à Kabarore est conçue selon le principe hydrogravimétrique (NTENKE & TURIMUMAHORO D., 2010; SENDEGEYA M., 2008). Le minerai pegmatitiques est lavé dans les ground sluices (Midende, 2010) et les grains de coltan étant plus denses que les grains des phyllades, ils se déposent au fond du ground sluice. Les rejets sont drainés et acheminés jusqu'à la Mwogere. Ainsi, dans l'impossibilité de changer le mode d'exploitation, il faut atténuer la contamination de la Mwogere (Nduwayezu E., 2013), en installant un bassin de décantation.

La position du bassin de décantation a été déterminé en analysant la topographie et la direction des drainages miniers sur une image LandSat d'Août 2018 (Fig.18). Cette position est un point de rencontre entre les drainages de Kivuvu et Munege. Toutefois, plusieurs facteurs peuvent changer la direction des drainages : l'allure et la direction des corps minéralisés, la découverte d'un autre site plus minéralisé, l'extension des carrières, un mouvement de masse, un ravinement… Ce positionnement à partir d'une image satellitaire pourrait être amélioré après une étude minutieuse de l'extension du gisement mais aussi de l'occupation du sol. Et une étude hydraulique et sédimentologique serait indispensable pour son dimensionnement.

4.2.2.2. Révision du mode d'exploitation

Beaucoup des chercheurs ont constatés que le mode d'exploitation du coltan de Kabarore n'est pas rationnelle et le taux de récupération étant trop bas (Kataraza & Sinarinzi, 2013; Midende, 2010; Nahimana & Sendegeya, 2008; Ntakarutimana & Sibomana, 2016; Ntenke & Turimumahoro, 2010), une grande partie du minerai est drainé dans la rivière Mwogere. Aussi, pour la carrière de Kivuvu certains endroits atteint déjà une hauteur de plus de 85m avec des débris des roches de couvertures entreposés sur l'extension du gisement. La découverture des autres filons pour l'extension de l'exploitation coûteraient très chers et cette situation limitera l'expansion du gisement. À cela s'ajoute les frais d'indemnisation de la population qui a occupé déjà les parcelles où les gisements s'étendent. Considérant ces défis et le problème de dégradation du paysage énoncé ci-haut, une révision du mode d'exploitation en mode souterraine serait une mesure d'atténuation de score d'ambition le plus élevé mais très efficace et rationnelle.

Le gisement de coltan de Kabarore est filonien (D. Turimumahoro, 2014; Lehmanna, Brinkmannb, Diogob & Buerkertb, 2017; Nkurunziza& Niyonzima, 2014). Le mode d'exploitation souterraine doit être adapté à cette structure. Il existe plusieurs types de méthodes d'exploitation souterraine dont les principales sont (Paraszczak, 2012): méthode par chambre-magasin, méthode par tranches montantes remblayées et méthode par sous niveau long trou.

La méthode la mieux adaptée pour le gisement de Kabarore est la méthode de chambre magasin. En effet, cette méthode est habituellement adaptée pour exploiter les gisements filoniens fort inclinés (60° et plus) comme c'est le cas à Kabarore. A Kabarore, le minerai serait excavé par les tranches horizontales, à partir de la partie inférieure du chantier en avançant vers le haut. La partie importante du minerai est laissée dans le chantier où il supporte les parois et sert comme plancher de travail pour les mineurs. Pour le cas de Kabarore ce soutènement du plancher par le corps minéralisé serait renforcé par des soutènements (MARTIN, 2012) en bois ou métalliques. Dans une première phase, on ne soutire que la partie du minerai correspondant au foisonnement. Dans la deuxième phase, la chambre est entièrement vidée. Le chantier est accessible seulement par les monteries (« manways ») situées à ces extrémités. Etant donné que la section de ces monteries d'accès est très limitée et le plancher de travail à l'intérieur du chantier est très rugueux (constitué du roc fragmenté), l'usage d'équipements hautement mécanisés s'avère pratiquement impossible c'est le cas de Kabarore ou le niveau d'altération est avancé en certains endroits. La pratique

standard est d'utiliser les marteaux à air comprimé opérés manuellement tel que foreuses sur béquille (« jackleg drills ») et foreuses de toit (« stopers »). Pour abattre du roc, on se sert soit des trous horizontaux (« enlevure » ou « breast »), soit des verticaux, ayant d'habitude le diamètre de 32 mm et la longueur de 2,4 m.

Les deux autres méthodes ne sont pas praticables dans le cas de pegmatites minéralisées. En effet, la méthode de sous-niveau long trou est très exigeant. Elle est applicable dans les conditions suivantes (Paraszczak, 2012)que les roches de Kabarore ne remplisse pas:

- Pendage très élevé (supérieur par rapport à l'angle de repos du minerai) ;
- Toit et murs forts ;
- Minerai compétant ;
- Limites du gisement assez régulières.

De son côté aussi la méthode par tranches montantes remblayées n'est pas réalisable dans les conditions de Kabarore. Elle est adaptable aux gisements dont les contours sont irréguliers et/ou discontinus ce qui permet de récupérer les parties riches en minerai et laisser en place des zones à faible teneur (sélectivité d'exploitation). Ces conditions ne sont pas réuni par le gisement de Kabarore avec des filons irréguliers (Ntakarutimana & Sibomana, 2016).

4.3. DÉGRADATION DES TERRES DU MARAIS DE LA MWOGERE

4.3.1. Répartition du marais restauré de la Mwogere en champs agricoles

Les marais de la Mwogere sont dégradés par l'envahissement des rejets miniers provenant des carrières de Kivuvu et Munege (Nduwayezu E., 2013). Par ailleurs , on note que la couverture alimentaire est très bas, parfois inférieure à 50% (République du Burundi, 2018b). La réhabilitation des marais de Mwogere permettrait d'élargir la surface agricole de la commune de Kabarore. La cartographie de marais de la Mwogere a donné une surface de 38,13ha. Deux scénarios de valorisation de cette superficie en activités agricoles ont été proposées : un aménagement en parcelle agricole vivrière ou un aménagement d'une exploitation agricole industrielle du thé.

L'aménagement en parcelle de champs selon une superficie moyenne de 3,42ares (Fig.20) pour chaque parcelle de champs a donné 371 parcelles de champs. Considérant que chaque personne peut occuper 3 parcelles, l'espace de 38,13ha sera occupée par 371 personnes qui partageront 1114 parcelles. Par contre, les champs peuvent être aussi de 2 ares selon la moyenne général dans la sous-région d'après les littératures (Nduwayezu E., 2013;

NIJIMBIRE, 2016; Nusura et Ngendakumana, 2014)., ainsi la superficie de 38,13ha de marais pourrait être aménagé en 1906 champs partagés entre 635 personnes.

L'augmentation de la surface agricole est un atout pour le développement de la population burundaise qui dépend à 90% de l'agriculture (ANGORAN, 2004; République du Burundi, 2018b). Spécifiquement, pour la province de Kayanza étant la plus peuplée (ISTEEBU, 2017; Observatoire de l'Action Gouvernementale, 2014), l'augmentation de la superficie agricole permettra d'augmenter la résilience (Raymond Auerbach, 2013; République du Burundi, 2018c) de sa population face à l'augmentation de la population mais aussi combler le déficit en couverture alimentaire (République du Burundi, 2018b).

Par ailleurs, notons que ces résultats sur la répartition des champs et des occupants peuvent être réduites à la baisse pour plusieurs raisons :

- l'aménagement des marais avec des ouvrages hydrauliques consomment une partie de la superficie (FAO, 2000),
- bien que les marais de la Mwogere soit dégradé, certaines parcelles sont exploités temporairement (Nduwayezu Eric, 2013) et font l'objet déjà des propriétés privées.
- Le Code Foncier du Burundi à son article 190 alinéa 1stipule que « lorsqu'un cours d'eau dépendant du domaine public de l'État se forme un nouveau lit en abandonnant l'ancien, le nouveau lit, accroit au domaine public de l'État » (République du Burundi, 2011a). En outre l'alinéa 2 du même article précise que « L'État procède à une répartition des terrains constitutifs de cet ancien lit entre les propriétaires des terres constitutives du nouveau lit pour compenser la perte de celle-ci. Cette répartition est organisée en proportion des terres perdues par chacun des précédents propriétaires fonciers ». Eu égard à ces dispositions, nous constatons que la répartition de l'espace restauré des marais de Mwogere pourrait avoir un effectif des parcelles différent de ceux que nous avions obtenu en utilisant des surfaces moyennes. Par conséquent, le nombre des propriétaires aussi dépendra de l'application de cette disposition.
- Dans la sous-région on note déjà des conflits fonciers (Bucumi, 2004; NIJIMBIRE, 2016; Observatoire de l'Action Gouvernementale, 2014), une répartition des terres dans une perspective de gestion pacifique des conflits (Mututa & Mbarambara, 2016) est vivement souhaitée. Et cette option pourrait changer la répartition des parcelles et de l'effectif des occupants.

4.3.2. Mesure d'atténuation

La mesure d'atténuation proposée pour la dégradation des terres des marais de la Mwogere est de restaurer (Roose et al.1993) ces terres et les valoriser en exploitation agricole.

Cette valorisation peut se faire soit dans une répartition en parcelles agricoles vivrières ou en une exploitation industrielle théicole.

4.3.2.1. Exploitation en parcelles agricoles vivrières

La surface de 38,13ha restaurée et aménagée en parcelles agricoles vivrières est une mesure d'atténuation au déficit alimentaire remarqué dans la région (ANGORAN, 2004; République du Burundi, 2018b). Selon la troisième note technique de l'ISABU (Desiere, Niragira, & Marijke, 2013) dans les zones fortement peuplées comme Kabarore (ISTEEBU, 2017), la superficie cultivée par ménage diminue fortement avec la pression démographique. Pour éviter une diminution de leur revenu (Fig.36), les ménages intensifient la production agricole en appliquant plus d'engrais en en cultivant les champs plus intensivement. En plus, l'importance du secteur non-agricole, ici l'exploitation du coltan, augmente avec la pression démographique. La disponibilité des nouvelles terres, particulièrement des marais permettant des récoltes toute l'année (Delville *et al.*, 1996), contribuerait à relever ce défi.

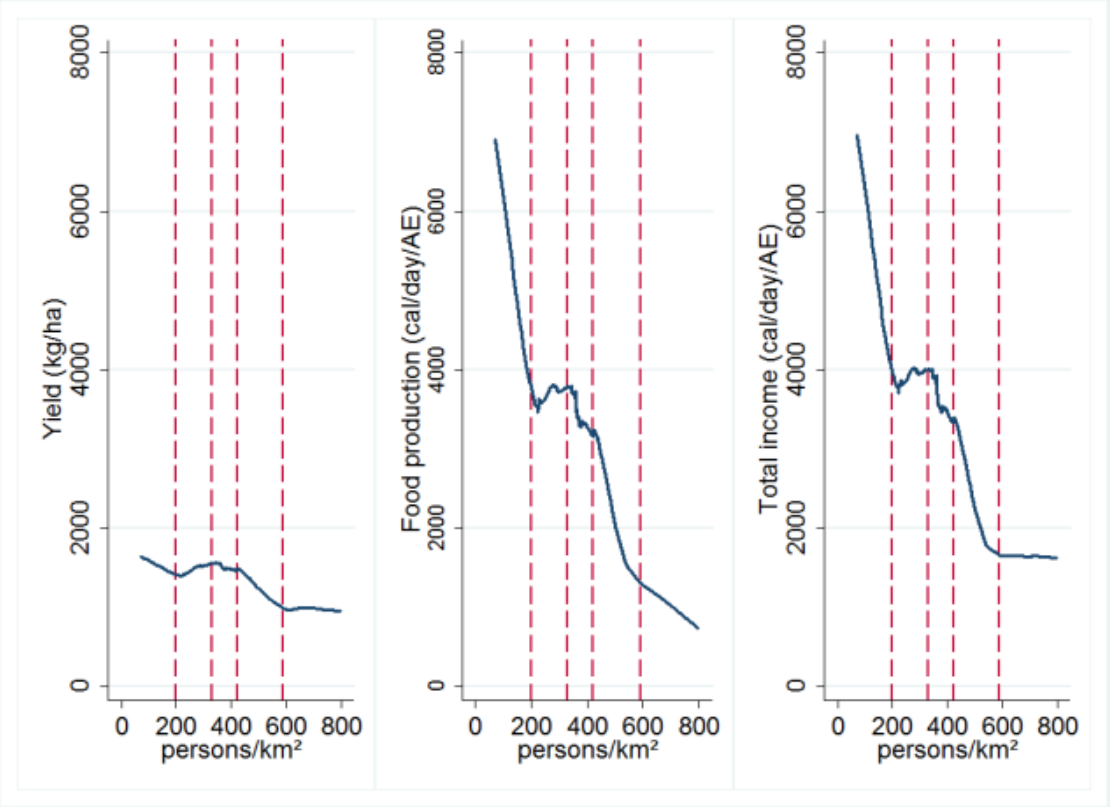


Figure 32. La pression démographique a un effet négative sur les rendements et les revenus (Desiere et al., 2013)

4.3.2.1. Exploitation industrielle théicole

Selon nos résultats (tab.4), sur une superficie de 38,13ha, une production de 179401,65 Kg de feuilles vertes est possible et pouvant reporter 13399868,04Fbu à l'état Burundais. Ces données peuvent variées selon le rendement et le prix de vente au port de Mombasa. En effet, le rendement à l'hectare a fluctué au cours des douze dernières années (avant 2016) et a légèrement augmenté ces derniers années, passant de 4 306 kg / ha en 2004 à 4 705 kg / ha en 2016 (Schuster & Ndimunbandi, 2018) (Fig.36).

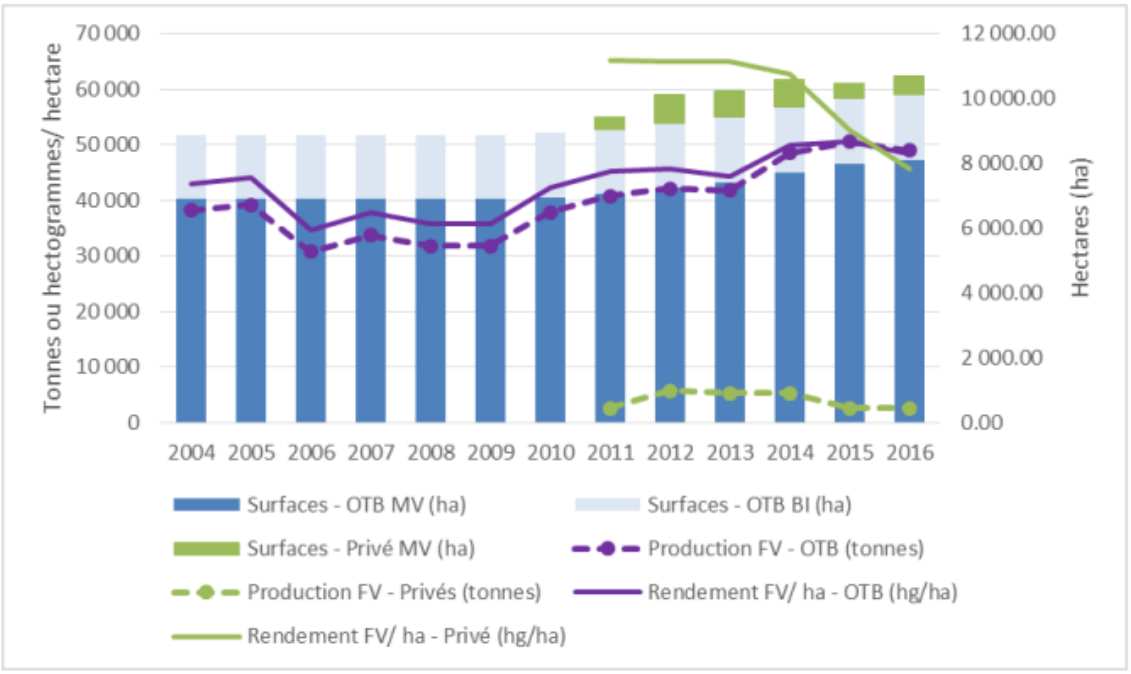


Figure 33. Évolution de la production (axe de gauche), rendement par hectare (axe de gauche) et surface cultivée (axe de droite) (Schuster et Ndimunbandi, 2018)

Ainsi, malgré le soutien des services de vulgarisation à la production sur les parcelles de petits exploitants (environ 1 vulgarisateur pour 300 producteurs, soit 35 ha), Schuster et Ndimundandi (2018) constatent que le rendement en FV sur les parcelles en MV reste faible. Et la moyenne annuelle de 4 000 kg de FV par hectare sur les champs de petits producteurs est bien inférieure aux rendements à l'hectare obtenus dans les pays voisins qui produisent une grande partie du thé à partir de variétés hybrides. Ce niveau de rendement est également inférieur à celui observé sur les blocs industriels (un peu plus de 5 500 Kg de FV par hectare en 2016). La faible productivité s'explique notamment par le manque d'accessibilité et la mauvaise application d'engrais.

Un autre facteur à tenir à compte est le prix du thé sec à Mombasa. Le prix du thé burundais aux enchères de Mombasa est en moyenne de 0,13 USD/Kg inférieur au prix moyen reçu par les deux pays voisins, le Kenya et le Rwanda, entre 2010 et 2016, et 0,50 USD/Kg en dessous de la meilleure qualité 'Pekoe (ANGORAN, 2004; Coalution Contre la Faim, 2013; Schuster & Ndimunbandi, 2018).

4.4. DISFONCTIONNEMENT HYDROMORPHOLOGIQUE DE LA MWOGERE

4.4.1. La charge solide et disfonctionnement hydromorphologique de la Mwogere

La rivière Mwogere en drainant les débris des roches issues des exploitations minières se trouve très chargée en solides, parfois des gros blocs, et présente une forte turbidité élevée (Kataraza & Sinarinzi, 2013). Cette charge solide parfois dépasse la capacité de transport de la rivière (Malavoi & Bravard, 2006) et des dépôts se font dans le lit de la rivière conduisant à l'élargissement de la surface mouillée de la rivière dans la zone impactée par les exploitations minière par rapport à la zone non impactée (Figs.34 et 35).

Bien que les charges solides issues des drainages miniers soient la cause principale de disfonctionnement hydromorphologique, les dépôts dans la Mwogere seraient aussi provenus de l'érosion des berges et des collines surplombant la région (Nahimana & Sendegeya, 2008; Nduwayezu Eric, 2013). Naturellement, cette largeur mouillée peut aussi varier selon le champ traversé par la rivière. Dans les terres initialement plates contrairement dans le creux des talwegs, la surface mouillée serait grande. La végétalisation serait une solution efficace de la stabilisation des berges de la Mwogere.

4.4.2. Mesure d'atténuation

4.4.2.1. La végétalisation de la Mwogere par le bambou

Plusieurs espèces peuvent servir pour stabiliser les berges de la Mwogere (Evette & Cavaillé, 2016; Malavoi & Adam, 2007). Le choix du bambou est surtout justifié grâce à ses fonctions écologiques (Ben-zhi, Mao-yi, Jin-zhong, Xiao-sheng, & Zheng-cai, 2005). Les espèces de bambou proposées ici sont *Arundinaria Alipina* et *Sinarundinaria alpina.* Le choix de ces espèces est justifié par leur adaptation dans le climat de la région (Bahru, Mulatu, & Kidane, 2015; Feleke, 2013).

La cartographie de la surface de la zone tampon (Fig.36) a donné une superficie de 3657,06ha (Tab.5). Cette surface peut varier en fonction des espaces que traversent la Mwogere. Les zones situées dans le creux de deux collines, la surface serait grande car avec toujours une largeur de 25m, la surface sur les flancs d'une colline serait plus grande que la

surface dans une zone plane. Précisons que la superficie considéré dans nos résultats (Tab.5) est une superficie projetée. En considérant cet aspect, la surface de la zone tampon serait supérieure par rapport à nos résultats. Par ailleurs, un autre aspect pourrait réduire cette surface. Il s'agit de l'aménagement des ouvrages d'art sur la rivière, notamment les ponts et canaux d'irrigations. Ainsi, en tenant en compte ces deux facteurs disproportionnels, la valeur de la superficie projetée considérée dans notre étude serait plus conciliante.

4.4.2.2. Possibilités de valorisation de la zone tampon

Le bambou a plusieurs fonctions écologiques (Ben-zhi et al., 2005). Au-delà de la fonction de stabilisation des berges grâce son systèmes racinaires, la zone tampon végétalisée peut être valorisée comme source de fourrage mais aussi comme puit du carbone inorganique (Tableau 7).

Les résultats obtenus ici peuvent varier selon les habitudes alimentaires du cheptel qui doivent s'adapter à une alimentation en stabulation par le bambou. Mais aussi, le bambou étant multifonction (utilisé aussi en artisanat), la biomasse potentielle à produire pourrait n'est pas être atteint suite à une pression démographique. Ce problème a été observé au Bénin, où le bambou était exploité avant sa maturation (Honfo *et al*., 2015).

4.4.2.2.1. Zone tampon en bambou, source de fourrage

Selon la troisième note technique de l'ISABU (Desiere *et al.*, 2013), la pression démographique est associée avec une réduction du bétail présent dans le ménage (Fig.36). La diversification des sources de fourrage permettrait de relever ce défi. En effet, les ménages dans les régions densément peuplées préfèrent les petits animaux (surtout les chèvres) tandis que les ménages dans les autres régions possèdent également des vaches. Cette réduction du bétail avec la pression démographique a aussi des conséquences au niveau de la disponibilité des engrais organiques dans les régions densément peuplées. Vu que ces engrais sont importants pour maintenir la fertilité du sol (République du Burundi - Ministère de l'agriculture et de l'élevage, 2017; Sist, Mazzei, & Sablayrolles, 2013), cette réduction du bétail pourrait avoir des conséquences négatives sur la production agricole. Mais aussi la disponibilité des engrais verts issus de l'élevage permettrait la promotion de l'agriculture biologique au Burundi (Bellon & Lamine, 2009; Lamine, Meynard, Perrot, & Bellon, 2009; Sist et al., 2013).

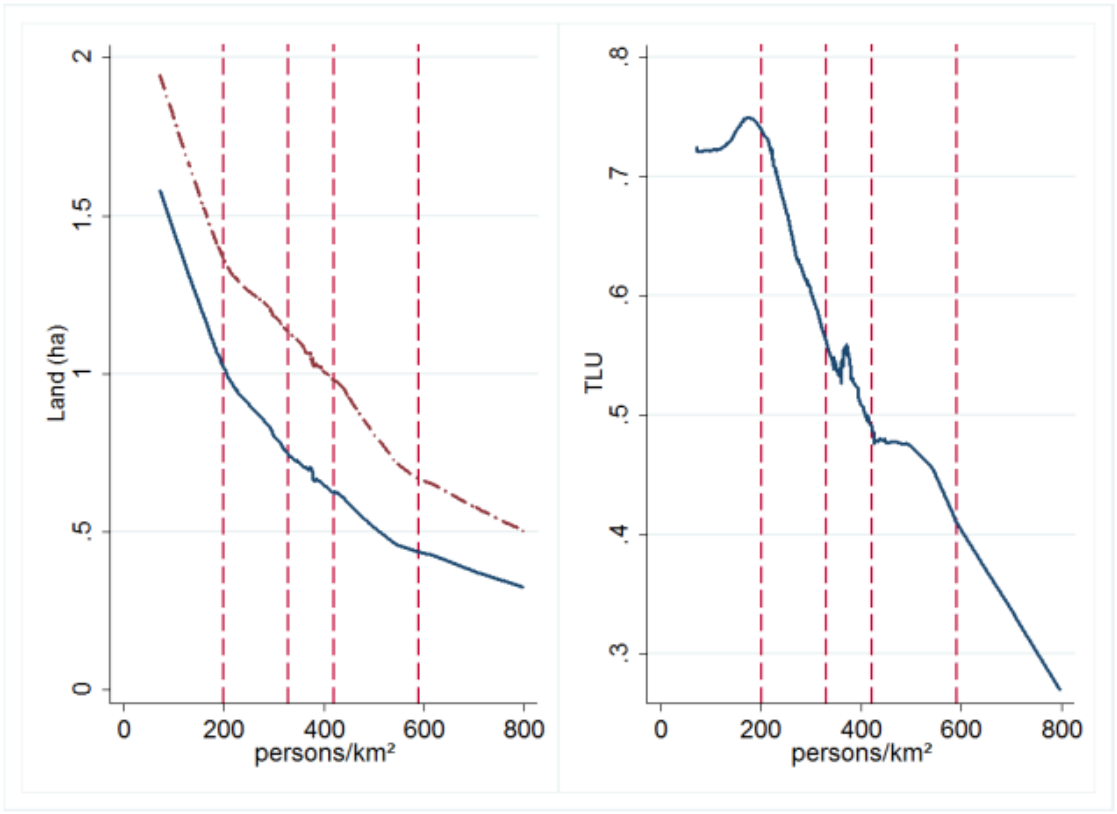


Figure 34. La pression démographique réduit la superficie cultivée par ménage et la possession du bétail (Desiere et al., 2013)

4.4.2.2.2. Zone tampon en bambou, puits de carbone inorganique

Les écosystèmes forestiers du Burundi, véritables puits du carbone inorganique sont sous pressions démographique. Mais aussi le déficit énergétique au Burundi n'arrange pas la situation. La végétalisation des rivières par le bambou est une des solutions à ce problème. Des initiatives pareilles ont été déjà entrepris ailleurs au Burundi (Ndabirorere, 2012). Le bambou ayant un taux de séquestration du CO_2 élevé par rapport à la plupart des arbres (Gebre, Birhane, Gebresamuel, Hadgu, & Norgrove, 2019; Nath & Das, 2012; Vogtländer, Van Der Velden, & Van Der Lugt, 2014; Zhou, Meng, Jiang, & Xu, 2011), il serait un matériel végétal idéal à valoriser dans le cadre du Protocol de Kyoto.

Nos résultats de cartographie (fig.36) révèlent 3657,06ha de zone tampon qu'on peut végétaliser en bambou (Tab.06). Sur cette superficie, à l'âge adulte 186 510,06 tonnes de carbone organique peuvent être séquestré à l'âge adulte du bambou, et sur le marché carbone ce crédit carbone peut être échangé pour une valeur de 7 460 402,40$US. Ces données proviennent des estimations utilisant des moyennes. Ainsi, la masse de carbone à stocker peut varier selon le taux de séquestration du bambou.

Dans les écosystèmes de forêts de bambous, grâce au mécanisme de la photosynthèse, les bambous transforment le dioxyde de carbone en carbone organique et le stockent dans sa structure fibreuse, dont une partie se stocke dans les litières ou dans les sols forestiers (Midmore, 2006; Wu, Liu, Zhu, & Shen, 2015; Zhou et al., 2011). Pour notre cas nous avons juste considéré une moyenne qui ne tient pas compte de la litière et du stockage du sol.

En outre, plusieurs auteurs notent que les bambous sont les plantes à la croissance la plus rapide, atteignant leur hauteur maximale en deux à quatre ans, et la ramification commence dès que les tiges sont atteintes (Midmore, 2006; Wahab, Mohamed, Mustafa, & Hassan, 2009). Leurs hauteurs complètes. On estime qu'un bloc de bambou peut produire au cours de sa vie jusqu'à 15 km de poteaux de 30 cm de diamètre. Le bambou a donc une croissance très vigoureuse et dynamique. En raison de son accumulation rapide de biomasse et de sa fixation efficace de l'énergie solaire et du dioxyde de carbone, le bambou aura une capacité de séquestration du carbone inégalée, voire inexistante. Certains auteurs (Gu, Zhou, Mei, Zhou, & Xu, 2019; Wu et al., 2015) démontrent que les écosystèmes forestiers de bambous soumis à une gestion extensive, ont un stock de carbone plus élevé (288,5 t C / ha) que les systèmes de gestion intensive (262-227 t C / ha). Cependant, les plantations gérées de manière intensive augmentent le stock de carbone dans la partie du canopée des bambous (51-74 t C / ha) par rapport aux plantations gérées de manière extensive (39-51 t C /ha).

Pour discuter la valeur d'échange du crédit carbone, notons qu'en 2017, la Commission de haut niveau sur les prix du carbone, présidée par les économistes Stern et Stiglitz, estimait que le prix du carbone devrait se trouver entre 40 et 80 dollars la tonne en 2020, puis augmenter progressivement de 50 à 100 dollars en 2030, afin d'assurer l'objectif 2°C fixé par l'Accord de Paris (Union Européenne, 2019). Or, au niveau mondial, 75 % des prix carbone ne dépassent toujours pas 10 dollars la tonne de CO_2. Telles sont les facteurs qui peuvent faire varier nos résultats selon la fluctuation permanente du prix d'une tonne de carbone séquestré.

4.5. OPPORTUNITÉS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE AUTOUR DES MINES

4.5.1. Agriculture dans les marais : moteur de développement et promotrice du genre

La restauration des marais en aval des sites miniers va aider à l'autonomisation de la femme vu que les activités minières artisanales ne sont pas autorisées pour les femmes et les mineurs. En effet, au niveau de l'agriculture, activité économique principale au Burundi, le rôle de la femme est tout aussi remarquable comme il l'est pour les activités ménagères. La femme s'occupe des cultures vivrières qui couvrent la plus grande proportion de la propriété

foncière(53 % à Kabarore et 78 % à Rutegama) (Nusura et Ngendakumana, 2014; Pedro, 2011). Contrairement aux cultures industrielles, les cultures vivrières sont caractérisées par une très grande diversité. Dans une même exploitation, nous pouvons rencontrer, des parcelles en polyculture portant plusieurs variétés de banane (banane fruit, banane légume, banane à bière), plusieurs espèces de racines et tubercule (manioc, patate douce, colocase), plusieurs espèces de céréales (maïs, riz, blé, sorgho), plusieurs espèces de légumineuses (haricot, arachide, petit pois, …), plusieurs sortes de légumes (aubergine, choux, amarantes).

Il faut signaler qu'au niveau d'une même espèce, le mélange variétal est très courant. Cette polyculture constitue une stratégie de minimisation du risque lié aux aléas climatiques et aux agents ravageurs ou phytopathogènes (Ahouangan et al., 2014). Remarquons que cela permet aussi la conservation de plusieurs caractéristiques génétiques telles que la résistance face à la sécheresse, l'adaptation à différents types de sols, etc.

4.5.2. Bambou, solution écologique et filière du développement durable

La commune de Kabarore est l'un des espaces agro-pastorales du Burundi (Nduwayezu Eric, 2013; Observatoire de l'Action Gouvernementale, 2014). Son sous-sol contient aussi des substances minérales en exploitation artisanale principalement à Kivuvu et Munege. Ces deux activités principales, l'exploitation minière et l'agro-pastorale, ont réduit considérablement le couvert végétal et les activités minières rejettent des milliers de tonnes des fragments de roches dans la Mwogere comme décrit ci-haut. Il se remarque donc une forte dégradation environnementale en aval de ces sites miniers dans les marais. Dans une perspective de développement durable, le bambou est une solution efficace d'atténuation.

- **Environnement** : le bambou peut stabiliser le sol profond des berges de la Mwogere grâce son système racinaire et favoriser l'infiltration (Gebre et al., 2019; Zhou et al., 2011). Il est aussi très efficace dans la séquestration du carbone que les feuillus utilisés dans le reboisement actuel à Kayanza.
- **Économie** : à cause de ses nombreuses propriétés physico-mécaniques (W., C., BAI, & PERLATA, 1996; Wahab et al., 2009), le bambou est largement utilisé ailleurs dans le monde et serait donc une source des revenus pour la frange de la population qui n'œuvre pas dans le secteur minier et agro-pastorale.
- **Social** : le chômage et l'exclusion social sont les unes de cause de motivation de l'exode rurale et la délinquance dans la province de Kayanza (Observatoire de l'Action Gouvernementale, 2014). L'éclosion d'un artisanat prometteur issue de la filière bambou est une opportunité de réduire le chômage, stabiliser l'exode rural et renforcer la cohésion sociale

entre les couches de la population de Kabarore en particulier mais aussi de Kayanza en général. Cela a réussi ailleurs en Éthiopie (Kassahun Embaye, Christersson, Ledin, & Weih, 2003; Kelbessa, Bekele, Gebrehiwot, & Hadera, 2000; Mekuriaw, Urge, & Animut, 2011), au Madagascar (Ramananantoandro, Rabemananjara, Randrianarimanana, & Pommier, 2013), au Benin (Honfo et al., 2015; Houdanon, Mensah, Gnanglè, Yorou, & Houinato, 2018) et en Asie (Scurlock, Dayton, & Hames, 2000; Wu et al., 2015)

Au-delà de réduire le chômage et la cohésion sociale, la filière bambou sera une opportunité de la valorisation du genre dans la commune de Kabarore. En effet, la filière bambou est mieux adapté pour développer des métiers (Chibembe, Nishuli, Kamwanga, & Mangambu, 2015; NEGRE, 2000; Von Schaewen & Franco, 2012) des femmes et ainsi les rendre autonomes. Mais aussi une grande partie de la jeunesse sans emploie sera prise en charge par des activités génératrices de revenus issues de la filière bambou comme ça été le cas en Éthiopie (Kassahun Embaye et al., 2003; Kelbessa et al., 2000), au Benin (Honfo et al., 2015), au Madagascar (Ramananantoandro et al., 2013) et ailleurs (Houdanon et al., 2018; Nath & Das, 2012; Scurlock et al., 2000; Zhou et al., 2011). Et de façon spécifique, la filière bambou pouvant être très diversifiés, une catégorie des métiers issues de cette filière adaptés aux handicapés physiques peut être valoriser pour occuper et autonomiser cette frange des marginalisés de la population burundaise.

En outre le bambou fournit aussi le fourrage ainsi un élevage en stabulation sera développé dans la commune Kabarore. Et la femme qui s'occupe généralement du petit élevage (Nusura & Ngendakumana, 2014; Pedro, 2011) et qui représente le gros des effectifs du cheptel vif et qui concerne beaucoup d'espèces animales (porcs, caprins, ovins, lapins, volaille et cobayes) se serait autonomisée. Les chèvres constituent l'espèce la plus représentée, avec en moyenne près de 2 à 3 têtes par ménage (alors que le nombre de bovins est de 1 tête pour un ménage sur trois à cinq) (République du Burundi, 2018b). Le choix de ces animaux de petit gabarit qui exigent de faibles quantités d'aliments, est avant tout une adaptation à la raréfaction des terres et des pâturages. Il faut aussi rappeler que ces petits animaux, comme les chèvres, les lapins et les cobayes sont aussi très prolifiques, et donc très productifs. Mais en plus, comme c'est le cas pour la polyculture, ce poly-élevage est un moyen particulier de lutter contre l'érosion génétique, il permet notamment de garder les gènes de rusticité des espèces animales traditionnelles (Nusura et Ngendakumana, 2014).

Il faut encore ajouter que l'élevage sera aussi une source des engrais verts. Le défis de la fertilisation des sols par l'excès des engrais minéraux sera résorber. L'utilisation du

fumier organique issu de l'élevage boostera la production agricole et contribuera à la protection des sols.

4.5.3. Briqueterie sous la technologie HydraForm[6] : Solution de rentabilisation de l'exploitation des ressources naturelles non renouvelables et potentiel d'essor économique à Kabarore

Les substances minérales exploités à Kabarore sont contenues dans la pegmatite généralement très altérée. Ainsi, les rejets de concentrations constituent des couches de kaolin blanches de bonne qualité comme argile. Une opportunité de briqueterie en utilisant la technologie HydraForm serait une opportunité pour l'essor économique de Kabarore. En effet, cette technologie est écologique et offre les avantages suivants :

- Matériau local - Les machines de fabrication de brique HydraForm compressent hydrauliquement le silt (argile plus sable) mélangé avec du ciment, en blocs solides.
- Production rentable – Les briques autobloquantes HydraForm sont fabriqués avec seulement 10% de ciment pour atteindre une capacité de résistance à la pénétration de 7 Méga Pascales après 14 jours de durcissement.
- Construction à moindre cout - Pas de cuisson de blocs – durcissement garantie après 14 jours au cours de déblaiement du site et la pose des fondations.
- Rapidité - Une fois durci, les blocs de terre et ciment peuvent être empilés à sec dans une superstructure, représentant une épargne de 30% en coût et en temps.
- Les coûts de main-d'œuvre réduits – les briques autobloquantes peuvent être posées 3 fois plus vite que des briques à ciment, donc moins de temps de travail par maison et une construction plus rapide.
- Livraison locale – les machines HydraForm sont mobiles favorisant la production des briques sur le chantier et réduisant le cout du transport.
- Ces briques de terre (sable) sont thermiquement efficaces, réduisant l'exigence énergétique. Elles permettent une température ambiante fraiche par temps chaud et chaude par temps froid.

[6] http://www.hydraformfrancais.com

CHAP V. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

5.1. CONCLUSION GENERALE

Au Burundi dans le reste des pays en voie de développement, la population est la plus dépendante des ressources naturelles en générale particulièrement les mines. Le plus souvent c'est l'exportation des matières premières issues du secteur extractive qui apportent les devises au pays et stabilise le PIB. Cette dépendance à l'exploitation des ressources naturelles, provoquent les plus graves problèmes environnementaux. Pour un développement durable, il faut des études d'évaluation environnementale utilisant des outils plus précis et innovants dont les SIG. Dans ce travail, nous avons montré comment les SIG peuvent contribuer à la prévision des impacts environnementaux physiques dans les mines d'exploitations artisanales de coltan à Kabarore au Nord du Burundi. L'objectif de ce travail a été donc d'évaluer dans une perspective prévisionnelle les impacts des exploitations minières et en proposer des mesures d'atténuation et les activités de développement durable qui peuvent se développer autour des mines. Les impacts principaux documentés dans la littérature étant la dégradation physique du paysage et l'envasement de la rivière Mwogere et ses marais, les MNT de différentes périodes ont été utilisés pour quantifiés ces impacts.

Les statistiques minières de 2001 à 2018 de production du concentré de coltan ont révélé une production faible avec une légère remontée entre 2016-2017. L'augmentation exponentielle s'est observée plutôt en 2018, avec une augmentation de plus de 10 fois la production des années précédente. Les impacts environnementaux physiques sont globalement la destruction du paysage au niveau des carrières et l'envasement des marais de la Mwogere par les rejets miniers. Un calcul des différences de volume à l'aide des MNT des différentes périodes (1980 et 2018) ont permis de déceler une réduction de volume pour la carrière de Kivuvu et une augmentation relative de volume pour Munege. Et les zones les plus dégradés sont les prolongements des drainages miniers. Les débris des roches drainées dans la rivière Mwogere tapissent les marais de la Mwogere et perturbe son régime hydromorphologique dans sa portion impactée par les mines que la portion non impactée. Ainsi, la végétalisation de ses berges (25m de largeur selon la loi) par le bambou serait une solution à cet impact physique. Mais aussi, cet espace végétalisé de 3657,06 ha serait aussi une source des matériaux pour un artisanat de la filière bambou, de fourrage pour un élevage en stabulation mais aussi de séquestration du carbone.

La restauration de ces marais et leur valorisation en espace agricole (vivrières ou théicole) boosterait l'économie de la région et sera une source d'emploi considérable. Les

mesures d'atténuation présentées ici présentent des possibilités de diversification des plusieurs activités génératrices de revenus au-delà de leurs fonctions de protection de l'environnement. Alors, il faut, comme mesures d'atténuation, la construction d'un bassin de sédimentation et la végétalisation des berges de la Mwogere.

Ainsi il a été démontré dans ce travail que les mines qui ont souvent été réputés des activités qui conduisent à la dégradation de l'environnement serviraient à un développement intégral et durable. En effet, des activités connexes aux exploitations minières peuvent résorber cette non durabilité des exploitations minières et contribuer au développement durable. Les opportunités de développement durable qui accompagnent nos mesures d'atténuation sont l'agriculture dans les marais restaurés de la Mwogere, l'artisanat issu la filière bambou, l'élevage avec les feuilles de bambou comme fourrage, l'enrichissement des sols à partir des excréments des bétails et la briqueterie à partir des boues argileuses issues d'un bassin de décantation des drainages miniers.

Ce travail doit être complété par plusieurs autres études dont la détermination des méthodes de restauration des marais de la Mwogere, une étude sur la répartition foncière et cadre juridique des terres restaurées. Il faut aussi des études techniques d'aménagement des marais de Mwogere mais aussi la rationalisation des exploitations de coltan de Kabarore.

5.2. RECOMMANDATIONS

À la fin de nos recherches nous avons des recommandations à formuler à l'égard de l'Université du Burundi mais aussi à l'État Burundais et aux entreprises du Burundi.

En organisant un master professionnel en Gestion Intégrée de l'Environnement, nous recommandons à l'Université du Burundi de renforcer le partenariat avec les institutions engagés dans la gestion de l'environnement mais aussi avec les entreprises dont leurs activités contribuent à la destruction de l'environnement.

Nous recommandons aussi à l'État Burundais de prendre en compte les résultats des études scientifiques qui sont publiés par l'Université du Burundi en générale et les résultats des chercheurs de Master et doctorant en particulier pour un développement intégral. Mais aussi, de programmer une exploration satellitaire périodiquement et à haute résolution. Cela permettra aux chercheurs de disposé des outils nécessaires pour des études de plus de précision.

Il est aussi de l'intérêt des entreprises du Burundi de collaborer avec les chercheurs et leurs permettre d'avoir accès à leurs données. En effet, cela permet de contribuer à la résolution des problèmes qu'elles peuvent faire fassent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Acosta, J. A., Faz, A., Martínez-Martínez, S., Zornoza, R., Carmona, D. M., & Kabas, S. (2011). Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. *Journal of Geochemical Exploration*, *109*(1–3), 8–17. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.01.004

Ahouangan, M., Djaby, B., Ozer, P., Hountondji, Y.-C., Thiry, A., & de Longueville, F. (2014). Adaptation et résilience des populations rurales face aux catastrophes naturelles en Afrique subsaharienne. Cas des inondations de 2010 dans la commune de Zagnanado, Bénin. *Eau, Milieux, Aménagement. Une Recherce Au Service Des Territoires*, 265–278.

ANGORAN, A. (2004). *Burundi, Analyse du secteur agrcole*. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/kagera/resource/analyse_secteur_agricole.pdf

ArCGIS Desctop. (2015). Découper—Aide | ArcGIS Desktop. Retrieved September 2, 2019, from http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.4/tools/analysis-toolbox/clip.htm

Bahru, T., Mulatu, Y., & Kidane, B. (2015). Germination Ecology of Arundinaria alpina (K. Schum.) and Oxytenanthera abyssinica (A. Rich.) Munro Seeds: Indigenous Bamboo Species in Ethiopia . *International Journal of Biodiversity*, *2015*, 1–8. https://doi.org/10.1155/2015/323128

Bellon, S., & Lamine, C. (2009). Conversion to organic farming: A multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences - A review. *Sustainable Agriculture*, *29*, 653–672. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_40

Ben-zhi, Z., Mao-yi, F. U., Jin-zhong, X. I. E., Xiao-sheng, Y., & Zheng-cai, L. I. (2005). Ecological functions of bamboo forest : Research and Application. *Journal of Forestry Research*, *16*(2), 143–147.

Bonifazi, G., Serranti, S., Charou, E., Stefouli, M., Dimitrakopoulos, D., Vasiliou, E., … Souhila Benkaci, Dehbia Abir a, Aziz Oumellal, B. R. (2014). GIS applied to determine environmental impact indicators made by sand mining in a floodplain in southeastern Brazil. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *3*(1), 251–258. https://doi.org/10.1117/12.735810

BRB. (2019). *cours officiels des changes au comptant appliqués par la BRB en date du 18 Octobre 2019*. Retrieved from https://www.brb.bi/fr/content/cours-de-change-du-18-10-2019

Bucumi, T. (2004). *Les régions septentrionales du Burundi: Périphérie, frontières et développement. La commune de Kabarore*. Université du Burundi.

Burgoyne, D., Levallois, R., Perrier, J. - P, Pellerin, D., & Paillat, E. N. (1995). Comparaison de la rentabilité des systèmes conventionnels et biologiques en production laitière au Québec. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne d'agroeconomie*, *43*(3), 435–442. https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.1995.tb00133.x

Cazenave-Piarrot, A., Ndayirukiye, S., & Valtan, C. (2015). *Atlas des pays du Nord-Tanganyika* (IRD). Marseille.

Charou, E., Stefouli, M., Dimitrakopoulos, D., Vasiliou, E., & Mavrantza, O. D. (2010). Using remote sensing to assess impact of mining activities on land and water resources. *Mine Water and the Environment*, *29*(1), 45–52. https://doi.org/10.1007/s10230-010-

0098-0

Chibembe, S. A., Nishuli, R. B., Kamwanga, F. F., & Mangambu, M. J. de D. (2015). Exploitation de bambous (Sinarundinaria alpina (K. Schum.) C.S. Chao & Renvoize), cause des conflits entre le Parc National de Kahuzi-Biega et la population environnante: stratégie de conservation et de résolution de conflit. *International Journal of Environmental Studies*, *72*(2), 265–287.

Coalution Contre la Faim. (2013). *Note sur les enjeux du secteur agricule burundais: compte rendu de la réunion du 20 Sept 2013*. Retrieved from http://www.csa-be.org/IMG/pdf_Enjeux_Agricoles_Burundi_GPA-CCF_.pdf

Cochet, H. (1996). Gestion paysanne de la biomasse et developpement durable au Burundi. *Cahiers Des Sciences Humaines*, *32*(1), 133–151.

COMEBU. (2019). *Archives des statistques de la COMEBU de 2010 à 2019*. Bujumbura.

Craynon, J. R., Sarver, E. A., Ripepi, N. S., & Karmis, M. E. (2015). A GIS-based methodology for identifying sustainability conflict areas in mine design – a case study from a surface coal mine in the USA. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *30*(3), 197–208. https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1035872

Desiere, S., Niragira, S., & MArijke, D. (2013). L'effet de la pression démographique sur le système agricole au Burundi. In *Puplications de l'ISABU*. Bujumbura.

Embaye, K., Weih, M., Ledin, S., & Christersson, L. (2005). Biomass and nutrient distribution in a highland bamboo forest in southwest Ethiopia: Implications for management. *Forest Ecology and Management*, *204*(2–3), 159–169. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.074

Embaye, Kassahun, Christersson, L., Ledin, S., & Weih, M. (2003). Bamboo as bioresource in Ethiopia: Management strategy to improve seedling performance (Oxytenanthera abyssinica). *Bioresource Technology*, *88*(1), 33–39. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00265-1

Environmental Law Alliance Worldwide. (2010). *Guide pour l'evaluation des EIE de projets miniers*. 130.

Evette, A., & Cavaillé, P. (2016). *Fonctionnalités écologiques des berges : biodiversité et restauration Fonctions des ripisylves*.

FAO. (2000). *Schema Directeur D'Amenagement et de mise en valeur des marais*. Bujumbura.

Feleke, S. (2013). Site factor on nutritional content of Arundinaria alpina and Oxytenanthera abyssinica bamboo shoots in Ethiopia. *Journal of Horticulture and Forestry*, *5*(8), 115–121. https://doi.org/10.5897/JHF2013.0303

Gebre, A. B., Birhane, E., Gebresamuel, G., Hadgu, K. M., & Norgrove, L. (2019). Woody species diversity and carbon stock under different land use types at Gergera watershed in eastern Tigray, Ethiopia. *Agroforestry Systems*, *93*(3), 1191–1203. https://doi.org/10.1007/s10457-018-0226-6

Gis, A., & Flood, F. (2014). International Journal of Environment & Water. *International Journal of Environment and Water ISSN 2052-3408*, *3*(4), 28–40.

Gourmelon, F. (2003). *La contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l '*

environnement littoral To cite this version : Chargée de Recherche au CNRS (Université de Bretagne Occidentale). Retrieved from https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00321106

Gu, L., Zhou, Y., Mei, T., Zhou, G., & Xu, L. (2019). Carbon footprint analysis of bamboo scrimber flooring-implications for carbon sequestration of bamboo forests and its products. *Forests*, *10*(1), 1–14. https://doi.org/10.3390/f10010051

Honfo, H., Tovissodé, F. C., Gnanglè, C., Mensah, S., Salako, V. K., Assogbadjo, A. E., … Kakaï, R. G. (2015). Traditional knowledge and use value of bamboo in southeastern benin: Implications for sustainable management. *Ethnobotany Research and Applications*, *14*(March), 139–153. https://doi.org/10.17348/era.14.0.139-153

Houdanon, R. D., Mensah, S., Gnanglè, C., Yorou, N. S., & Houinato, M. (2018). Ecosystem services and biomass stock from bamboo stands in central and southern Benin, West Africa. *Energy, Ecology and Environment*, *3*(3), 185–194. https://doi.org/10.1007/s40974-018-0084-0

ISTEEBU. (2017). Annuaiare statistique du Burundi 2017. In *ISTEEBU-DIRECTION GENERALE*. https://doi.org/10.1108/eb057704

Javed, A., & Khan, I. (2012). Land Use / Land Cover Change Due To Mining Activities in Singrauli Industrial Belt , Madhya Pradesh Using Remote. *Journal of Environmental Research and Development*, *6*(3), 1–10.

Jyoti Nath, A., Das, G., & Das, A. K. (2009). Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. *Biomass and Bioenergy*, *33*(9), 1188–1196. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.020

Kataraza, M., & Sinarinzi, J. C. (2013). *Analyse de la turbidité et de la charge minérale de la rivière Mwogere traversant les exploitations de coltan de la région de Kabarore*. Université du Burundi.

Keita, M. M., & Waaub, J. P. (2011). *Évaluation Des Impacts Sur L'Environnement, Outil De Gestion Des Projets Miniers*. Retrieved from http://initiatives-mali.info/spip.php?article1120

Kelbessa, E., Bekele, T., Gebrehiwot, A., & Hadera, G. (2000). *A Socio-Economic Case Study of the Bamboo Sector in Ethiopia: An Analysis of the Production-to-Consumption System*. Retrieved from http://www.inbar.int/sites/default/files/resources/inbar_working_paper_no25.pdf

Lamine, C., Meynard, J.-M., Perrot, N., & Bellon, S. (2009). Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques : les cas de l'Agriculture Biologique et de la Protection Intégrée. *Innovations Agronomiques*, *4*(4), 483–493.

Lehmanna, D., Brinkmannb, K., Diogob, R. V. C., & Buerkertb, A. (2017). Temporal and spatial changes of land use in rare metal mining areas of Rwanda. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *31*(8), 519–529. https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1160490

Lizotte, B. (2017). Les facteurs entravant les études d'impact sur l'environnement (EIE) à l'internationale. Université de SHERBROOK.

Lujala, P., Lein, H., & Rød, J. K. (2015). Climate change, natural hazards, and risk perception: the role of proximity and personal experience. *Local Environment*, *20*(4), 489–509. https://doi.org/10.1080/13549839.2014.887666

Malavoi, J.-R., & Adam, P. (2007). Les interventions humaines et leurs impacts hydromorphologiques sur les cours d'eau. *Ingénierie*, *50*, 35–48.

Malavoi, J.-R., & Bravard, J. P. (2006). Variables de contrôle et score géodynamique. In *Eléments d'hydromorphologie fluviale* (pp. 35–44).

MARTIN, F. (2012). *Mécanique des Roches et Travaux Souterrains Cours et exercices corrigés* (8ème). Paris: CNS CACHAN.

Mekuriaw, Y., Urge, M., & Animut, G. (2011). Role of indigenous Bamboo species (Yushania alpina and Oxytenanthera abyssinica) as ruminant feed in northwestern Ethiopia. *Livestock Research for Rural Development*, *23*(9). Retrieved from https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd23/9/cont2309.htm

Midende, G. (2010). *Les exploitatations minière au Burundi*. 45–66.

Midmore, D. J. (2006). Silvicultural management of bamboo in the Philippines and Australia for shoots and timber. *Silvicultural Management of Bamboo in the Philippines and Australia for Shoots and Timber*, (January 2009), 24.

Mouaad, K., & Souhib, Y. (2015). *Mémoire de Master Présenté par Option : Exploitation Minière Thème Amélioration de la fragmentation de la roche à l ' explosif dans les conditions de la carrière des granulats d ' Adrar Oufernou* . ABDERRAHMANE MIRA-BJEJAIA.

Mututa, P. M., & Mbarambara, P. M. (2016). Gestion communautaire des conflits et promotion de la paix: Connaissances, attitudes, pratiques de populations du Territoire de Masisi en Province du Nord Kivu [Community management of conflict and peace promotion: knowledge, attitudes and practice of Ma. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, *17*(4), 1198–1208. Retrieved from https://search.proquest.com/docview/1824182444?accountid=14511%0Ahttp://sfx.ucl.ac.uk/sfx_local?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ%3Acentral&atitle=Gestion+communautaire+des+conflits+et+promotion+de+la

Nahimana, L., & Sendegeya, M. (2008). Impact des exploitations de coltan dans la région de Kabarore (Nord du Burundi). *Etudes Rwandaises*, *16*, 140–149.

Nath, A. J., & Das, A. K. (2012). Carbon pool and sequestration potential of village bamboos in the agro forestry system of northeast India. *Tropical Ecology*, *53*(3), 287–293.

Nations Unies. (1992). *Déclaration de rio sur l ' environnement et le développement principes de gestion des forêts*. Retrieved from https://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm

Ndabirorere, S. (2012). *Stabilisation des berges des rivières par le bambou (Burundi)*. Bujumbura.

Nduwayezu Eric. (2013). *Contribution à l'étude de la dégradation des terres agricoles du marais Mwogere consécutive aux exploitations de coltan et de cassitérite de Kabarore*. Université du Burundi.

NEGRE, M. (2000). Le Bambou. *Revue Forestière Française*, 661–671.

NIJIMBIRE, G. (2016). *Impacts socio-économique de l'exploitation des marais de la Province de Kayanza: cas des marais de la moyenne Ruvubu et ses affluents*. Université du Burundi.

Niyokindi Violette. (2013). *Les impacts socio-environnementaux de l'extraction minière artisanale en commune de Kabarore*. Université du Burundi.

Nkuriziza, J. B., & Niyonzima, J. (2014). *Application des SIG pour le développement d'une géodatabase sur les ressources minérales du Burundi, cas du coltan de Marangara et de Murehe*. Université du Burundi.

Ntakarutimana, C., & Sibomana, A. (2016). *Contribution à l'étude des minéralisations des gisements de Kabarore en vue de leur valorisation rationnelle*. Université du Burundi.

Ntenge, A., & Turimumahoro, D. (2010). *Contribution à l'étude des exploitations de colombo-tantalite dans la région de Kabarore (Nord-Ouest du Burundi)*. Université du Burundi.

Ntenge, A., & Turimumahoro Denis. (2010). *Contribution à l'étude des exploitations de colombo-tantalite dans la région de Kabarore (Nord-Ouest du Burundi)*. Université du Burundi.

Nusura, H., & Ngendakumana, C. (2014). *Implication de la femme rurale dans la gestion des ressources naturelles : cas des communes Kabarore et Rutegama*. *6973*(257), 13–27.

Observatoire de l'Action Gouvernementale. (2014). *Etat des lieux de la gouvernance dans la province de Kayanza au cours de l'année 2014. Rapport d'observation*. Bujumbura.

Paraszczak, J. (2012). *Sélection de la méthode de fragmentation du roc pour le minage des gisements filoniens*. Laval.

Pedro, P. (2011). *Investir dans l'agriculture au Burundi: indispensable pour combattre l'insécurité alimentaire et améliorer les conditions de vies de femmes paysannes* (Oxfam Espa). Retrieved from https://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/file_attachments/rr-investing-agriculture-burundi-051211-fr_3.pdf

PEDRO, P. S. (2011). *Investir dans l'agriculture au Burundi: indispensable pour combattre l'insécurité alimentaire et améliorer les conditions de vies de femmes paysannes*. Retrieved from https://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/file_attachments/rr-investing-agriculture-burundi-051211-fr_3.pdf

Ph Delville, L Boucher, & Vidal, L. (1996). Les Bas-fonds en Afrique Tropicale humide : Guide de diagnostic et d'intervention. In *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides, actes du séminaire international*.

Prieur, M. (1981). Le respect de l'environnement et les études d'impact. *Revue Juridique de l'Environnement*, *6*(2), 103–128. https://doi.org/10.3406/rjenv.1981.1631

Ramananantoandro, T., Rabemananjara, Z. H., Randrianarimanana, J. J., & Pommier, R. (2013). Valorisation de la filière bambou dans les zones orientales de Madagascar: Contraintes et opportunités. *Bois et Forets Des Tropiques*, *67*(316), 79–91.

Raymond Auerbach, G. R. and N. E.-H. S. (2013). *Organic agriculture: African experience in resilience and sustainability* (FAO). ROME.

REPUBLIQUE DU BURUNDI. (2018). *Plan National de Developpement du Burundi PND BURUNDI 2018-2017*. Retrieved from http://www.presidence.gov.bi/wp-content/uploads/2018/08/PND-Burundi-2018-2027-Version-Finale.pdf

République du Burundi. loi N°1/010 du 30/06/2000 portant Code de l'Envrionnement de la

république du Burundi. , cabinet du président 45 (2000).

République du Burundi. *Décret N°100/22 du 7 Octobre 2010 portant mesures d'application du Code de l'environnement en rapport avec la procédure d'Etude d'Impact Environnemental*. , (2010).

République du Burundi. *Loi N°1/13 du du 9 Aout 2011 portant Révision du Code Foncier du Burundi*. , (2011).

République du Burundi. *Constitution de la république du Burundi*. , (2018).

République du Burundi. (2018b). *Evaluation des récoltes, des approvisionnements alimentaires pour la saison 2018A et de la mise en place de la saison 2018B*. Bujumbura.

République du Burundi. (2018c). *PROJET de restauration des paysages et de résilience au Burundi (PRPR-Burundi): Cadre de gestion environnementale*.

République du Burundi - Ministère de l'agriculture et de l'élevage. *Plan national D 'investissement agricole*. , (2017).

Rishirumuhirwa, P. ,. T. (1994). Facteurs anthropiques de l'erosion dans les montagnes et hauts plateaux aux Burundi, Rwanda et Zaire. *Cahiers d'Outre-Mer*, *47*(185), 23–34. https://doi.org/10.3406/caoum.1994.3502

Roose, E., Ndayizigiye, F., & Sekayange, L. (1993). L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. Comment restaurer la productivite des terres acides dans une region tropicale de montagne a forte densite de population? *Cahiers - ORSTOM, Serie Pedologie*, *28*(2), 327–349.

S. Senthil Kumar, S. Arivazhagan, N. R. (2013). Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences - A Review. *Journal of Environmental Nanotechnology*, *2*(2), 92–101. https://doi.org/10.13074/jent.2013.06.132025

Sadler, B., & McCabe, M. (2002). *PNUE - Manuel de formation sur l'Etude d'impact environnemental*. *1*, 630. Retrieved from http://www.unep.ch/etb/publications/EIEManuelFormation2Edition.php

Santo, E. L., & Sánchez, L. E. (2002). GIS applied to determine environmental impact indicators made by sand mining in a floodplain in southeastern Brazil. *Environmental Geology*, *41*(6), 628–637. https://doi.org/10.1007/s002540100441

Schuster, M., & Ndimunbandi, J. (2018). *Introduction de mécanismes d'agriculture sous-contrat dans la filière thé au Burundi.Rapport d'analyse de politique, SAPAA 5Programme de Suivi et analyse des politiques agricoles et alimentaires)*. ROME.

Scurlock, J. M. O., Dayton, D. C., & Hames, B. (2000). Bamboo: An overlooked biomass resource? *Biomass and Bioenergy*, *19*(4), 229–244. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00038-6

SEEAC. (2013). *Evolution des systèmes d'étude d'impact sur l'environnement en Afrique centrale: Rôle des associations nationales de professionnels Avis de non-responsabilité* (Digit Prin). Yaounde.

SENDEGEYA Marcien. (2008). *Impacts des exploitations de colombo-tantalite dans la région de Kabarore (Nord-Ouest du Burundi)*. Université du Burundi.

Simonard, T., Duchaufour, H., Bizimana, M., & Mikokoro, C. (1994). La conservation des sols en milieu paysan burundais. Etude et hierarchisation des strategies antierosives. *Cahiers d'Outre-Mer*, *47*(185), 49–64. https://doi.org/10.3406/caoum.1994.3504

Sist, P., Mazzei, L., & Sablayrolles, P. (2013). *L'agriculture biologique en afrique: un levier d'innovations pour le développement agricole*. (August), 1–4.

Souhila Benkaci, Dehbia Abir a, Aziz Oumellal, B. R. (2018). Modeling the erosion of the upper and middle Cheliff basin by the Model builder application on ArcGis. *Journal of Materials and Engineering Structures*, *5*(1), 81–93.

Théodomir, R., & Eric, R. (1997). Effets des matières organiques et minérales sur la réhabilitation des sols acides de montagne du Burundi . Effects of organic and mineral matters on mountain acid soils remediation in Burundi Effets des matières organiques et minérales sur la réhabilitati. *Symposium N°38*, 10.

Turimumahoro, D. (2014). *Contribution à l'étude des minéralisations de coltan et de cassitérite de la région de Kabarore (Nord-Ouest du Burundi) : géologie, méthodes d'extraction et impacts environnementaux,*. Université du Burundi.

Union Européenne. (2019). Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE). Retrieved October 21, 2019, from https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/markets_fr

Vircoulon, T. (2019). *Mutation du secteur minier au Burundi Du développement à la captation*.

Vogtländer, J. G., Van Der Velden, N. M., & Van Der Lugt, P. (2014). Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle; Cases on wood and on bamboo. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *19*(1), 13–23. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0629-6

Von Schaewen, P. F., & Franco, P. (2012). Construire en bambou. *Architecture d'Aujourd Hui*, *387*, 78–85.

W., A., C., L., BAI, X., & PERLATA, P. N. (1996). *physical and mechanical propoerties of standboard made from Moso Bamboo* (p. 1). p. 1.

Wahab, R., Mohamed, A., Mustafa, M., & Hassan, A. (2009). Physical Characteristics and Anatomical Properties of Cultivated Bamboo Culms. *Journal of Biological Sciences*, Vol. 9, pp. 753–759.

WAMBEKE, A. VAN. (1963). *Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi. Rwanda et Burundi. A. - Sols* (IBERSOM). Bruxelles.

Word Bank. (2016). *Transparency in revenues from artisanal and small scale mining of tin*. Retrieved from https://goo.gl/yDsyWP

Wu, W., Liu, Q., Zhu, Z., & Shen, Y. (2015). Managing Bamboo for Carbon Sequestration, Bamboo Stem and Bamboo Shoots. *Small-Scale Forestry*, *14*(2), 233–243. https://doi.org/10.1007/s11842-014-9284-4

Yiping, L., Yanxia, L., Buckingham, K., Henley, G., & Guomo, Z. (2010). Bamboo and Climate Change Mitigation: a comparative analysis of carbon sequestration. *Tropical Report*, *32*(32), 30. Retrieved from http://holzwirtschaft.com/sites/default/files/userfiles/1file/bamboo-TR32.pdf

Zhou, G., Meng, C., Jiang, P., & Xu, Q. (2011). Review of Carbon Fixation in Bamboo

Forests in China. *Botanical Review*, *77*(3), 262–270. https://doi.org/10.1007/s12229-011-9082-z