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

Estimation quantitative des pertes en terres du bassin versant de la Ntahangwa suite à l'érosion hydrique en utilisant les systèmes d'information géographique et la télédétection

Kataraza, Marc; Sous la direction de : Pr David Nahimana ;

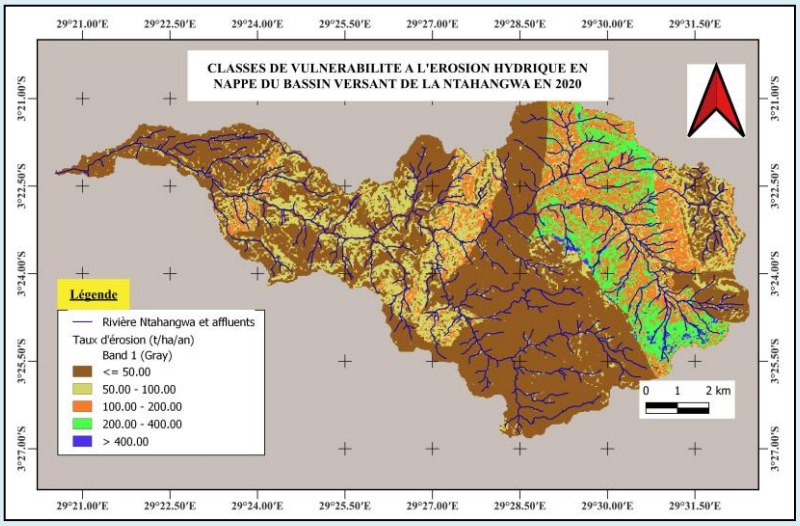
2023
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/975

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

ESTIMATION QUANTITATIVE DES PERTES EN TERRES DU BASSIN VERSANT DE LA NTAHANGWA SUITE A L'EROSION HYDRIQUE EN UTILISANT LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET LA TELEDETECTION



Par :
Marc KATARAZA

Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement.

Spécialité : Génie de l'environnement

Sous la direction de :
Pr David NAHIMANA : Directeur
Dr Samuel NDAYIRAGIJE : Co-directeur

Bujumbura, Décembre 2023

MEMBRES DU JURY

Pr Louis NAHIMANA : **Président**

Pr Bernadette HABONIMANA : **Secrétaire**

Pr André NDUWIMANA : **Membre**

Pr David NAHIMANA : **Directeur de mémoire**

Hon Dr Samuel NDAYIRAGIJE : **Co-directeur de mémoire**

REMERCIEMENTS

L'aboutissement du présent travail est le fruit d'un concours d'efforts de plusieurs individus ; une occasion nous est alors offerte pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne qui a apporté sa contribution de quelque nature que ce soit. Qu'il nous soit permis à cet effet de leur présenter nos sentiments de profonde gratitude.

Nous exprimons d'abord nos sentiments de reconnaissance envers Pr David NAHIMANA et Honorable Dr Samuel NDAYIRAGIJE (PhD), enseignants chercheurs à la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi, respectivement Directeur et Co-directeur du présent travail qui ont bien accepté de le diriger malgré leurs multiples responsabilités. Grâce à leurs conseils et observations tout au long de ce parcours, nous avons pu arriver à son aboutissement.

Notre respectueuse et particulière reconnaissance va ensuite à tous les enseignants intervenant dans le cycle de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement de l'Université du Burundi, qui nous ont transmis leurs connaissances et expériences tout au long des deux années de notre cursus et qui nous ont initiés à la recherche.

Pour la même occasion, nous témoignons notre reconnaissance vis-à-vis des enseignants chercheurs et collègues du Département des Sciences de la Terre qui ont aussi participé à la réalisation de ce travail grâce aux discussions constructives, au partage d'expérience et de connaissances, mais surtout à leur agréable compagnie très appréciés pour finaliser ce travail.

Nous aurions eu beaucoup de mal à mener avec succès cette recherche sans l'excellente contribution en matière des Systèmes d'Information Géographique et de la Télédétection des professeurs Anicet SINDAYIHEBURA, Désiré KUBWIMANA et Marcien SENDEGEYA du Département des Sciences de la Terre ; nous les remercions chaleureusement.

Nous voudrions également manifester notre sentiment de gratitude vis-à-vis des chercheurs qui ont mené leurs travaux de recherche sur le bassin versant de la Ntahangwa et dont les données nous ont grandement servi dans le cas présent. Qu'ils trouvent ici notre gratitude pour avoir contribué à promouvoir la recherche.

Nous ne pouvons pas clore cette partie sans rappeler ce que nous devons à nos camarades étudiants de la 3è cohorte du Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement de l'Université du Burundi et spécialement ceux de la spécialité "Génie de l'Environnement" avec qui nous avons passé les deux années de formation : leur bonne cohabitation, leur franche collaboration, leur assiduité au travail,… nous ont aidé à améliorer le savoir-vivre et le savoir-faire.

Ces dernières lignes sont aussi l'occasion de remercier du fond du cœur toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué pour que nous atteignions ce stade : les membres de la famille, les amis, les colocataires, les voisins, etc. Que ce travail soit l'expression de notre profonde et indéfectible gratitude à leur égard.

KATARAZA Marc

RESUME

Depuis ces dernières décennies, beaucoup de pays du monde, surtout ceux en voie de développent, souffrent de la dégradation et de l'épuisement des ressources naturelles (dont le sol) et de la pauvreté rurale en raison de l'évolution progressive des pratiques non-durables d'utilisation des sols ainsi que les conditions climatiques altérées. Parmi les diverses formes de dégradation des sols, l'érosion hydrique est le phénomène le plus complexe et le plus largement répandu qui représente une grave menace tant pour la durabilité des niveaux de production agricole que pour la disponibilité des ressources en eau et en sol. L'évaluation de l'érosion des sols est donc un outil important pour la planification et la conservation des eaux et des sols.

La spatialisation et la quantification des principaux facteurs de l'érosion hydrique (à savoir l'érodibilité des sols (K), l'érosivité des pluies (R), la longueur et l'inclinaison des pentes (LS), l'occupation du sol (C) et les pratiques antiérosives (P)) nous a permis d'aboutir à l'objectif principal de la présente étude qui est de spatialiser et quantifier les pertes en terre du bassin versant de la Ntahangwa dues à l'érosion hydrique en nappe mais aussi de dresser une carte de risque d'érosion en nappe sur ledit bassin versant.

La méthodologie adoptée s'est appuyée sur l'équation universelle de perte de sol (USLE), empiriquement élaborée par Wischmeier et Smith en 1978 et donnant la quantité de terre (en t/ha/an) susceptible d'être décapée par l'érosion hydrique en nappe. Dans cette étude, l'USLE : A = R.K.LS.C.P a été intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG) couplé à la télédétection. Cette modélisation USLE est l'une des méthodes les plus couramment appliquées pour évaluer l'érosion en nappe.

Les résultats obtenus, pour une période allant de 1991 à 2020, mettent en relief l'impact érosif de chaque facteur et établissent une hiérarchisation des zones à risque d'érosion hydrique de la zone d'étude. La carte résultante montre que, sur le bassin versant de la rivière Ntahangwa (± 111.5 km^2), étendu sur la plaine de l'Imbo, le Mirwa et la crête Congo-Nil, environ un million de tonnes de matériaux (soit 829 459,65 tonnes) sont en moyenne arrachées chaque année, c'est-à-dire une moyenne de pertes en sol de 74.4 t/ha/an (équivalent à une épaisseur de 0.6 cm). Les endroits les plus sujets à l'érosion sont les sols dénudés, développés sur les schistes et/ou exposés à de fortes pentes ; Isale est la plus vulnérable de toutes les communes sur lesquelles s'étend ledit bassin hydrographique.

Un contrôle d'urgence de l'érosion du sol du bassin versant de la Ntahangwa est nécessaire avec une priorité accordée à la région du Mirwa qui est extrêmement exposée afin de réduire les impacts sur site (amont) et hors site (aval). Avec cette carte, il est désormais possible de localiser les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire; elle peut donc être un outil d'aide à la prise de décision afin d'orienter les différentes actions d'intervention de conservation des eaux et des sols ainsi que les plans de gestion et d'aménagement de l'espace.

Mots clés : USLE, Télédétection, SIG, Bassin versant, Ntahangwa, Erosion hydrique.

ABSTRACT

In recent decades, many countries in the world, especially those in the process of developing, have suffered from the degradation and depletion of natural resources (including soil) and from rural poverty due to the gradual evolution of unsustainable land use practices as well as altered climatic conditions. Among the various forms of soil degradation, water erosion is the most complex and widespread phenomenon that represents a serious threat both to the sustainability of agricultural production levels and to the availability of water and soil resources. Soil erosion assessment is therefore an important tool for water and soil planning and conservation.

Spatialisation and quantification of the main factors of water erosion (namely: soil erodibility (K), rainfall (R), length and steepness of slopes (LS), land use (C) and erosion control practices (P)) allowed us to achieve the main objective of the present study which is to spatialise and quantify soil losses in the Ntahangwa watershed due to sheet water erosion but also to draw up a risk map of the sheet erosion on the said watershed.

The methodology adopted was based on the universal soil loss equation (USLE), empirically developed by Wischmeier and Smith in 1978 and giving the quantity of soil (in t/ha/year) likely to be stripped by the sheet water erosion. In this study, the USLE: A = R.K.LS.C.P was integrated into a Geographic Information System (GIS) coupled with remote sensing. This USLE modeling is one of the most commonly applied methods for assessing sheet erosion.

The results obtained, for a period from 1991 to 2020, highlight the erosive impact of each factor and establish a hierarchy of areas at risk of water erosion in the study area. The resulting map shows that, on the watershed of the Ntahangwa River (± 111.5 km²), extended over the Imbo plain, the Mirwa and the Congo-Nile ridge, approximately one million tonnes of materials (i.e. 829,459, 65 tonnes) are on average uprooted each year, i.e. an average soil loss of 74.4 t/ha/year (equivalent to a thickness of 0.6 cm). The areas most prone to erosion are bare soils, developed on shale and/or exposed to steep slopes; Isale is the most vulnerable of all the communes over which the said river basin extends.

Emergency control of soil erosion in the Ntahangwa watershed is needed with priority given to the Mirwa region which is extremely exposed in order to reduce the impacts both on site (upstream) and off site (downstream). With this map, it is now possible to locate the areas of high erosion requiring priority intervention; it can therefore be used as a decision-making tool in order to guide the various intervention actions of water and soil conservation as well as space management and development plans.

Key words: **USLE, Remote sensing, GIS, Watershed, Ntahangwa, Water erosion.**

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**
REMERCIEMENTS ..... **ii**
RESUME ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
TABLE DES MATIERES ..... **v**
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **vii**
TABLE DES ILLUSTRATIONS ..... **viii**
AVANT-PROPOS ..... **x**

INTRODUCTION GENERALE **1**
1. Introduction 1
2. Problématique 2
3. Hypothèse de travail 3
4. Objectifs 4
5. Intérêt du sujet 4

CHAP. I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE **5**
I.1 Problématique de l'érosion 5
I.1.1 Introduction 5
I.1.2 Formes d'érosion du sol 5
I.1.3 Erosion hydrique des sols 6
I.1.4 Formes d'érosion hydrique 6
I.1.5 Facteurs de l'érosion hydrique 7
I.1.6 Les conséquences de l'érosion 8
I.2 Quantification de l'érosion par le modèle USLE 10
I.2.1 Les paramètres du modèle classique USLE 10
- Le facteur R – Erosivité pluviale 11
- Le facteur K - Erodibilité du sol 12
- Le facteur LS – Topographie 15
- Le facteur C - Occupation du sol 16
- Le facteur P - pratiques antiérosives 17
- Le taux d'érosion A - quantité de pertes de sol 18

I.2.2 Usage des SIG et télédétection pour la quantification des pertes en terre 19

CHAP. II: DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE **22**
II.1 Cadre géographique du bassin versant de la rivière Ntahangwa 22
II.1.1 Présentation. 22
II.1.2 Hydrographie 22
II.1.3 Géomorphologie 22
II.1.4 Climat 24

II.1.5 Occupation du sol 25
II.2 Cadre géologique du bassin versant de la rivière Ntahangwa 26
II.2.1 Lithologie 26
II.2.2 Tectonique 27
II.3 Contexte pédologique du bassin versant de la rivière Ntahangwa 27
II.4 Etat de la dégradation du sol du bassin versant de la rivière Ntahangwa 29
II.5 Quantification de l'érosion sur le bassin versant de la rivière Ntahangwa 29
II.6 Impacts socio-économiques et environnementaux de l'érosion du BV Ntahangwa 30

CHAP. III : MATERIEL ET METHODES 34
III.1 Inventaire des données utilisées 34
III.2 Méthode d'analyse des données 34
III.3 Choix des équations 35
III.3.1 Le facteur R 35
III.3.2 Le facteur K 36
III.3.3 Le facteur LS 36
III.3.4 Le facteur C 36
III.3.5 Le facteur P 38

CHAP. IV: PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS 40

IV.1 Présentation des résultats 40
IV.1.1 Le facteur R 40
IV.1.2 Le facteur LS 41
IV.1.4 Le facteur C 43
IV.1.5 Le facteur P 44
IV.1.6 Le taux de pertes de sols : A 45
IV.2 Analyse et discussion des résultats 46
IV.2.1 Le facteur R 46
IV.2.2 Le facteur K 46
IV.2.3 Le facteur LS 47
IV.2.4 Le facteur C 48
IV.2.5 Taux d'érosion A 48

CONCLUSION ET SUGGESTIONS 50
1. Conclusion générale 50
2. Suggestions 51

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 53
ANNEXES 62

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AEE : Agence européenne pour l'environnement
AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique
BCG : Bureau de centralisation géomatique du Burundi
BV : Bassin versant
CEC : Capacité d'échange cationique
DDT : Dichloro-diphényl-trichloroéthane
ETM+ : Capteur enhanced thematic mapper plus
FAO : Food and agriculture organisation/
Organisation (des Nations unies) pour l'alimentation et l'agriculture
IDW : Inverse distance weighting interpolation/
Interpolation par la pondération inverse à la distance
IGEBU : Institut géographique du Burundi
INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
ISABU : Institut des sciences agronomiques du Burundi
LADA : Land Degradation Assessment in Drylands project/
projet d'Evaluation de la dégradation des terres arides
Landsat : Land satellite/satellite de la terre
MAEP : Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (Madagascar)
MEEATU : Ministère de l'eau, de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme
MES : Matières en suspension
MINAGRIE : Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage
MINATET : Ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme
MNT : Modèle numérique de terrain
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index/
Indice de végétation par différence normalisée
NIR : Near infra-red/proche infrarouge
NTU : Nephelometric turbidity unit/Unité standard de mesure de la turbidité
ONU : Organisation des Nations Unies
PAM : Précipitations annuelles moyennes
QGIS : Quantum – Geographic information system
RD Congo : République démocratique du Congo
REGIDESO : Régie de production et de distribution d'eau et d'électricité
RUSLE : Revised universal soil loss equation/
Equation universelle révisée des pertes en terre
SIG : Systèmes d'information géographique
TM : Capteur thematicmapper
USDA : U.S. Department of Agriculture/Département américain de l'agriculture
USGS : United States Geological Survey / Institut d'étude géologique des Etats-Unis
USLE : Universal Soil Loss Equation /équation universelle des pertes en terres

TABLE DES ILLUSTRATIONS

A. LISTE DES FIGURES

Figure 1: Impact de la goutte de pluie sur le sol et manifestation de l'érosion 8
Figure 2: Traitement des ravins, leur évolution et manifestation des mouvements de masse .. 8
Figure 3: Les conséquences de l'érosion hydrique du sol 9
Figure 4: Nomographe de Wischmeier & Smith (1978) pour le calcul du facteur K 14
Figure 5: Triangle de texture de sols de l'USDA..... 14
Figure 6: Nomographe de Wischmeier & Smith (1978) pour le calcul du facteur LS 16
Figure 7: Nomographe de calcul du facteur C 17
Figure 8: Parcelle expérimentale de Wischmeir 20
Figure 9: Relation (hypothétique) entre NDVI et le facteur C..... 21
Figure 10: Localisation administrative ét réseau hydrographique du BV Ntahangwa 23
Figure 11: Carte de relief du BV Ntahangwa (extraite du MNT 10 m de résolution) 24
Figure 12: Carte des pentes du BV Ntahangwa (extraite du MNT 10 m de résolution)..... 24
Figure 13: Aperçu de l'occupation du sol du BV Ntahangwa. 25
Figure 14: Carte lithologique BV Ntahangwa (d'après la carte géologique du Burundi) 28
Figure 15: Carte des lithologies du BV Ntahangwa (adaptée selon Kagaye, 2015)..... 28
Figure 16: Nuisances dues aux crues de la rivière Ntahangwa suite à l'érosion de son BV. . 32
Figure 17 : Sédimentation du port de Bujumbura suite à l'érosion du BV Ntahangwa..... 32
Figure 18: Les stations climatologiques aux environs du Bassin Versant de Ntahangwa. 36
Figure 19: Carte mondiale du facteur P selon le projet LADA..... 38
Figure 20: Organigramme de cartographie des pertes en sol adoptée dans cette étude. 39
Figure 21: Précipitations annuelles moyennes du BV Ntahangwa de 1991 à 2020..... 41
Figure 22: Facteur R du BV Ntahangwa enregistrés au cours de la période 1991 – 2020 41
Figure 23: Facteur topographique LS du bassin versant de la rivière Ntahangwa..... 42
Figure 24: Indice NDVI du BV Ntahangwa extrait de l'image Landsat du 17/8/ 2020 44
Figure 25: Facteur C et classes d'occupation du sol BV Ntahangwa (Landsat 17/8/ 2020)... 44
Figure 26: Taux d'érosion potentielle du BV Ntahangwa enregistré en 2020..... 45
Figure 27: Taux d'érosion réelle du BV Ntahangwa enregistré en 2020..... 45
Figure 28: Classes de susceptibilité des sols du BV Ntahangwa à l'érosion hydrique..... 47
Figure 29 : Classes de vulnérabilité à l'érosion hydrique du BV Ntahangwa en 2020 49
Figure 30 : Tolérance à l'érosion du BV Ntahangwa en 2020 selon la règle de la FAO..... 49

B. LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Formules de calcul du facteur R intégrant les précipitations moyennes. 11
Tableau 2 : Classes de susceptibilité des sols à l'érosion hydrique 12
Tableau 3: Les codes/classes de structure du sol 12
Tableau 4 : Les classes de perméabilité et les valeurs de conductivité hydraulique du sol 13
Tableau 5: Valeurs de K suivant la classe de texture 13
Tableau 6: Classes texturales issues du matériau géologique parental 14
Tableau 7 : Les valeurs du facteur LS dans les régions géomorphologiques du Burundi 15
Tableau 8: Valeur de m suivant la pente θ 15
Tableau 9: Valeurs de C pour différents types d'occupation du sol et modes de culture 17
Tableau 10 : Valeurs du facteur P suivant la pente et certains aménagements effectués. 18
Tableau 11: Classes de risques érosifs 19
Tableau 12: Répartition climatologique des 3 zones éco-climatiques du BV Ntahangwa 25
Tableau 13 : Valeurs approximatives des facteurs USLE des régions naturelles du Burundi 30
Tableau 14 : Identification des pertes chimiques sur les parcelles du Mirwa 31
Tableau 15 : Synthèse des paramètres RUSLE du BV Ntahangwa (1991 – 2020) 40
Tableau 16 : Les précipitations moyennes et facteur R du BV Ntahangwa (1991 à 2020) 40
Tableau 17 : Valeurs du facteur K_{USA} des lithologies du bassin versant de la Ntahangwa 43
Tableau 18: Classes d'occupation du sol du BV Ntahangwa (image landsat du 17/8/2020) . 43
Tableau 19: Les classes de susceptibilité des sols du BV Ntahangwa à l'érosion hydrique .. 47
Tableau 20: Techniques antiérosives proposées par *MEEATU & MINAGRIE (2016)* 52

AVANT-PROPOS

L'érosion hydrique des sols est l'une des causes majeures de la dégradation des sols dans le monde et constitue une menace pour la qualité des sols, ce qui a un impact sur la production agricole, la fourniture de services écosystémiques.

L'idée de ce mémoire de recherche est venue après avoir constaté que la turbidité et la pollution de l'eau du lac Tanganyika suite à l'apport excessif de sédiments et de nutriments issus du lessivage des sols des sous-bassins versants dudit lac sont à l'origine (1) de la baisse de la qualité des eaux poussant ainsi la REGIDESO appliquer fréquemment le délestage de l'eau en Mairie de Bujumbura, (2) de l'eutrophisation de l'eau du lac, (3) de la destruction des niches des espèces qui y vivent provoquant par exemple la rareté des poissons (Mukeke et Ndagara), (4) la difficulté d'accès des navires au port de Bujumbura, etc.

Le présent travail de mémoire prétend être un élément de contribution à la gestion conservatoire des eaux et des sols du bassin versant de la rivière Ntahangwa afin de prévenir ou réduire le risque pour les biens et les personnes de la ville de Bujumbura que traverse cette rivière pour se jeter dans le lac Tanganyika.

La quantification réelle des pertes de ce bassin versant n'a pas été précise car le modèle RUSLE utilisé ne traite que l'érosion en nappe uniquement alors que notre zone d'étude connaît également des ravinements et des mouvements de masse. Le même modèle ne prédit pas non plus les apports qui parviennent à la rivière Ntahangwa et le lac Tanganyika par conséquent car il ne tient pas compte des processus de transport et de sédimentation des matériaux. Toutefois, les résultats trouvés permettent non seulement de localiser les secteurs de forte érosion en nappe nécessitant une intervention prioritaire mais également d'élaborer des documents graphiques pouvant constituer des outils d'orienter les décideurs à la prise de décision en vue d'une utilisation rationnelle des sols de ce bassin versant et de la gestion durable du lac Tanganyika.

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction

L'érosion hydrique du sol a toujours eu lieu et façonné la surface de la terre au cours des âges géologiques. Toutefois, les facteurs anthropiques qui viennent s'ajouter aux facteurs d'origine naturelle accélèrent fortement son taux et diminuent par conséquent des terres cultivables. *Les facteurs anthropiques* sont liés à la rapide croissance démographique globale mal gérée, on peut citer : la demande accrue en terres cultivables, les pratiques culturales non durables, la déforestation, les feux de brousse, le surpâturage, l'urbanisation et d'autres activités économiques. *Les facteurs naturels* sont : les fortes pluies, la pente, la lithologie, les processus tectoniques, etc. De nos jours, *le changement climatique* est également considéré comme un facteur majeur qui est perçu tantôt comme source naturelle, tantôt comme source anthropique de dégradation des terres ***(Kiunsi & Meadow, 2006)***.

La perte de quelques centimètres de couche du sol, par l'érosion, peut se faire très rapidement. En quelques années, un sol qui a nourri des populations pendant plusieurs générations peut devenir quasiment stérile ; or, il est une ressource très lentement renouvelable, qui ne se forme pas à l'échelle des générations humaines mais à celle de milliers d'années ***(Fox, 2008)***. En effet, la formation d'1 m d'épaisseur du sol peut nécessiter 100 000 ans en milieu tropical humide où le processus est, disons, plus rapide ***(Roose, 1990 & 1994)*** alors que l'érosion annuelle moyenne emporte 1mm de sol (soit 1 m en 1000 ans). Ainsi, la perte de quelques centimètres de sol ne pourra être compensée qu'à l'échelle des millénaires En plus, le sol est une ressource fixe qui ne se laisse pas déplacer facilement ; c.à.d. que, sauf cas exceptionnel, il est impossible de remettre sur un versant le sol érodé, l'agriculteur ne peut pas simplement reprendre le sol en bas de versant pour le remettre en amont. Ainsi, à moins que l'on fasse recours aux techniques de restauration, la dégradation du sol par érosion représente sa perte quasi définitive à l'échelle des générations à venir ***(Fox, 2008)***.

L'érosion du sol d'un BV (bassin versant) constitue une préoccupation écologique mondiale puisqu'elle provoque le transfert de sédiments et d'éléments nutritifs vers l'aval conduisant à des conséquences pouvant être très coûteuses, tant pour les agriculteurs individuels que pour la société dans son ensemble. Ces conséquences peuvent être divisées en effets sur site et hors site ***(Morgan, 2005)***. Les effets sur site (en amont) sont généralement dus à la diminution des matières organiques et des nutriments ainsi qu'à la perte de sol et à la dégradation de sa structure. Il s'agit de la baisse (i) de la fertilité et (ii) de la profondeur du sol. Ces problèmes sont généralement les plus problématiques pour l'agriculteur ou le propriétaire foncier qui doit faire face à des baisses de la productivité et de la valeur des terres. D'autre part, les effets hors site affectent souvent les autorités locales ou la communauté toute entière. Il s'agit typiquement de (1) la sédimentation en aval, (2) la modification physique des habitats du cours d'eau qui transite par cette région ou des lacs en aval, (3) l'envasement des réservoirs et des barrages qui augmentent le risque d'inondation et (4) l'eutrophisation des lacs en aval par des polluants et des engrais absorbés par les sédiments. Ces conséquences exigent des coûts élevés quand la restauration ou la réhabilitation est encore possible.

Le BV Ntahangwa, l'un des sous-BV du lac Tanganyika, s'étendant d'Est en Ouest de la crête Congo-Nil à la plaine de l'Imbo, est plus vulnérable à l'érosion hydrique.
Bizimana & Duchaufour (1992) ont estimé les taux d'érosion dans la rivière Ntahangwa comme étant entre 20 et 100 t/ha/an alors que le seuil d'érosion tolérable gravite autour de 12 t/ha/an ; c.-à-d. une perte en terre du même ordre de grandeur que l'altération de la roche sous-jacente, soit environ l mm par an ***(Roose et al., 2015)***.

Pour s'enquérir de la situation de l'érosion au Burundi, plusieurs auteurs, en collaboration avec l'ISABU ***(Rishirumuhirwa, 1999)***, ont réalisé des travaux d'expérimentation sur base des paramètres de "l'**USLE"** : *Universal Soil Loss Equation* ou Equation Universelle des Pertes de Sol de ***Wischmeier et Smith (1978)***. La majorité des travaux se sont penchés sur la région naturelle du Mirwa considérée comme l'une des régions du Burundi à très haut risque d'érosion ***(Bidou, 1988)***. Les résultats ont ainsi montré qu'au Burundi, sur sol nu, les pertes en terre dues à l'érosion en nappe et en rigoles sont très élevées ***(Nsabimana, 1999)*** et qu'elles sont principalement liées à la disparition du couvert végétal naturel mais aussi à la géomorphologie pour la région du Mirwa notamment ***(Rishirumuhirwa, 1997)***.

Mais la quantification et la spatialisation de l'érosion par l'USLE à l'aide des systèmes d'information géographique (**SIG**) et de la Télédétection n'est pas très développée au Burundi alors que cette modélisation constitue une approche essentielle pour l'appréhension des processus d'érosion sur un BV puis qu'elle permet d'apporter une estimation des particules de sol susceptibles d'être arrachées et de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion ***(Payet, et al., 2012)***. En outre, la version informatisée de l'USLE (communément appelée RUSLE) c-à-d l'USLE couplé à un SIG, permet de produire des documents qui serviront d'outils d'aide à la prise de décision pour les aménageurs ***(Printemps, 2007)***.

Le présent travail «***Estimation quantitative des pertes en terres du bassin versant de la Ntahangwa suite à l'érosion hydrique en utilisant les systèmes d'information géographique et la télédétection***» s'inscrit dans le cadre de la promotion de la gestion durable des ressources naturelles (principalement le sol et l'eau) du BV Ntahangwa par la spatialisation de l'impact de chacun des facteurs de l'érosion et finalement la quantification de cette dernière (voir l'intérêt du sujet). C'est dans cette optique que, sur base de la problématique ci-après dégagée, nous avons fixé des objectifs qui vont nous permettre de confirmer ou infirmer notre hypothèse de travail.

Dans ce travail, nous avons jugé bon d'évaluer cet aléa "érosion" au cours d'une trentaine d'années, c'est-à-dire de 1991 à 2020. Le choix d'une période de 30 ans est guidé par le fait que le calcul du facteur "*érosivité des pluies*" exige une série de données pluviométriques couvrant une période minimale de 22 ans ***(Wischmeier & Smith, 1978 ; Hamdi, 2016)***.

2. Problématique

Les dégâts engendrés par cette érosion constituent une menace pour la production agricole durable du BV Ntahangwa et un impact négatif sur la qualité de l'eau et la biodiversité du lac Tanganyika. Quelques exemples d'impacts causés par l'érosion sur le BV Ntahangwa :

- ✓ il y a une chute moyenne de l'ordre de 1.6 du carbone organique et de 1.3 de l'azote pour une parcelle cultivée par rapport au sol témoin initial qui n'a pas subi d'érosion ; une baisse de fertilité qui s'accompagne d'une augmentation de l'acidité d'une unité de pH et du taux d'aluminium libre ***(Bizimana & Duchaufour, 1992)***.

- ✓ les inondations récurrentes qui s'observent dans la ville de Bujumbura, quand il y a des pluies torrentielles, entrainent de mauvaises conditions de vie. Elles provoquent des conséquences terribles : emportent des maisons d'habitation, ponts, routes, écoles et parfois des vies humaines. En effet, le système de canalisation des eaux pluviales n'est plus en mesure de les évacuer correctement.

- ✓ la turbidité de l'eau du lac Tanganyika s'accroit depuis ces dernières années (25 NTU en 2017 contre 1.2 en 1994) et oblige la REGIDESO à appliquer fréquemment le délestage en Mairie de Bujumbura. De plus, le point de captage de l'eau dans ce lac a dû être déplacé aussi bien vers le large qu'en profondeur. Actuellement, l'eau est captée à 3500 m sur une profondeur de 25 m par rapport au littoral alors qu'il était à 1800 m dans les années antérieures. On saura en effet que le point de captage de la REGIDESO, dans le lac Tanganyika, se situe à une petite distance en aval de l'embouchure de la Ntahangwa.

- ✓ la présence de quantités excessives de particules érodées, de nutriments et de matière organique dans le lac Tanganyika réduit la diversité des espèces. En effet, depuis les années 1970, les captures des Lates (Mukeke) baissent au Burundi car ce prédateur visuel est moins actif ou même absent dans les eaux plus troubles **(*Ntakimazi, 2006*)**, ce qui est de plus en plus le cas au large du Burundi**.**

- ✓ le phénomène d'eutrophisation, provoqué par l'excès de nutriments, surtout le phosphore, et traduit par un développement anarchique d'algues et de végétaux flottants à la surface de l'eau (comme la jacinthe d'eau) se fait déjà remarquer au large de Bujumbura avec une incidence sur la composition de la faune des poissons: les prédateurs sélectifs, comme les Mukeke et les espèces liées à des fonds clairs se raréfient et pourront disparaître des zones affectées tandis que les Ndagala verront la réussite de l'éclosion de leurs œufs de plus en plus compromise **(*Ntakimazi, 2006*)**.

3. Hypothèse de travail

Au cours de ce travail, nous allons vérifier que ***"le taux d'érosion en nappe sur le BV Ntahangwa n'a pas cessé d'augmenter au cours de ces 30 dernières années (1991-2020)"*** et que les facteurs pente et occupation du sol en seraient les principaux responsables.

En effet, d'une part, les travaux antérieurs menés par l'ISABU ont montré que l'érosivité dans notre zone d'étude est faible comparée à celle observée dans la région équatoriale et que les sols résistent très bien à l'érosion ***(Nsabimana, 1999 ; Rishirumuhirwa, 1999 ; Duchaufour & Mikokoro, 2012)***. D'autre part, il apparaît que la bonne résistance des sols du Mirwa à l'érosion, une des régions naturelles les plus productrices de banane, est liée aux systèmes traditionnels d'exploitations dont le bananier constitue un pivot et que la régression de la

bananeraie conduit ainsi à une forte aggravation des phénomènes érosifs ***(Rishirumuhirwa, 2012)***.

4. Objectifs

L'objectif global du présent travail est de spatialiser et quantifier les pertes en terre du BV Ntahangwa suite à l'érosion hydrique en nappe. Il sera atteint à travers les ***objectifs spécifiques*** suivants :

- ✓ Quantifier l'importance de chaque facteur contribuant à l'érosion hydrique,
- ✓ Elaborer des cartes (spatialisation) de ces différents facteurs de l'USLE,
- ✓ Elaborer une carte synthèse des pertes en terres par le croisement de ces cartes factorielles.

5. Intérêt du sujet

La spatialisation et la quantification de l'érosion hydrique sur le BV Ntahangwa est un modèle empirique de prévision de l'érosion qui permettra :

- de contribuer à une meilleure connaissance (i) des zones du BV les plus sensibles à l'érosion hydrique, (ii) de la quantité de matériaux potentiels fournis par le BV et susceptibles de contribuer à la dynamique de la Ntahangwa, aux inondations dans la ville de Bujumbura, à la pollution du lac Tanganyika, …

- de montrer qu'en investissant dans la lutte contre la dégradation des sols du BV Ntahangwa, on permettrait (i) d'améliorer la production agricole et sylvicole en amont, (ii) de protéger les infrastructures socio-économiques, (iii) d'éviter des dépenses énormes liées à la réhabilitation des dommages engendrés dans la ville de Bujumbura, (iv) de préserver la qualité des eaux du lac Tanganyika et de ses ressources halieutiques, etc.

Ce travail pourrait inciter de ce fait les services habiletés à agir pour un bon aménagement et une meilleure gestion de ce BV pour que l'érosion régresse en dessous de la valeur limite tolérable.

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Problématique de l'érosion

I.1.1 Introduction

Le terme « érosion » vient du verbe latin "***erodere"***, qui signifie "***ronger.***" L'érosion du sol est, en effet, l'ensemble des processus de destruction des agrégats du sol, d'arrachage et d'évacuation, d'un endroit à un autre, des particules et matières organiques qui le constituent ***(Roose, 1994)***. Les phénomènes d'érosion sont actifs tout au long de l'histoire de la Terre et les facteurs naturels exogènes tels que l'eau, le vent et la glace en sont les principaux agents. Néanmoins, dès que l'homme s'est attaché à cultiver la terre, il a provoqué son accélération.

Le ***sol*** est l'un des composants essentiels de la terre ; une formation fragile constituée de matériaux meubles minéraux et organiques, non consolidées, mais possédant une structuration en agrégats agglomérées qui se forme lentement par transformation physique (désagrégation) et chimique (altération) des roches sous l'effet des agents climatiques (précipitations et température) et biologiques ***(Roose et al., 2010)***. Il est un important réservoir de biodiversité : environ un quart à un tiers de l'ensemble des organismes se trouvent dans les sols ***(AEE, 2019)*** ; il contient également plusieurs habitats (surface du sol, sous-sol et espace interstitiel) qui abritent différents organismes.

L'érosion des sols est donc, à l'échelle mondiale, un problème environnemental sérieux, mais plus préoccupant dans certains pays en voie de développement. Elle peut causer des nuisances ou même des catastrophes pour les hommes car elle touche principalement la fertilité des sols et la qualité des eaux. On saura que la fertilité du sol est concentrée dans les 25 premiers centimètres ***(Roose, 1994)***. L'érosion des sols est un risque qu'il faut donc bien étudier pour le prévenir et en minimiser les dégâts afin de préserver notre sol car il est menacé de disparition lorsque l'érosion va plus vite que l'altération des roches qui fournit le matériau minéral du sol.

I.1.2 Formes d'érosion du sol

- Suivant les principaux agents naturels de l'érosion qui sont : l'eau, le vent, la gravité et la glace, nous distinguons respectivement quatre formes d'érosion: ***érosion hydrique***, ***érosion éolienne***, ***érosion gravitaire*** et ***érosion glaciaire (Fox, 2008)***. De ces quatre formes d'érosion, au cours de ce travail, nous traiterons ***l'érosion hydrique*** car elle constitue une des plus sérieuses formes de dégradation des sols agricoles dans le monde et en particulier dans les régions à climat tropical humide, à topographie escarpée et à forte densité de population ; ce qui est le cas du Burundi ***(Nsabimana, 1999)***.

- D'après la FAO, nous distinguons généralement deux grands types d'érosion: ***l'érosion normale*** et ***l'érosion accélérée (Sabir, 1986 ; Roose et al., 2010).***

✓ ***L'érosion normale*** ou *géologique* est tout simplement l'altération. Il s'agit d'un *phénomène naturel* qui façonne très lentement la forme des versants tout en permettant le développement d'une couverture pédologique issue de l'altération des roches en place. Elle correspond à *une perte de sol de 0.1 t/ha/an* ***(Roose, 1994)***. Dans ce cas, on dit que les

paysages sont stables car il y aura équilibre entre la vitesse de pédogenèse (processus d'altération des roches, donc de formation des sols) et celle de morphogenèse (processus de changement des formes du relief suite à la dénudation, donc à l'érosion) : l'altération peut compenser l'érosion dans ce cas.

✓ ***L'érosion accélérée,*** considérée comme un *phénomène artificiel*, résulte d'une augmentation (de 10 à 1000 fois) de la vitesse d'érosion naturelle suite à une exploitation imprudente du milieu à travers les activités humaines ***(Roose, 1994)***. Il s'agit, si l'on choisit une densité apparente du sol de 1.2, d'une érosion qui peut aboutir à *une perte en terres de 12 t/ha/an*, soit une perte d'une épaisseur de 1mm par an ***(Roose et al., 2015)***.

De plus, l'érosion accélérée est une ***érosion sélective***. En effet, la couche arable, non seulement s'amincit (par décapage) mais également, s'appauvrit en éléments nutritifs et particules fines du sol (argiles, limons et matières organiques) ; on parle de squelettisation des horizons de surface (enrichissement en sables et graviers) ***(Roose et al., 2010)***.

N.B : De l'érosion accélérée, on définit ***l'érosion tolérable*** comme celle qui cause une perte équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. En fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols, elle correspond à une perte de 1 à 12 t/ha/an ***(Roose, 1994)***.

En tenant compte de l'importance de l'érosion sélective des nutriments qui font la fertilité des sols, on définit l'érosion tolérable comme une érosion qui ne provoquerait pas une baisse sensible de la productivité des terres ***(Roose, 1994)*** et qui maintiendrait la productivité agricole du sol à un niveau satisfaisant ***(Laflen & Moldenhauer, 2003)***, on pense surtout à sa productivité des végétaux : tant que la même quantité de végétaux est maintenue, on tolère la dégradation de ce sol. Selon la FAO, elle est fixée à 12.7 t/ha/an ***(Sindayihebura, 2017)***

I.1.3 Erosion hydrique des sols

L'érosion hydrique des sols est un processus de dégradation du sol par lequel l'eau de pluie détache et emporte les particules du sol vers un lieu de dépôt. Elle agit sur la couche supérieure du sol, la plus fertile. Elle se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre ***(Le Bissonnais et al., 2002)***. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité (capacité d'infiltration) de la surface du sol ou que la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe.

Elle rend de vastes régions vulnérables à la perte de la couche arable fertile du sol. Cette perte de la couche arable, ajoutée à la perte des nutriments associés et de produits chimiques dans les plans d'eau, constitue une grave menace pour la production agricole durable, la protection de l'environnement et la sécurité alimentaire.

I.1.4 Formes d'érosion hydrique

Il existe plusieurs formes d'érosion : érosion ***en nappe***, érosion ***linéaire***, érosion ***par ravinement***, ***mouvements de masse, ... (Ranaivoson, 2017 ; Samake, 2017)***. Tout commence lorsque les précipitations tombent et que les gouttes de pluie arrivent à la surface du sol.

➢ **L'érosion en nappe** (ou aréolaire) (*Sheet erosion*). Elle est observée sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer. Elle est régie par deux processus : le *détachement* des agrégats du sol (=*effet splash*) (**Figure 1A**) et le *transport* des particules. C'est la forme d'érosion la plus répandue dans les champs cultivés, difficile à déceler, et qui entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface ; autrement dit, c'est une forme d'érosion diffuse. Sous son effet, les racines des arbres et des plantes se déchaussent progressivement. Les particules fines et les éléments nutritifs pour les végétaux sont déplacés de l'amont du versant vers l'aval et, le plus souvent, gagnent les fossés et les rivières. Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol (**Figure 1B**).

➢ **L'érosion linéaire** (en griffes ou en rigoles) (*Rill erosion*). Il intervient à la suite du ruissellement et se produit lorsqu'il y a des irrégularités à la surface du sol ; des irrégularités souvent dues aux pratiques culturales. Dans un premier temps, les eaux se concentrent et forment des flaques. Ensuite, ces flaques, en débordant, communiquent entre elles et coulent suivant les lignes de moindre résistance et le ruissellement acquiert une certaine énergie abrasive qui met en mouvement des particules facilement détachables. Suivant l'agrandissement de la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé diffère : linéaments, griffes (ou filets), rigoles (**Figure 1B**). toutes ces lignes, les rigoles y compris, disparaissent généralement après passage d'outils agricoles.

➢ **L'érosion par ravinement** (*Gully erosion*). L'érosion par les ravines est une forme accentuée de l'érosion par rigoles. Au cours du temps, les eaux se concentrent dans les rigoles et les creusent de plus en plus en forme de V si le substratum est tendre ou en forme de U si le substratum est dur (**Figure 1B**). Les ravines ne sont pas effaçables par les procédés agricoles simples mais nécessitent des traitements par des seuils de toutes sortes : en béton, pierres, grillages, gabions,… **(Figure 2A)**. Si elles ne sont pas stabilisées, elles vont évoluer en profondeur et en largeur et se transformer en ravins. Avec les ravins, on n'est plus dans la catégorie des processus mineurs de l'érosion car, lorsque le sol est continuellement raviné, il atteint le stade de dégradation où il ne permet plus l'implantation de la végétation : c'est la désertification ; le substrat lui-même est raviné ; on parle de mauvaises terres ou des "**bad-lands**"***(AIEA, 1984; Hamdi, 2016)*** **(Figure 2B)**.

➢ **Les mouvements de masse**. Ce type d'érosion comprend toutes les formes de déplacement en masse (= de grands volumes de matériaux) des versants sous l'effet de leur poids lié à une perte de cohésion du sol et du substratum. L'évolution de la vitesse de déplacement peut être lente (solifluxion, reptation) ou rapide (glissements, coulées boueuses) **(Figure 2C)**, dépendant à la fois de facteurs géologiques (lithologie, structure, tectonique), topographiques et hydrauliques ***(AIEA, 1984)***. Ces mouvements instantanés de grands volumes de matériaux (glissements, coulées boueuses) peuvent provoquer des dégâts pour les hommes et les infrastructures.

I.1.5 Facteurs de l'érosion hydrique

Les facteurs à l'origine de l'érosion sont de quatre types: (i) *facteurs climatiques* (précipitations, températures et l'humidité), (ii) *facteurs physiographiques du bassin versant*

(inclinaison & longueur de pente, relief, orientation & taille du BV **(*Sabir, 1986*)**, (iii) *facteurs géologiques* (nature physico-chimique des substrats) *et pédologiques (*texture, structure et porosité **(*Asri, 2017*)** ainsi que (iv) *facteurs d'ordre anthropique (*activités humaines et occupation du sol). Les 3 premiers types sont qualifiés de ***facteurs d'ordre naturel*** par opposition aux ***facteurs d'ordre anthropique***. L'action de ces différents facteurs est variable et interdépendante. La combinaison de deux ou plusieurs degrés d'influence élevée de ces facteurs peut rendre les conséquences du processus érosif très graves.

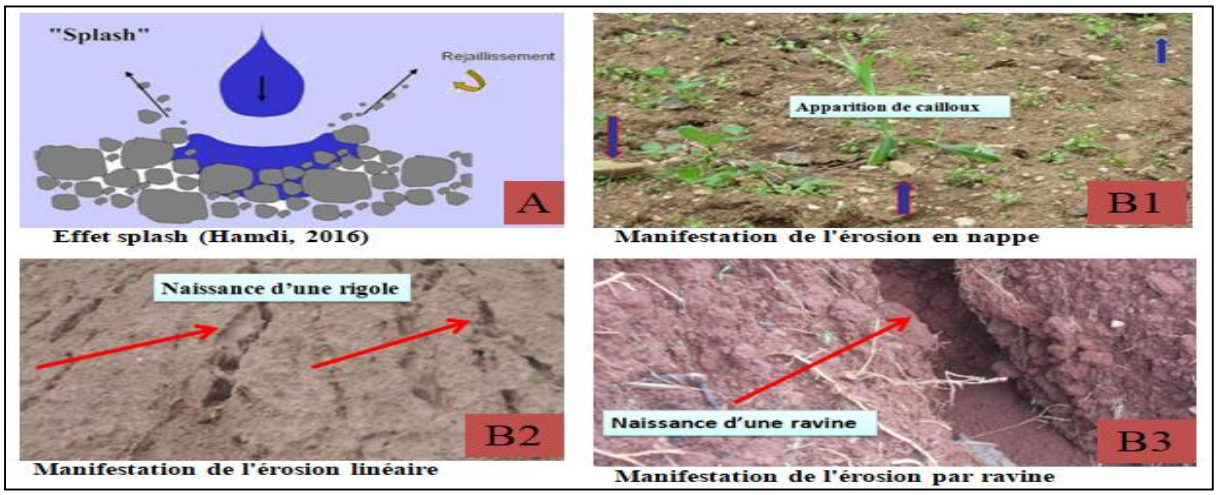


Figure 1: Impact de la goutte de pluie sur le sol (A) et manifestation de l'érosion (B).

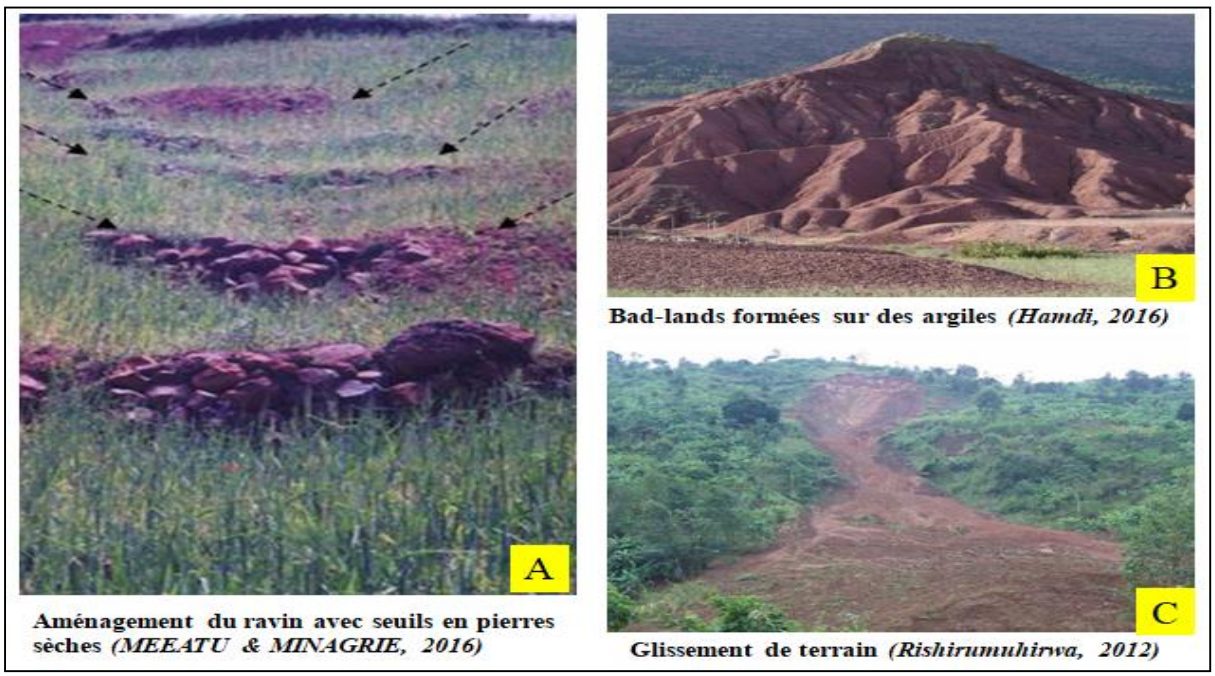


Figure 2: Traitement mécanique des ravins (A), leur évolution en badlands (B) et manifestation des mouvements de masse (C)

I.1.6 Les conséquences de l'érosion

Aujourd'hui, l'érosion des sols participe à de grands problèmes environnementaux qui perturbent la planète. Nous pouvons citer ***(Le Bissonnais et al., 2002 ; Fox, 2008 ; Ranaivoson, 2017)***:

- Les impacts « sur site » et « hors site »
- Les conséquences à court terme et à long terme

I.1.6.1 Les impacts sur site et hors site

Ils font référence respectivement à la zone érodée (en amont) et à la zone de dépôt des sédiments et matières associées (en aval). **Sur site**, on a l'appauvrissement du sol (*perte de sol, de semences, de biodiversité et de fertilité du sol, modification du paysage, etc.*) et **hors site**, nous remarquons tout simplement des nuisances : *recouvrement des routes, turbidité, sédimentation, charge solide en pesticides et autres produits chimiques dans les eaux, etc.* comme c'est résumé sur la **figure 3**.

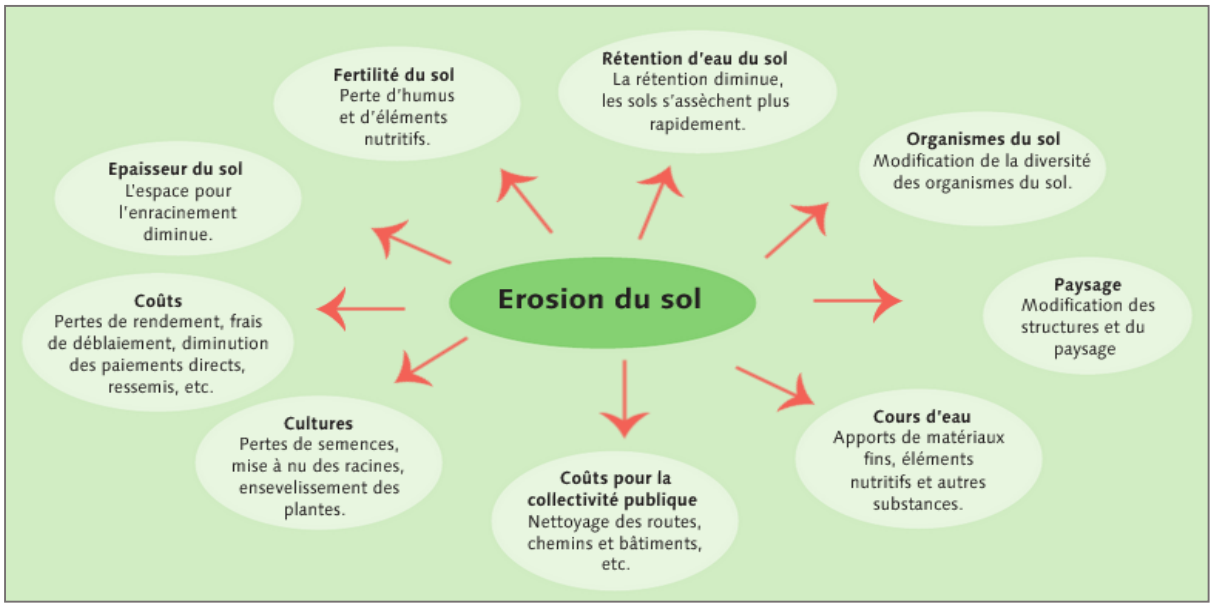


Figure 3: Les conséquences de l'érosion hydrique du sol *(Prasuhn, 2007)*

I.1.6.2 Les conséquences à court terme et à long terme

Nous pouvons considérer que la *perte de semences* sur site, le *recouvrement des fossés et routes* ainsi que *l'ensablement de ports* hors site, sont des conséquences à **court terme**. Ces problèmes posent peu de difficultés techniques et peuvent être résolus par des interventions classiques, des interventions qui, bien sûr, génèrent des coûts mais ne présentent pas de défis particuliers. Les impacts à **long terme** les plus importants sont *la perte de la productivité du sol* à l'échelle de générations humaines (car la formation d'1cm de sol à partir d'un matériau d'origine peut prendre des milliers d'années), la *dégradation du milieu aquatique, etc.*

N.B : La gravité des conséquences de l'érosion est énorme dans le contexte des pays pauvres. Il est vrai que les impacts sur site et hors-site concernent aussi bien les pays pauvres que les pays développés ; toutefois, ***sur site***, la dégradation du sol des **pays pauvres** et la diminution de sa productivité constitue un véritable danger pour leurs habitants alors que dans les **pays développés** elle ne réduit uniquement que les marges de profits (***Fox, 2008***). Par exemple, dans ces pays, la perte de productivité est en partie compensée par des apports d'engrais plus importants et des variétés génétiques plus performantes ; ce qui n'est pas le cas dans tous les pays pauvres.

Egalement, les problèmes ***hors site*** sont plus graves dans les pays pauvres ; par exemple, la *pollution du milieu aquatique par les pesticides* y est d'autant plus néfaste que dans les pays riches ; en effet, de nombreux pesticides toxiques et illégaux (comme DDT), Aldrine,…), retirés du marché dans les pays riches sont encore utilisés dans certains pays pauvres car ils sont moins chers et la législation environnementale y est moins rigoureuse ***(ONU, 2004)***.

I.2 Quantification de l'érosion par le modèle USLE

La quantification annuelle de la perte en terre permet de connaître sa tendance et son évolution et d'y apporter des corrections nécessaires. Elle est d'une importance capitale pour les parties prenantes et les décideurs lors du processus de planification de la conservation ***(Xiong et al., 2019)***. La perte en terre est une masse de sol perdu par une surface donnée pendant une période donnée ; elle s'exprime en unité de masse par unité de surface et par unité de temps (t/ha/an). Deux principaux moyens sont utilisés pour quantifier l'érosion : les études effectuées directement sur le terrain et les analyses faites à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) (***Paul-Hus, 2011***). Dans les deux cas, l'**USLE**, élaborée par Wischmeier et Smith en 1978, reste le modèle mathématique le plus largement utilisé pour prédire les pertes dues à l'érosion hydrique de surface **(*Khali Issa et al., 2016*)**.

L'USLE est un modèle empirique simple basé sur des lois mathématiques appliquées en utilisant des facteurs responsables du phénomène érosion calculés et déterminés à l'aide des observations sur terrain et des analyses aux laboratoires **(*Khali Issa et al., 2016*)**. Il est conçu pour estimer, sur la base de ces facteurs, des taux annuels de pertes en sol sur le long terme dans les zones agricoles. On fait une estimation sur le long terme (± 20 ans en moyenne) afin d'obtenir des valeurs plus ou moins précises car les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques ***(Hamdi, 2016)***.

Cette équation est le résultat de plusieurs années de recherche menées par des équipes de chercheurs dans plusieurs régions des USA depuis les années 1900 en vue de remédier à de sérieux problèmes d'érosion des sols auxquels étaient confrontées certaines zones ***(Laflen & Moldenhauer, 2003)***. Elle est alors largement appliquée sur de nombreux milieux et à toutes les échelles, à cause de sa relative simplicité (*elle requiert le moins de données-sources*) et de sa fiabilité. En outre, couplée à un SIG, elle permet de produire des documents qui serviront d'outils d'aide à la prise de décision pour les aménageurs ***(Printemps, 2007)***.

I.2.1 Les paramètres du modèle classique USLE

Dans l'USLE, le taux des pertes en terre (A) est le résultat du produit des 5 facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique: le climat (R), la nature du sol (K), la topographie (LS), l'occupation du sol (C) et les pratiques antiérosives (P). Il peut être exprimé par l'équation suivante **(Equation 1)**:

A = R.K.LS.C.P **(*Equation 1)***

*Avec **A** : la perte en terre (t/ha.an), **R** : l'érosivité de la pluie (MJ.mm/h.ha.an), **K** : l'érodibilité du sol (t.h/MJ.mm), **L** : la longueur de pente (m), **S** : l'angle de pente (%), **C** : l'occupation du sol (sans unité), **P** : les pratiques antiérosives (sans unité).*

- **Le facteur R – Erosivité pluviale**

La pluie est l'un des principaux facteurs d'érosion du sol. Ainsi, le facteur d'érosivité pluviale R caractérise la capacité potentielle de la pluie de produire de l'érosion. Elle est calculée à partir de l'équation de ***Wischmeier & Smith (1978)*** qui suit **(Equation 2)**:

$$\mathbf{R = E * I_{30}} \quad \text{avec} \quad \mathbf{E = 210 + 89 * \log_{10} I}. \qquad (\textit{Equation 2})$$

Toutefois, la mesure de l'érosivité à partir de cette équation prend beaucoup de temps : en effet, elle est déterminée, non seulement, en faisant, pour de nombreuses années : 22 ans au moins ***(Wischmeier & Smith, 1978 ; Hamdi, 2016)***, la moyenne annuelle du produit de l'*équation 2* tout en excluant les épisodes pluvieux de moins de 12,7 mm en 6 heures **(Equation 3)** car considérés comme n'étant pas agressifs du point de vue de l'érosion ***(Wischmeier & Smith, 1978)***. En plus elle reste difficilement applicable pour des régions où les données pluviométriques sont rarement disponibles ou ne sont pas régulières ***(Sadiki et al., 2004 ; Payet et al., 2012 ; Ranaivoson, 2017)***.

$$\mathbf{R} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[\sum_{k=1}^{m}\left(E_k * I_{30_k}\right)\right]_j \qquad (\textit{Renard \& Freimund, 1994}) \quad (\textit{Equation 3})$$

*Avec **E** (MJ/ha) : l'énergie cinétique totale de la pluie, **I_{30}** (mm/h) : l'intensité maximale des précipitations sur 30 minutes, **k** : un indice de l'épisode pluvieux de chaque année considérée et **m** : le nombre de pluies érosives dans chaque année considérée, **j** : un indice de l'année considérée et **n** : le nombre d'années utilisées pour obtenir R.*

Pour pallier tous ces problèmes, plusieurs chercheurs ont développé (ou utilisé), dans différentes régions du monde, des formules alternatives de calcul du facteur R **(*Payet et al., 2012 ; Ranaivoson, 2017*)** qui ne nécessitent que les précipitations mensuelles et/ou annuelles uniquement (**Tableau 1**). Ces équations de substitution ont été appliquées dans différents travaux impliquant une modélisation USLE et ont montré des résultats satisfaisants.

Tableau 1 : Formules de calcul du facteur d'érosivité R intégrant les précipitations mensuelles et/ou annuelles moyennes.

Formules de calcul de R	Auteur (ou utilisateur)	Lieu d'application
$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5\log_{10}\left(\frac{P_i^2}{P}\right)-0.08188}$	Arnoldus (1977) Dabral et al. (2008) Arhem and Fredén (2014)	Maroc Inde Région de Mara (Tanzanie)
$R = 38.46 + 3.48 * P$	Lo et al. (1985) Karamage et al. (2016a)	Hawaii (USA) BV Nyabarongo (Rwanda)
$\log R = 1.74 * log\sum(P_i^2/P) + 1.29$	Sadiki et al. (2004) Hamdi (2016)	BV Oued Boussouab (Maroc) BV Oued Trouch (Algérie)
$Ram = Pam * 0.05 \pm 0.05$	Roose et al. (2010)	Région méditerranéenne et Maroc
$\log R = 1.93 * log\sum(P_i^2/P) - 1.52$	Gitas et al. (2009)	Préfecture de Chalkidiki (Grèce)
$R = 0.0483 * P^{1.610}$	Payet et al. (2012)	BV Fiherenana (Madagascar)
$Ram = Ham * 0.3$	Roose (1994)	Montagnes de Madagascar, Rwanda, Cameroun et Burundi
$R_m = 0.60 * P_m^{1.49}$ $R_y = 2.74 * P_y^{1.20}$	Rijkee (2016)	Commune Vugizo (Burundi)
$R = 117.6 * 1.00105^{MAR}$	Nijimbere & Riveros Lizana (2019)	Burundi
$R = 0.20 * P * 17.02$ (1) $R = 0.25 * P * 17.02$ (2)	Sindayihebura (2017)	(1) Dépressions du Nord (Burundi) (2) Plateaux centraux (Burundi)

$P = P_{am} = P_y = H_{am}$: Précipitations annuelles moyennes
$P_m = p_i$: Précipitations mensuelles moyennes
$R = R_{am} = R_y$: Erosivité annuelle moyenne
R_m : Erosivité mensuelle moyenne

- **Le facteur K - Erodibilité du sol**

Le facteur d'érodibilité du sol "*K*" traduit sa vulnérabilité à être érodé par la pluie. Théoriquement K peut varier entre 0 et 1, mais ***Duchaufour et Mikokoro (2012)*** précisent que K s'échelonne de 0.7 pour les sols les plus fragiles (limons silteux) à 0.001 pour les sols les plus stables. ***Bolline et Rousseau (1978)*** ainsi que ***Wall et al. (2002)*** ont établi la classification interprétant l'indice de susceptibilité des sols à l'érosion (**Tableau 2**). La sensibilité du sol à l'érosion est énormément influencée par ses propriétés physiques et chimiques intrinsèques à savoir (***Payet et al., 2012 ; Nacishali Nteranya, 2020***): la structure (*assemblage de ses particules*), la texture (*répartition granulométrique de ses constituants : argile, limon et sable*), le contenu en matière organique et la perméabilité. Il est ainsi exprimé par l'équation **(Equation 4)** proposée par ***Wischmeier et Smith (1978)*** qui combine ces quatre paramètres:

$$\mathbf{K = 2.1 * M^{1.14} * 10^{-6} (12 - MO) + 0.0325 * (b - 2) + 0.025 * (c - 3)} \qquad \textbf{(}\textit{Equation 4)}$$

Avec ***M :*** *facteur granulométrique = (% limon + % sable très fin) X (100 − % argile),* ***MO :*** *matière organique (%),* ***b et c*** *: codes respectifs de la structure et de la classe de perméabilité du sol* (**Tableaux 3 & 4**).

Tableau 2 : Classes de susceptibilité des sols à l'érosion hydrique d'après *Wall et al. (2002)* et *Bolline & Rousseau (1978)*

Texture du sol	Sensibilité à l'érosion	Valeur de K
Sable	Très légère	< 0.007
Sable loameux		
Loam sableux grossier	Légère	0.007 – 0.03
Sable fin		
Sable fin loameux		
Loam sableux		
Argile lourde		
Loam sablo-argileux	Modérée	0.03 – 0.04
Argile		
Argile limoneuse		
Loam		
Loam argileux		
Loam limono-argileux	Forte	0.04 – 0.05
Loam sableux très fin		
Loam limoneux		
Sable loameux très fin		
Sable très fin	Très forte	> 0.05

Wall et al. (2002)

Erodibilité K	Sensibilité à l'érosion
< 0.10	Sol très résistant
0.10 – 0.25	Sol assez résistant
0.25 – 0.35	Sol moyennement sensible
0.35 – 0.45	Sol assez sensible
> 0.45	Sol très sensible

Bolline & Rousseau (1978)

Tableau 3: Les codes/classes de structure du sol (*Printemps, 2007 (à gauche)* et *Nill et al., 1996 (à droite)*).

Code	Structure du sol
1	Grains très fins
2	Grains fins
3	Gr. moyens et/ou grossiers
4	Gr. très grossiers (massifs)

Classe de structrure	Structure du sol	Taille moy. (en mm)
1	Particules très fine	<1
2	Particules fine	1 – 2
3	Part. équilibrées ou grossières	2 – 10
4	Part. en blocs, lamellaires ou massives	> 10

Tableau 4 : Les classes de perméabilité et les valeurs de conductivité hydraulique des classes texturales du sol (*Leumbe Leumbe et al., 2012* (à gauche), *Nill et al., 1996* (à droite) et *Wall et al., 2002* (en bas)).

Code	Classe de texture	Perméabilité
1	Argile < 18% et Sable > 65%	Rapide
2	18% < argile < 35% et Sable > 15% ou 15% < Sable < 65% et Argile < 18%	Moyenne à rapide
3	Argile < 35% et Sable >15%	Moyenne Lente à
4	35% < Argile < 60%	moyenne
5	Argile> 60%	Lente

Classes de perméabilité	Perméabilité	Conductivité hydraulique (cm/jr)
1	Rapide	> 300
2	Modérée à rapide	300 – 100
3	Modérée	100 – 40
4	Lente à modérée	40 – 10
5	Lente	10 – 1
6	Très lente	< 1

Classe de texture	Classe de perméabilité	Conductivité hydraulique (x 10^{-5}cm/s)
Argile serrée ou compactée	Très lente	< 4.0
Loams argileux, argiles	Lente	4.0 – 14
Loams, loams limoneux, loams argileux	Modérément lente	14 – 40
Loams sableux fins et loams	Modérément rapide	40 – 140
Sables loameux et loams sableux	Rapide	140 – 400
Graviers, sables grossiers	Très rapide	> 400

Le facteur K peut être déterminé à partir :

- ✓ des données extraites des échantillons de sols ; on applique alors *l'**Equation 4***
- ✓ du nomographe de Wischmeier et Smith **(*Bouderbala et al., 2018)* (Figure 4)**.
- ✓ de la confrontation du triangle de texture de l'USDA (***Brown, 2003***) (**Figure 5**) et du tableau des valeurs d'érodibilité des sols de ***Stone & Hilborn*** (***2000***) (**Tableau 5**) établies à partir de leurs classes texturales (***Payet et al., 2012 ; Hamdi, 2016).***

Cette 3è alternative apporte une approximation dans le calcul du facteur K ; toutefois, elle a pour avantage de se prêter aux contraintes imposées par la zone d'étude **(*Payet et al., 2012*)**.

En général, les paramètres de la formule de K sont obtenus lorsqu'une carte des sols est disponible. Cependant, K peut également dériver de la carte géologique ***(Nill et al., 1996*** ; ***Gitas et al, 2009)***. Dans ce cas, on utilise parallèlement les classes texturales du sol attribuées aux types de matériau géologique parental (**Tableau 6**), procédure basée sur les règles de genèse des sols ***(Buol et al, 2003)*** et le tableau des valeurs de K de ***Stone & Hilborn*** (***2000***).

Tableau 5: Valeurs de K suivant la classe de texture, d'après *Stone & Hilborn, 2000*.

	Teneur en matière organique		
Classe texturale	Moyenne	Moins de 2 %	Plus de 2 %
Argile	0,22	0,24	0,21
Loam argileux	0,30	0,33	0,28
Loam sableux grossier	0,07	–	0,07
Sable fin	0,08	0,09	0,06
Loam sableux fin	0,18	0,22	0,17
Argile lourde	0,17	0,19	0,15
Loam	0,30	0,34	0,26
Sable fin loameux	0,11	0,15	0,09
Sable loameux	0,04	0,05	0,04
Sable très fin loameux	0,39	0,44	0,25
Sable	0,02	0,03	0,01
Terre franche argileuse	0,20	–	0,20
Loam sableux	0,13	0,14	0,12
Loam limoneux	0,38	0,41	0,37
Argile limoneuse	0,26	0,27	0,26
Loam limono-argileux	0,32	0,35	0,30
Sable très fin	0,43	0,46	0,37
Loam sableux très fin	0,35	0,41	0,33

Stone & Hillborn, 2000

Texture de sol	Facteur K (ton.acre.hr/hundreds of acre.ft.tons.in)	Facteur K (t.ha.h/ha.MJ.mm)
Clay	0.22	0.0289
Clay loam	0.30	0.0395
Loamy fine sand	0.11	0.0145
Fine sandy loam	0.18	0.0237
Fine sand	0.08	0.0105
Coarse sandy loam	0.07	0.0092
Loam	0.30	0.0395
Loamy sand	0.04	0.0053
Sandy loam	0.13	0.0171
Organic	0.30	0.0395
Sand	0.02	0.0026
Silty clay loam	0.32	0.0421

Stone &Hillborn, 2000 in Printemps, 2007

Tableau 6: Classes texturales issues du matériau géologique parental *(Buol et al, 2003)*

Matériau parental	Dépôt alluvionnaire	Dépôt tertiaire	Granite	Gneiss	Calcaire	Péridotites	Schistes
Texture du sol	SL – L	SL – L	S – S L	S ou LS ou L	C ou SiC	CL – C	L

* S: Sandy (*sableux/sablonneux)* L: Loam *(loameux)* Si: Silty *(limoneux)* C: Clay *(argileux)*

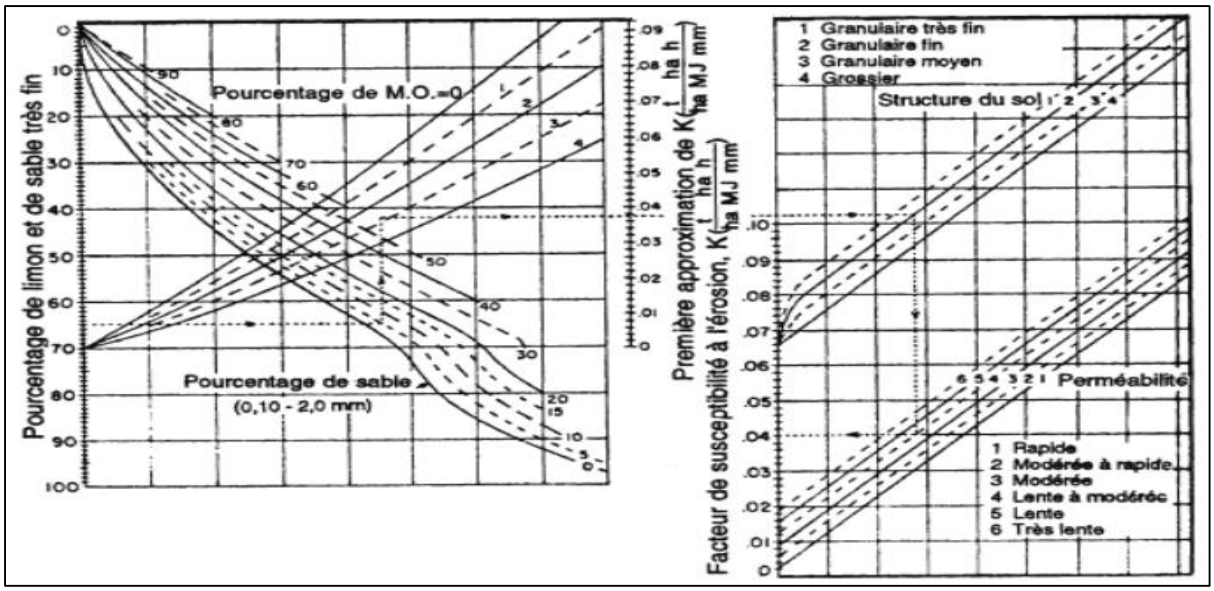


Figure 4: Nomographe pour le calcul de la valeur du facteur K, d'après Wischmeier et Smith, 1978 *(Roose, 1994 ; Morgan, 2005).*

Procédure de lecture du nomographe: En suivant l'analyse des échantillons de surface appropriés, on entre par la gauche dans le graphe, on pointe le % de silt (0,002 à 0,100 mm), ensuite de sables (0,10 à 2 mm), puis de matières organiques, la structure et la perméabilité dans le sens indiqué par les flèches. Interpoler si nécessaire entre les courbes dessinées ***(Roose, 1994)***.

Pour la **figure 4**, nous avons un échantillon ayant: 65% de limon + sable très fin, 5% de sables, 2,8% de matières organiques, 2 de structure et 4 de perméabilité. **K_{USA} = 0.31**. Pour obtenir K en unités SI, on multiplie K_{USA} par 0.1317 ***(Bouderbala et al, 2018)*: K_{SI} = 0.04**

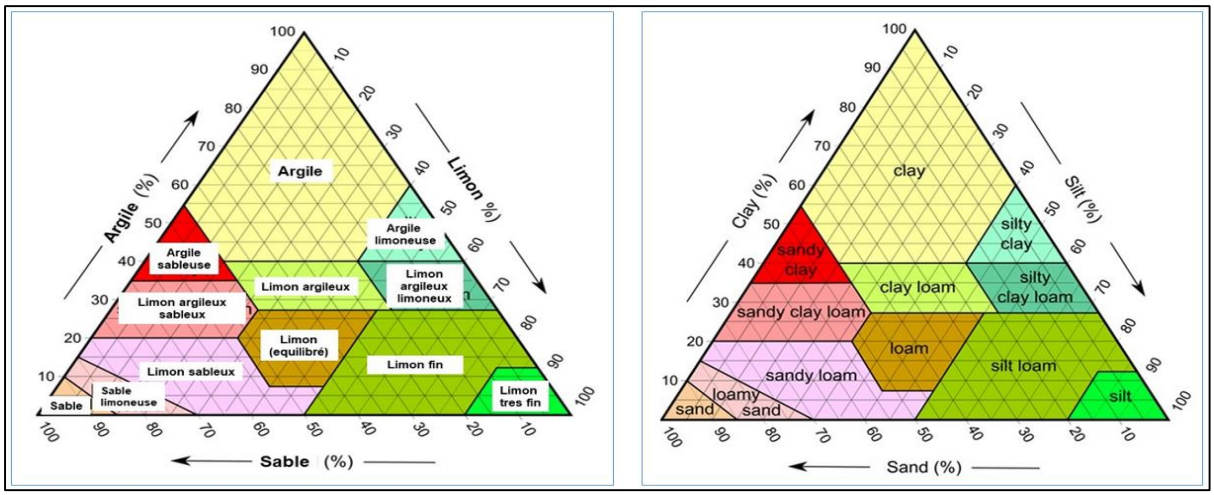


Figure 5: Triangle de texture de sols de l'USDA *(Brown, 2003)*

- Les attributs d'un **loam** (*ou limon équilibré*) sont: 30 % de sable (25 % de sable très fin, 5 % de sable présentant d'autres diamètres), 40 % de limon, 30 % d'argile, 2.8 % de matière organique ; structure grenue fine ; perméabilité lente à modérée ***(Wall et al., 2002)***.

- **Le facteur LS – Topographie**

Le facteur LS est le facteur déterminant du risque d'érosion dans l'USLE, il décrit comment la topographie (inclinaison et longueur de la pente) influence le risque d'érosion ***(Rijkee, 2016 ; Barriuso-Mediavilla et al., 2017)***. En effet, plus la longueur de la parcelle est grande, plus la vitesse augmente et les particules d'eau qui ruissellent emmagasinent ainsi une énergie plus importante qui se traduit par la création et le creusement de rigoles (***Printemps, 2007 ; Ranaivoson, 2017***). De même, les transports solides croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison (le degré) de la pente **(*Payet et al., 2012*; *Århem and Fredén, 2014*)**. Donc, plus la pente est raide et longue, plus élevé est le risque d'érosion (***Stone & Hilborn, 2000***).

Toutefois, le gradient de pentes a une grande influence sur le facteur LS par rapport à sa longueur ***(Nacishali Nteranya, 2020)*** comme on peut le constater au Burundi en comparant les valeurs de LS des plateaux centraux (à plus grande longueur) à celles du Mirwa et de la crête (avec un fort degré de pente) ***(Rishirumuhirwa, 1997)*** **(Tableau 7)**. Le facteur LS varie de 0,1 à 5 dans les situations de pente faible et peut atteindre plus de 21 dans les conditions de fortes pentes des montagnes, comme au Burundi ***(Rishirumuhirwa, 1997 ; Duchaufour & Mikokoro, 2012)*** **(**voir **Tableau 6)**. Afin de définir l'effet de l'érosion en nappe et en rigoles, les facteurs L (en m) et S (en %) sont le plus souvent combinés en un facteur unique LS (sans unité) qui est déterminé à l'aide de l'équation suivante (***Wischmeier et Smith, 1978 ; Stone & Hillborn, 2000***) **(Equation 5)**:

$$\mathbf{LS = (\lambda/22,\ 1)^{m} \times (0{,}065 + 0{,}0456\ s + 0{,}006541\ s^{2})}. \qquad \textbf{(}\textit{Equation 5}\textbf{)}$$

Avec $\boldsymbol{\lambda}$ *= la longueur de pente (m),* $\boldsymbol{\theta}$ *ou* $\boldsymbol{s}$ *= l'inclinaison de la pente (%) et* $\boldsymbol{m}$ *= le facteur établi en fonction de la pente (***Tableau 8***).*

Tableau 7 : Les valeurs du facteur LS dans les régions géomorphologiques du Burundi, selon *Rishirumuhirwa (1997)*

Région géomorphologique	Degré de pente (%)	Longueur de pente (m)	Valeur de LS
Plaine de l'Imbo	< 5	40	< 0.62
		60	< 0.75
		100	< 0.97
Dépressions du Moso et du Bugesera	5 – 10	40	0.62 – 1.58
		60	0.75 – 1.75
		100	0.97 – 2.50
Plateaux Centraux (Kirimiro)	10 – 25	20	1.10 – 4.80
		40	1.58 – 6.80
		60	1.92 – 8.25
Escarpements du Mirwa et la Crête Congo-Nil	10 – 25	20	1.10 – 4.80
		40	1.58 – 6.80
	25 – 50	20	4.80 – 14.50
		40	6.80 – 21.00

Tableau 8: Valeur de m suivant la pente θ (*Wischmeier & Smith, 1978; Payet et al., 2012*)

Pente θ (en %)	< 1	1 – 3.5	3.5 – 5	≥ 5
Facteur m	0.2	0.3	0.4	0.5

N.B : Il existe aussi le nomographe de Wischmeier pour déterminer le facteur LS **(Figure 6).**

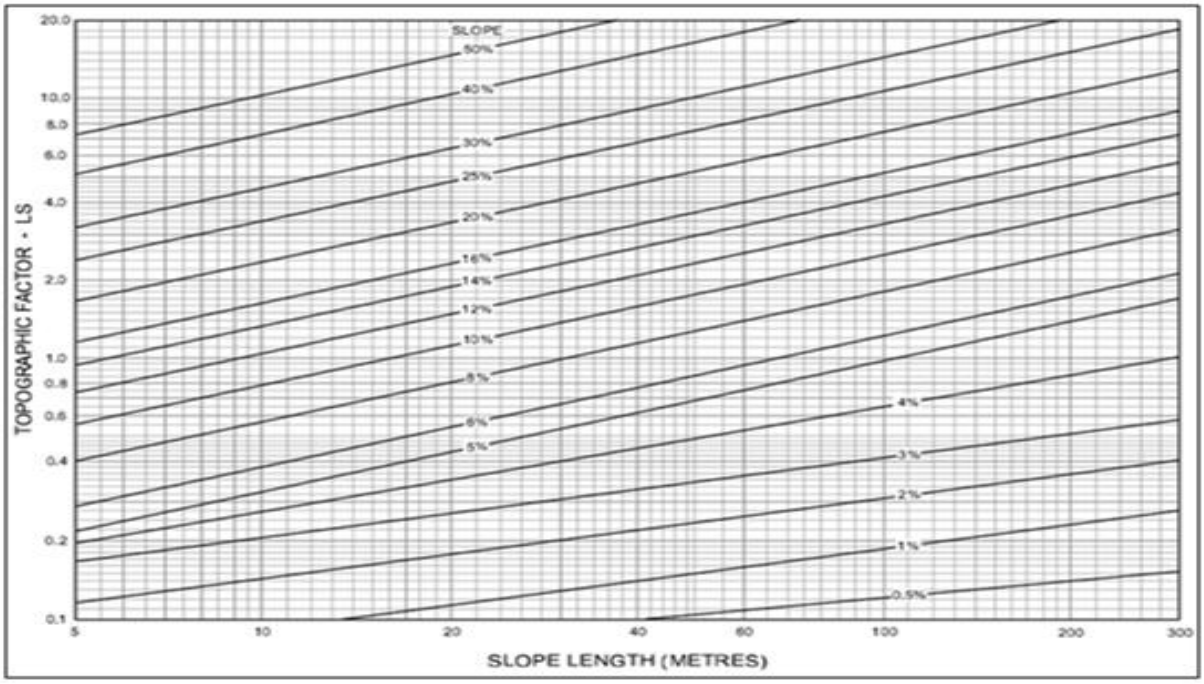


Figure 6: Nomographe de Wischmeier & Smith (1978) pour le calcul du facteur LS *(Roose, 1994 ; Wall et al., 2002).*

Le facteur C - Occupation du sol

Le facteur C traduit la capacité d'une culture à protéger un sol donné contre l'érosion ; une capacité liée à l'action du feuillage, des litières et des résidus des végétaux sur l'interception et la dissipation de l'énergie cinétique des gouttes de pluies, réduisant ainsi leur énergie d'impact sur les agrégats du sol (***Rishirumuhirwa, 1997***). Il est peut-être le facteur le plus important de l'USLE car il représente les conditions qui peuvent être gérées le plus facilement par l'homme pour réduire l'érosion **(*Renard et al., 1991*)**. Il prend en compte l'occupation du sol : couvert végétal, aménagements et pratiques agricoles. Le facteur C varie de 1 sur sol nu à : 1 à 9/10 sous cultures sarclées, 1/100 sous prairies et plantes de couverture, 1/1000 sous forêt, etc. ***(MAEP, 2004 ; Payet et al., 2012)***. Il peut être calculé à l'aide du nomographe proposé par ***Roose (1994)*** **(Figure 7)** ou estimé à partir des valeurs connues pour certains types de végétation ou de pratique culturale **(Tableau 9)**.

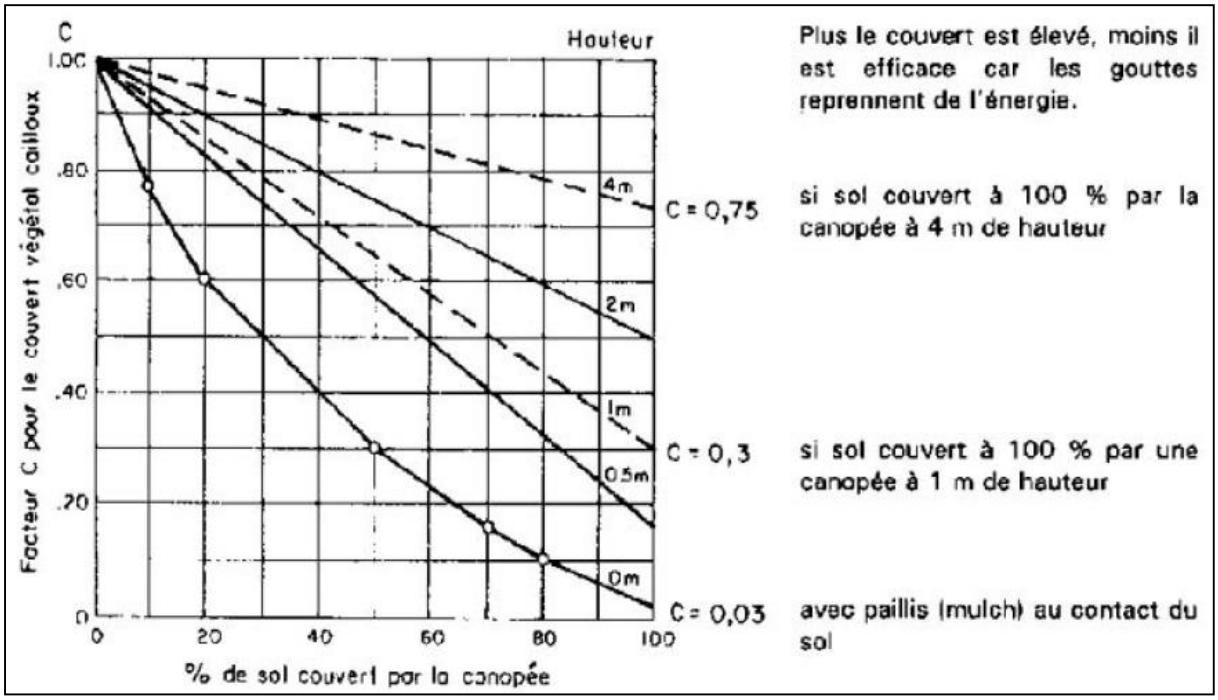


Figure 7: Nomographe de calcul du facteur C en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation *(Roose, 1994)*

Tableau 9: Valeurs du facteur C pour différents types d'occupation du sol (A, B, C) et méthodes de culture (D)

A

Type d'occupation du sol	Facteur C
Sol nu	1.0
Savane herbeuse dégradée	0.6
Mosaïque de cultures	0.5
Savane arborée et arbustive	0.3
Surface bâtie	0.2
Zone reboisée	0.18
Rizière	0.15
Forêt dense	0.001
Plan d'eau	0.0

Facteur C selon MAEP (2004)

B

Type de couvert végétal	Facteur C
Sol nu	1
Maïs/sorgho	0.4-0.9
Arachide	0.4-0.8
Manioc/igname	0.2-0.8
Savane/prairie brulée/sur-pâturée	0.1
Bananeraie (Azaguié)	0.05
Savane/prairie en bon état	0.01
Forêt dense ou paillis abondant	0.001

Facteur C selon Roose (1977)

C

Type de végétation	Facteur C
Sol nu	1.0
Association haricot-maïs	0.62
patate douce traditionnelle	0.53
Manioc traditionnel	0.10 - 0.16
Bananeraie	0.07 - 0.14
culture paillée/pinède	0.001

Facteur C d'après Rishirumuhirwa (2005)

D

Méthodes de travail du sol	Facteur C
Labour d'automne	1.0
Labour de printemps	0.90
Déchaumage	0.60
Travail du sol sur billon	0.35
Travail du sol en bandes	0.25
Semis direct	0.25

Facteur C selon Renard et al. (1991)

- **Le facteur P - pratiques antiérosives**

Le facteur P exprime l'influence des pratiques de conservation de l'eau et du sol sur la réduction de l'érosion ***(Stone & Hilborn, 2000 ; Hamdi, 2016)*** c-à-d toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement ou retenir une certaine proportion de terre ***(Sabir, 1986)*** en créant une rugosité du champ (***Rishirumuhirwa, 1997***). Les trois

pratiques prises en compte par ***Wischmeier & Smith (1978) (Laflen & Moldenhauer, 2003)*** et les plus connues ***(Xiong et al., 2019 ; Kolli et al., 2021)*** étaient ***le labour et la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternées*** ainsi que ***les terrasses***. Les autres techniques qui consistent à corriger la pente ou à protéger le sol contre le splashs sont en effet comptabilisées dans les facteurs C ou LS (***Rishirumuhirwa, 1997***), on peut citer : la pose de bandes enherbées entre deux zones de culture, le paillage naturel ou artificiel, la pose de plantes de couverture, le buttage ou le billonnage en courbe de niveau, les reboisements, etc. ***(Printemps, 2007***; ***Payet et al., 2012).***

Les valeurs de P varient en fonction de l'aménagement effectué sur la pente et de la valeur (inclinaison et longueur) de la pente elle-même ***(Sabir, 1986 ; Hamdi, 2016)*** mais, elles sont toujours comprises entre 0 et 1 ***(Wall et al., 2002)*** (**Tableau 10)**. P est égal à l'unité pour un sol nu cultivé dans le sens de la pente ou sur lequel aucune des pratiques antiérosives n'est utilisée ***(Printemps, 2007 ; Nijimbere & Riveros-Lizana, 2019)***.

N.B : De tous les facteurs USLE, P est souvent considéré comme le facteur le plus difficile à déterminer ***(Xiong et al., 2019)*** et dont valeurs sont les moins fiables en raison (i) de l'absence de données expérimentales reflétant les nombreuses combinaisons de conditions rencontrées ***(Renard & Ferreira, 1993)***, (ii) de la sensibilité de l'érosivité des pluies aux changements dans les pratiques antiérosives ***(Århem and Fredén, 2014)*** et (iii) de la nécessité des observations directes sur la parcelle pour son estimation; et donc, du temps et de l'argent ***(Pham et al., 2018)***. Cette limitation du facteur P restreint particulièrement l'applicabilité des modèles basés sur l'USLE à grande échelle ***(Xiong et al., 2019).***

Tableau 10 : Valeurs du facteur P suivant la pente et certains aménagements effectués.

PAE	Pente		Facteur P
	Inclin. (%)	long. (m)	
CCN	1 – 8	61 – 122	0.5
CCN	9 – 12	36	0.6
CCN	13 – 16	24	0.7
CCN	17 – 20	18	0.8
CCN	21 – 25	15	0.9
CCN-BE	1 – 8	30 – 40	0.25 – 0.5
CCN-BE	9 – 16	24	0.3 – 0.6
CCN-BE	17 – 25	15	0.4 – 0.9
Wischmeier & Smith (1978)			

Pente (%)	LCN	CB	CT
0.0 - 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 – 1 1.3	0.60	0.30	0.12
11.3 – 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 – 26.8	0.90	0.45	0.18
> 26.8	1.00	0.50	0.20
Parveen & Kumar (2012)			

Pratiques de conservation	Facteur P
Culture dans le sens de la pente	1.0
Culture en contre-pente	0.75
Culture en courbes de niveau	0.50
Culture en bandes à contre-pente	0.37
CB suivant la courbe de niveau	0.25
Stone & Hilborn (2000)	

PAE : Type de pratique antiérosive
CCN : Culture en courbes de niveau
CCN-BE : CCN avec bandes enherbées
LCN : Labour suivant la courbe de niveau
CB : Culture en bandes
CT : Culture en terrasses

- **Le taux d'érosion A - quantité de pertes de sol**

Le taux d'érosion est exprimé par la combinaison des facteurs de l'USLE. On distingue l'**érosion potentielle E_p** et l'**érosion réelle A.** L'érosion potentielle **E_p** désigne le pouvoir d'un sol de produire des pertes de sol sous l'effet de la dégradation due aux gouttelettes de pluies, dans son environnement morphologique. Elle est exprimée par E_p = R.K.LS

(Sindayihebura, 2017). Lorsqu'on introduit les indices C et P, on parle alors d'érosion réelle : A = R.K.LS.C.P. Avec l'érosion potentielle, l'on considère donc que les facteurs C et P sont égaux chacun à 1 (leur valeur maximale) ; en d'autres termes, on est en présence d'une parcelle expérimentale de Wischmeier. Comme les facteurs C et P sont d'ordre anthropique, E_p exprime un scénario de non intervention humaine et peut par conséquent être utilisée pour plaider en faveur d'un aménagement et une gestion durable des terres ***(Sindayihebura, 2017)***.

Rishirumuhirwa (1997) et ***Kim et al. (2005)*** répartissent les risques à l'érosion en plusieurs classes **(Tableau 11)** alors que la FAO ne se soucie que du seuil de tolérance (12.7 t/ha/an).

Tableau 11: Classes de risques érosifs selon *Rishirumuhirwa (1997)* et *Kim et al. (2005)*

Classe d'érosion	Rishirumuhirwa, 1997 (Burundi)	Kim et al, 2005 (Amérique centrale)
Faible	A < 50 (t/ha/an)	- (t/ha/an)
Moyenne	50 < A < 100	0 < A < 100
Elevée	100 < A < 200	100 < A < 300
Très élevée	200 < A < 400	-
Extrême	A > 400	A > 300

I.2.2 Usage des SIG et télédétection pour la quantification des pertes en terre.

Pour évaluer la répartition spatiale du risque d'érosion sur un BV, le traitement des divers paramètres par ***la méthode classique USLE*** est long et souvent peu précis. Par exemple, les valeurs des pertes en terre obtenues sur deux petits bassins versants de 4 et 7,5 ha dans la région du Mirwa étaient infiniment inférieures à celles observées à l'échelle d'un champ expérimental de 100m^2 (***Duchaufour et al., 1991*** ; ***Bizimana & Duchaufour, 1992)***. Par contre, l'usage d'outils modernes tels que la télédétection et les systèmes d'information géographique **(SIG**) permet d'améliorer la rapidité et la précision dans le calcul des pertes de sol. Ces outils modernes sont souvent les seuls moyens permettant la connaissance des terrains interdits à l'observation, dont l'accès est difficile ou carrément inaccessibles ***(El Hage Hassan, 2011)***. En effet, à l'aide des SIG, de multiples méthodes ont été développées à travers le monde pour décrire le milieu et pour étudier le phénomène de l'érosion. Ces méthodes, souvent basées sur l'analyse d'images satellites et des photographies aériennes, permettent de mieux comprendre et évaluer cette problématique environnementale.

- Par la **méthode classique USLE** on entend le recours à "***la parcelle expérimentale"*** ou "***parcelle unitaire de Wischmeier"***. Il s'agit d'une parcelle de 6 pieds de large sur 72,6 de long *(1pied = 0.3048m* ***(Rishirumuhirwa, 1997))*** avec une inclinaison standard de 9 %, maintenue dans un état de jachère continue et régulière (c-à-d labourée et ayant été maintenue nue plus de 2 ans) avec un travail du sol de haut en bas ***(Laflen & Moldenhauer, 2003)*** (**Figure 8**). Elle est utilisée comme condition de base à laquelle toutes les autres pratiques topographiques, de culture & de gestion et de conservation ont été reliées. Les données recueillies sur des parcelles ayant des pentes et des longueurs différentes ont pu être ajustées à la pente et à la longueur de la parcelle unitaire, puis comparées d'un endroit à l'autre pour établir des valeurs factorielles plus fiables ***(Laflen & Moldenhauer, 2003)***.

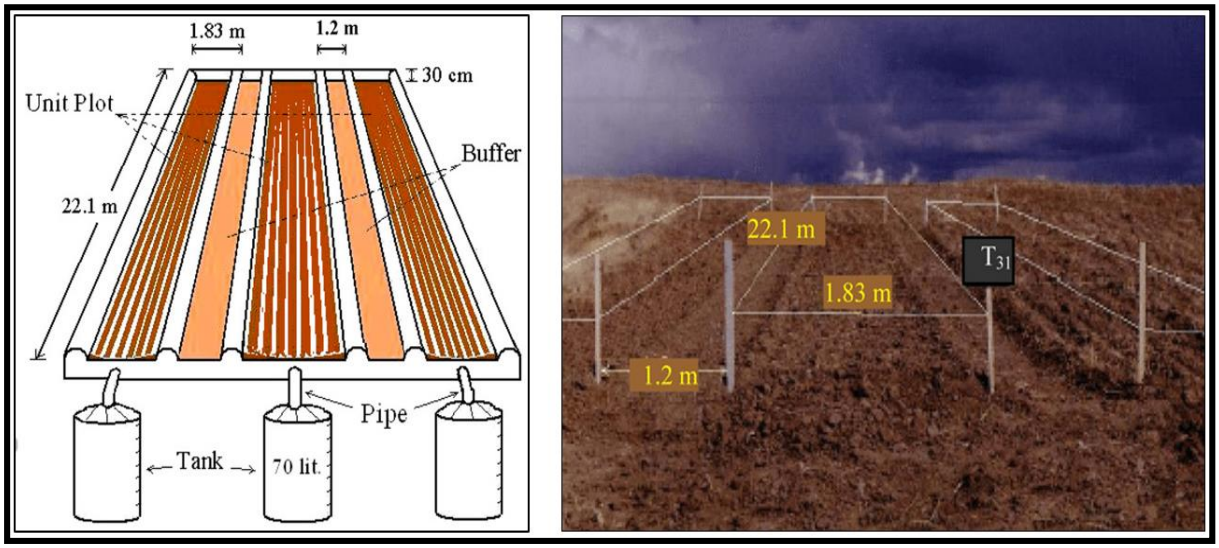


Figure 8: Parcelle expérimentale de Wischmeir ***(Vaezi et al., 2008)***

Les **SIG** permettent de saisir, gérer, analyser des données de référence spatiale et d'en faire une présentation sur des cartes plus ou moins réalistes de l'environnement spatial ***(El Hage Hassan, 2011)***. Comparativement aux études exécutées sur le terrain, les SIG offrent l'opportunité d'évaluer des problématiques sur de grandes superficies à moindre coût grâce à l'utilisation des images satellites et des photographies aériennes ***(Paul-Hus, 2011)***. La **télédétection** quant à elle se rapporte à l'ensemble des techniques liées à l'acquisition, l'analyse, l'exploitation et l'utilisation des données d'observation des ressources terrestres et environnementales obtenues sans contact direct mais par des satellites ou photographie aérienne (***Delenne, 2006***). Son objectif principal est de cartographier les ressources terrestres et d'en effectuer le suivi au cours du temps. Par rapport aux techniques de levée classiques, la télédétection est précise et rentable et permet d'obtenir des données en temps utile (https://www.fao.org/3/y3642f/y3642f.pdf), sur de grandes étendues et surtout pour les terrains dont l'accès est difficile ***(Ranaivoson, 2017)***.

Ainsi, pour quantifier l'ampleur du phénomène d'érosion, les différents paramètres de l'USLE sont intégrés dans un SIG. Ce modèle de cartographie du risque d'érosion hydrique est donc basé sur l'intégration des images satellites ainsi que des données cartographiques dans un SIG qui va ensuite permettre de croiser les cartes thématiques des facteurs de l'USLE, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur leurs valeurs numériques qui y sont rangées ***(Sadiki et al., 2004)***. Ce processus aboutit à la production d'une carte de l'estimation de l'érosion du BV à partir de laquelle, il va ressortir des zones sensibles, à haut risque d'érosion ainsi que celles dont l'intervention est urgente ***(Boughalem et al, 2012 ; Koussa & Bouziane, 2019)***. Ces techniques offrent alors des documents qui serviront d'outils d'aide à la prise de décision pour les aménageurs ***(Printemps, 2007)***.

L'utilisation d'ordinateurs pour la prédiction de l'érosion a ainsi conduit à améliorer le modèle USLE et la mise à jour a été si importante que le résultat a finalement été nommée "RUSLE" : ***Revised Universal Soil Loss Equation (Renard et al., 1991)***. RUSLE est donc une version informatisée de l'USLE (***Renard & Ferreira, 1993***). Elle utilise la fameuse équation USLE, mais les équations utilisées pour produire les facteurs diffèrent de manière significative ***(Renard & Ferreira, 1993)***. En raison de la complexité des équations utilisées pour quantifier ces facteurs, la RUSLE a été informatisée pour faciliter les calculs ***(Renard & Ferreira, 1993)***.

Les principaux changements par rapport à l'USLE concernent notamment: l'informatisation des algorithmes pour faciliter les calculs, la capacité de calculer les produits LS pour des pentes de formes variées, les meilleurs calculs des facteurs de pente reflétant les rapports entre l'érosion en rigoles ou entre rigoles, le développement d'un terme d'érodibilité du sol variable selon les saisons, etc. ***(Renard et al., 1991 ; Ranaivoson, 2017)***. Par exemple, plusieurs chercheurs ont adopté le calcul de C par les techniques de télédétection comme la classification d'images satellites et les indices de végétation ***(Ranaivoson, 2017)***. Ainsi l'indice de végétation **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*), le plus performant pour la description du comportement spectral de la couverture végétale depuis les origines de la télédétection ***(Assemian et al., 2020)***, est le plus utilisé parce qu'il existe une corrélation entre le NDVI et le facteur C du modèle RUSLE ***(Ranaivoson, 2017)*** **(Equation 6 & Figure 9)**.

$$C = \frac{-NDVI+1}{2}$$ ***Durigon et al. (2014)*** ou ***(Equation 6.1)***

$$C = \exp\left(-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right)$$ ***Van Der Knijff et al. (1999)*** ***(Equation 6.2)***

Cependant, la RUSLE ne résout pas tous les problèmes de l'érosion puisqu'il ne tient uniquement compte que de la perte de sol par érosion en nappe et en rigoles et ignore les effets de l'érosion en ravinement et des mouvement de masse ***(El Hage Hassan, 2011 ; Khali Issa et al., 2016)*** et les processus d'érosion comme le détachement, le transport et le dépôt ***(Ranaivoson, 2017)***.

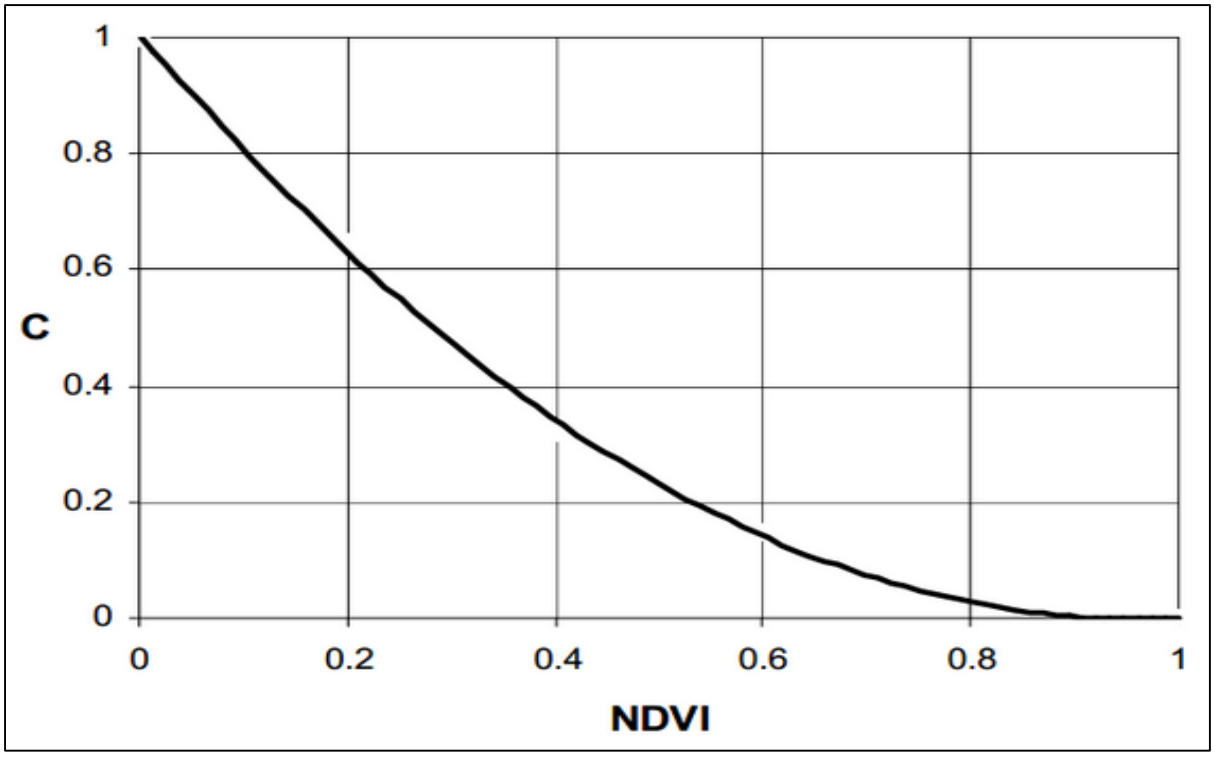


Figure 9: Relation (hypothétique) entre NDVI et le facteur C *(Gitas et al., 2009).*

CHAPITRE II: DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 Cadre géographique du bassin versant de la rivière Ntahangwa

II.1.1 Présentation.

Le BV Ntahangwa est un sous-BV du lac Tanganyika ; il couvre un périmètre (P) de ± 85,5 Km et une superficie (A) comprise entre 110 et 120 Km² (± 117.9 Km^2 selon ***Kagaye (2015)*** et ***Nibigira (2018)*** et ± 111.5 Km^2 pour nous). Situé à l'Ouest de la Crête Congo-Nil, avec une grande partie dans la région naturelle du Mirwa, il est drainé par la rivière Ntahangwa et partage ses frontières avec les BV Muha et Kanyosha au Sud, les BV Nyabagere et Gikoma au Nord, la crête Congo-Nil à l'Est et le lac Tanganyika à l'Ouest. Il s'étend sur les communes d'Isale, Kanyosha, Nyabiraba et Mugongomanga de la province de Bujumbura et en petite portion, sur les zones Gihosha, Ngagara (commune Ntahangwa), Rohero, Nyakabiga, Bwiza et Buyenzi (commune Mukaza) de la Mairie de Bujumbura **(Figure 10)**.

II.1.2 Hydrographie

Le BV Ntahangwa connait une rivière principale : la Ntahangwa, qui draine l'escarpement du Mirwa, depuis la crête, traverse la ville de Bujumbura et se jette dans le lac Tanganyika. Elle est alimentée par un grand nombre de petits cours d'eau formant un réseau hydrographique dendritique très dense (**Figure 10)** à caractère torrentiel, avec des vallées profondes à versants raides. La dynamique de la Ntahangwa dans la plaine dépend de sa dynamique dans les montagnes : la région du Mirwa, suite à une intense pression agricole génératrice d'une forte érosion accentuée par de fortes pentes. La forme allongée de ce BV (coefficient de compacité de Gravelius, $K = \frac{P}{\sqrt{\pi.A}} = 2.27$, donc supérieur à 1, indique que la collection des eaux du BV vers l'exutoire est rapide, ce qui contribue énormément à cette dynamique.

II.1.3 Géomorphologie

Le BV Ntahangwa, dont l'altitude est comprise entre 775 m (niveau du lac) (***Nijimbere & Riveros Lizana, 2019)*** et un peu plus de 2500 m environ, se situe sur 3 régions éco-climatiques ou ensembles morphologiques et climatiques dont les principales caractéristiques géomorphologiques sont données ci-bas **(Figure 11 & 12)**:

- ✓ ***Les basses terres de l'Imbo*** qui correspondent à une série de petites plaines de largeur variable et d'altitude comprise entre le niveau du lac Tanganyika et 1000 m (début des escarpements des Mirwa) avec une faible pente (en moyenne 12 % ***(MINATET, 2005)***).

- ✓ ***Les contreforts des Mirwa*** constituant un paysage très accidenté, formé de hautes collines à sommets étroits et à versants fortement disséqués à pente très forte variant de 70 % à plus de 100 %, entrecoupés par de profondes vallées en forme de V et traversées par de nombreuses rivières à régime torrentiel dévalant les sommets vers la plaine. Ils ont une altitude variant de 1000 à environ 2000m, au contact avec la Crête Congo-Nil.

- ✓ ***La crête Congo-Nil*** qui est un horst relié au graben par le versant abrupt, "le Mirwa". Le relief est très marqué au Nord par des crêtes montagneuses à pentes raides (supérieures à 50 % en moyenne) et au Sud par des hauts plateaux ***(MINATET, 2005)***. La partie du BV Ntahangwa étendue sur la crête se situe entre 2000 et 2500 m d'altitude ***(Ndikubwayo, 2019)***.

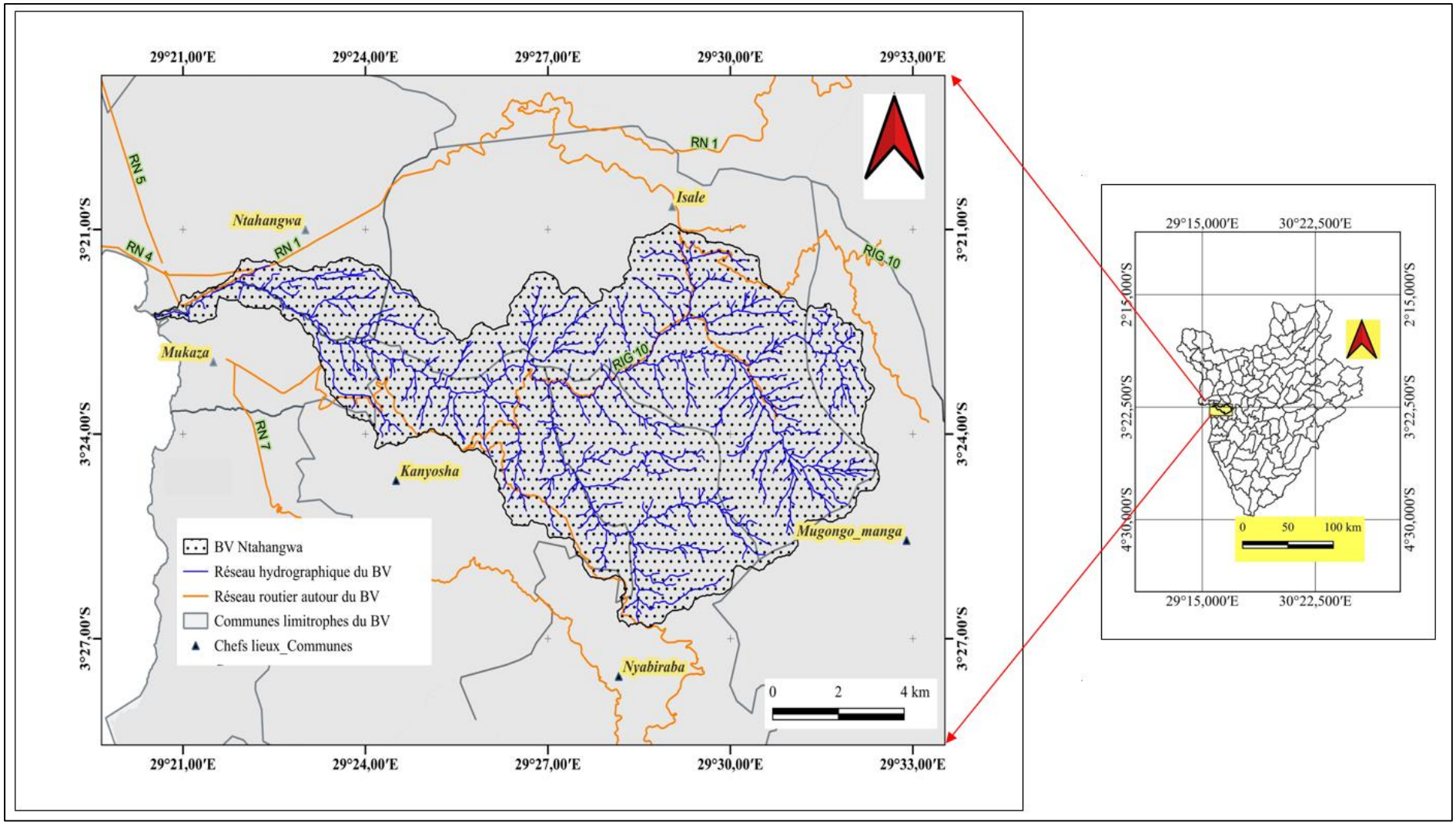


Figure 10: Localisation administrative ét réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Ntahangwa

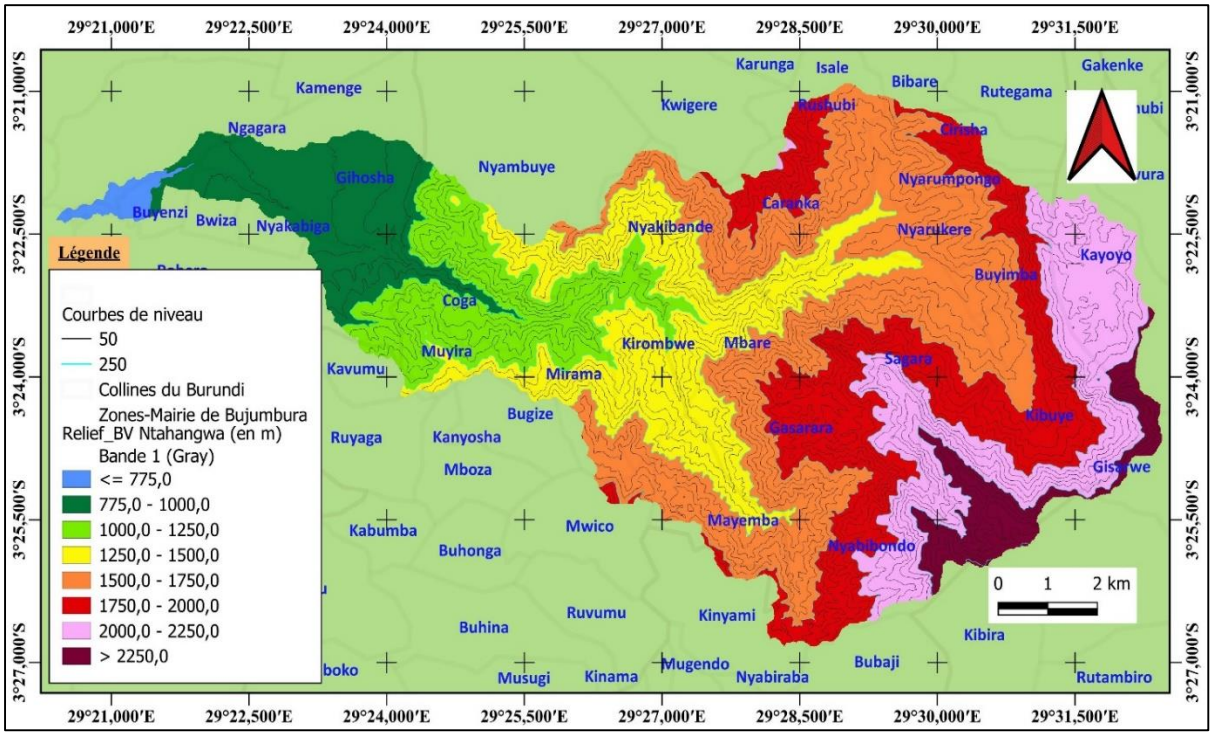


Figure 11: Carte de relief du BV Ntahangwa (extraite du MNT 10 m de résolution)

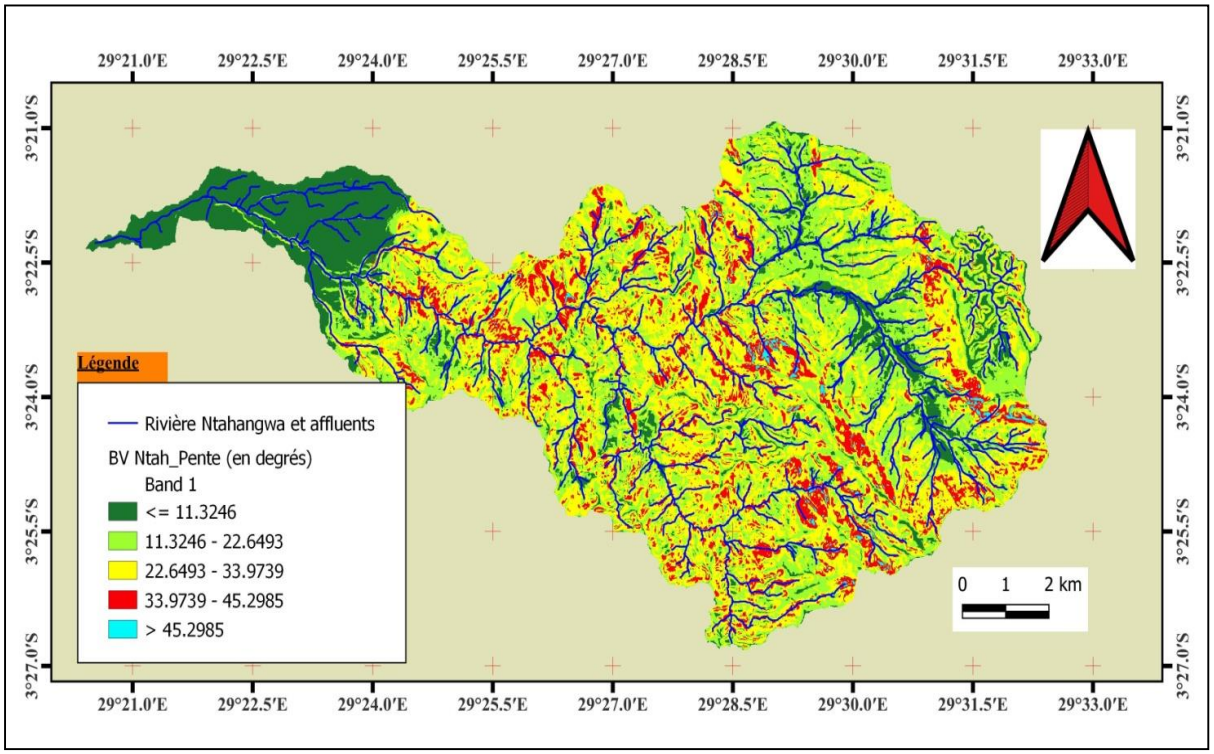


Figure 12: Carte des pentes du BV Ntahangwa (extraite du MNT 10 m de résolution)

II.1.4 Climat

Les caractéristiques climatiques du BV Ntahangwa, suivant les 3 zones éco-climatiques sont décrites ci-bas ***(MINATET, 2005 ; Mve & Becker, 2020)*** et résumées dans le **tableau 12**:

- ✓ ***Les terres basses de l'Imbo*** connaissent un climat tropical chaud (23°C de température moyenne), une faible pluviosité (800 – 1100 mm/an) et une saison sèche de 5 à 6 mois.

- ✓ ***Les scarpements du Mirwa*** avec des précipitations annuelles comprises entre 1100 et 1900 mm et les températures variant entre 23°C et 17°C en fonction de l'altitude.

- ✓ ***La crête Congo-Nil*** est caractérisée par un climat de montagne à tendance équatoriale avec des températures moyennes annuelles de 12 à 16°C et des précipitations annuelles comprises entre 1300 et 2000 mm. La saison sèche s'étale sur trois mois : de juin à août.

Tableau 12: Répartition de la pluviométrie et de la température des 3 zones éco-climatiques du BV Ntahangwa *(MINATET, 2005)*

Régions éco-climatiques	Altitude (en m)	Température (en °C)	Pluie annuelle moyenne (en mm)
Plaine de l'Imbo	800 – 1100	> 23	800 – 1100
Escarpement du Mirwa	1000 – 1700	17 – 23	1100 – 1900
Crête Congo-Nil	1700 – 2500	12 – 16	1300 – 2000

II.1.5 Occupation du sol

Jadis, le BV Ntahangwa était occupé par une végétation naturelle forestière en prolongement des forêts de montagne caractéristiques des zones de hautes altitudes de la crête Congo-Nil ***(Rishirumuhirwa, 2012)***. Mais avec le temps, on remarque la régression de cette végétation pour laisser place à des zones de cultures. C'est le résultat du peuplement de cette région car elle possédait des sols de bonne fertilité. En effet, une forte densité de la population (surtout rurale) a pour conséquences : le défrichement des forêts et savanes naturelles pour des besoins agricoles, la disparition de la jachère, le surpâturage, les feux de brousses, etc... Sur une bonne partie, le BV Ntahangwa est dominé par des habitations, des cultures vivrières dispersées entre ces habitations et quelques plantations d'eucalyptus sur les sommets quartzitiques (**Figure 13**). Les cultures vivrières dominantes : le bananier, le manioc, la patate douce, le haricot, le palmier à huile,…. Ces cultures sont très menacées par l'érosion.



Figure 13: Aperçu de l'occupation du sol du bassin versant de la Ntahangwa.

II.2 Cadre géologique du bassin versant de la rivière Ntahangwa

II.2.1 Lithologie

La lithologie de notre bassin versant est constituée de roches marquées parfois par une puissante altération tandis que les plaines de l'Imbo sont tapissées par des formations meubles du Quaternaire dont l'incision est facile. La nature des roches du Mirwa, classées généralement dans la catégorie des roches tendres en milieu tropical chaud et humide, favorise la généralisation des mouvements de terrain, comme les glissements de terrain, les éboulements, les effondrements, les affaissements, etc. (***Sabushimike, 2015***). Sur la Carte géologique du Burundi, à l'échelle de 1/100 000, nous observons que le BV Ntahangwa s'étend sur les Feuilles Bujumbura et Gitega et comprend 5 types de lithologies : les gneiss (Complexe de Mugere : Mg), les quartzites (Complexe de Buhonga : Bg), les phyllites (Formation de Ngozi : Ng), le granite et les dépôts fluvio-lacustres d'âge récent (**Figure 14)**. Lors de ses recherches, ***Kagaye* (*2015*)**, sur base des données récoltées sur terrain en rapport avec la lithologie dominante, a essayé de faire une mise à jour de la carte des lithologies de notre BV Ntahangwa (**Figure 15)**.

II.2.1.1 Les quartzites

Les quartzites de ce BV occupent une grande étendue de notre zone et affleurent surtout sur les zones de haute altitude (Manga : 2500m, Caranka : 1700m) et ont une granulométrie fine à moyenne (***Kagaye, 2015***). Cette lithologie présente également de nombreux effets de la tectonique dont les fractures et diaclases qui facilitent l'altération car favorisant l'entrée d'eau à l'intérieur des roches.

II.2.1.2 Les dépôts sédimentaires

Cette lithologie affleure dans les quartiers de la Mairie de Bujumbura. Elle est composée de produits d'altération des lithologies des collines surplombant la plaine ***(Kagaye, 2015***).

II.2.1.3 Les gneiss granitiques

Les gneiss granitiques du BV Ntahangwa affleurent sur la zone des contreforts constituant la transition entre les hautes collines et la plaine ; sur les collines comme Muyira, Sororezo, etc. (***Burengengwa, 1993 ; Kagaye, 2015***). Ils ont une foliation prononcée, soulignée par de concentrations de biotite et sont fortement fracturés et altérés. L'épaisseur d'altération atteint plusieurs mètres. Les argiles qui résultent de cette altération contribuent à diminuer fortement la perméabilité du sol par le colmatage des joints, avec pour conséquence l'érosion et les glissements de terrain (***Burengengwa, 1993*)**. Ils sont minéralogiquement composés de quartz, feldspaths, biotite, minéraux opaques, etc.

II.2.1.4 Le granite

Le granite du BV Ntahangwa n'affleure pas en continue, on le rencontre sur les collines Nyakibande et Kirombwe, puis sur la colline Kayoyo (à l'extrême-Est du BV) et enfin, à l'extrême-Sud, sur la colline Kinyami. C'est un granite folié, constitué de quartz, feldspaths, biotite et muscovite ; la muscovite domine la biotite dans certains faciès (***Kagaye, 2015***). La foliation est intense, d'où une altération très poussée.

II.2.1.5 Les phyllites

Sur le BV Ntahangwa, les bons affleurements de phyllites s'observent principalement sur les collines Rushubi, Isale et Kibuye (***Kagaye, 2015***). Ils sont composés de quartz, beaucoup de biotite et muscovite, d'hydroxydes de fer et quelques minéraux opaques (***Burengengwa, 1993 ; Kagaye, 2015***). Ils sont très altérés et favorisent un couvert végétal important, surtout sur la colline Kibuye (***Nshimirimana, 2015***).

NB : Les ***pegmatites*** et des ***roches basiques*** affleurent également dans notre zone d'étude.
Des pointements de roches basiques (gabbros et/ou dolérites qui sont parfois métamorphisés : amphibolites, métadolérites, …) sont présents dans presque toutes les lithologies de notre zone d'étude, sauf les dépôts sédimentaires de la plaine (***Nshimirimana, 2015***). Les pegmatites quant à eux, sous forme de filons de plusieurs mètres d'épaisseur et fracturés sont fréquents dans les gneiss granitiques et parfois dans les formations granitiques. Ils affleurent surtout sur les collines Nyambuye et Muyira.

II.2.2 Tectonique

Le relief de notre zone d'étude est caractéristique de la région du Grand Rift Est-africain : d'un côté, le soulèvement des montagnes jeunes du Mirwa au relief fortement découpé à l'Est et de l'autre côté à l'Ouest, le fossé d'effondrement qui loge les plaines de l'Imbo et le lac Tanganyika (***Sabushimike, 2015***). Le contact de la faille entre le bassin et le précambrien est en général masqué par des sédiments récents ***(MINATET, 2005)***. C'est une zone affectée par la tectonique ancienne burundienne liée à la mise en place du granite responsable d'une schistosité régionale, des fractures, de la mylonitisation dans le complexe orthogneissique (***Burengengwa, 1993*****)** et par la tectonique récente du rift qui est encore en activité.

Dans le contexte du rift Est-africain, le BV Ntahangwa est une zone de relais correspondant à des horsts qui résistent plus ou moins à l'effondrement général du fossé. Néanmoins, l'évolution récente du rift a mis en place une succession de gradins limités par des failles normales de rejet faible. La tectonique est ainsi présente dans la région de notre étude et une faille certaine dirigée NW-SE passe par Nyambuye, Mbare et Gasarara (***Kagaye, 2015*****)**.

II.3 Contexte pédologique du bassin versant de la rivière Ntahangwa

Les caractéristiques pédologiques des 3 zones écologiques de ce BV sont présentées ci-dessous (***Ndikubwayo, 2019***):

- **La plaine de l'Imbo** faisant partie de notre zone d'étude est dominée par les sols récents établis sur des sédiments lacustres et des alluvions fluviatiles variant suivant leur substrat ou leur position géographique.

- Les sols des **contreforts du Mirwa** varient suivant les conditions topographiques : au fond des vallées, se trouvent des sols profonds et riches en humus tandis que sur les pentes raides, on y trouve des sols pauvres lessivés (***MEEATU, 2013)***. Sur les contreforts dominent les associations de lithosols sur les éperons quartzitiques, de ferrisols au niveau des interfluves les mieux protégés de l'érosion tandis que les sols récents se rencontrent sur les versants. Selon ***Rishirumuhirwa (2012***), on y rencontre des sols récents tropicaux et des kaolisols décrits comme des ferrisols et ferralsols à dominance argileuses, dérivés de

schistes micacés et s'érodant en rigoles et ravines. Ce sont des sols relativement jeunes et fertiles mais facilement érodibles compte tenu de la topographie de la région ***(MEEATU, 2013 ; Ndikubwayo, 2019)***.

- Sur la **crête Congo-Nil** dominent les ferralsols ou ferrisols et les kaolisols ***(MEEATU, 2013 ; Ndikubwayo, 2019)***. Ils sont jeunes, de fertilité faible ; toutefois, en apportant de la matière organique par les déchets de cultures et la fumure animale, les paysans parviennent à maintenir la fertilité des sols d'altitude ***(MEEATU, 2011).***

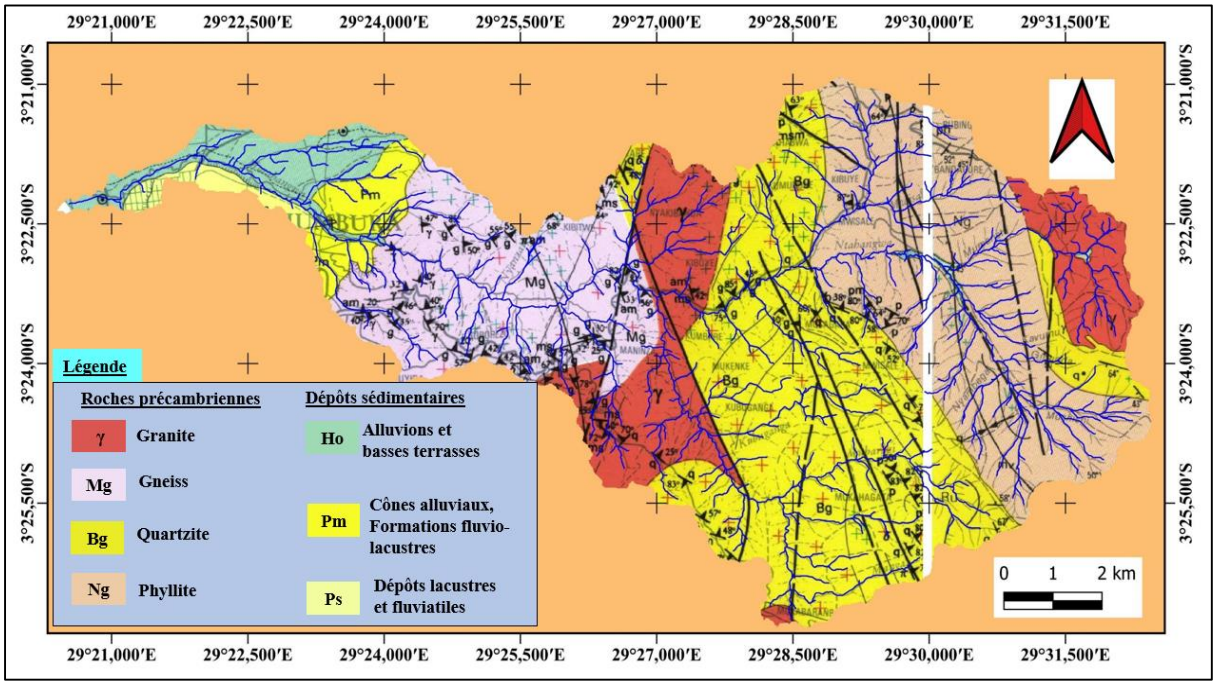


Figure 14: Carte lithologique BV Ntahangwa (d'après la carte géologique du Burundi)

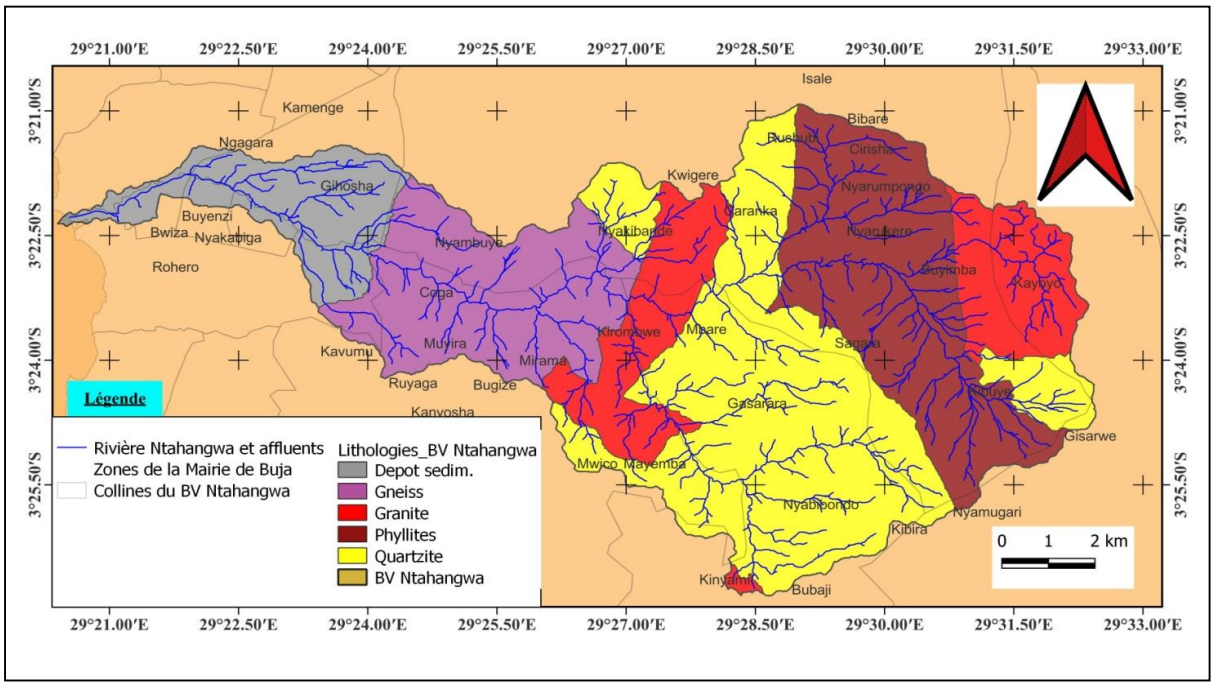


Figure 15: Carte des lithologies du BV Ntahangwa (adaptée selon Kagaye, 2015)

II.4 Etat de la dégradation du sol du bassin versant de la rivière Ntahangwa

L'érosion du sol du BV Ntahangwa est principalement due à une intense pression agricole exercée sur les fortes pentes du Mirwa et revêt les quatre formes d'érosion hydrique vues au point I.1.4. Selon le ***MEEATU (2014)***,

- ✓ **la région de l'Imbo** est la région naturelle du Burundi la moins érodée ; elle subit cependant des contrecoups de l'érosion des régions en amont ;

- ✓ **la région du Mirwa** est l'une des régions naturelles du Burundi à très haut risque d'érosion car pentue, arrosée et reposant sur des sols fragiles ***(Rishirumuhirwa, 2012)***. En plus, la forte densité de la population de la région (± 300 habitants au km² ***(Gihimbare et al., 2011))*** entraîne un morcellement poussé des terres agricoles et une exploitation au maximum du terrain couplée à de mauvaises pratiques culturales conduisant à la disparition des couches arables et un appauvrissement des sols qui, rendant progressivement acides ces derniers, conduit à une baisse des rendements ;

- ✓ **la crête Congo-Nil**, représentant la région naturelle de Mugamba pour le présent travail, connait une disparition de la forêt ombrophile de montagne conquise pour des causes de l'agriculture. Les terres agricoles globalement exigües se dégradent rapidement, s'appauvrissent et souffrent de l'acidité et de la toxicité aluminique suite à l'érosion.

II.5 Quantification de l'érosion sur le bassin versant de la rivière Ntahangwa

- ➢ **Expérimentation sur la parcelle de Wischmeier.**

Après l'indépendance, l'ISABU a mené pendant des années (de 1977 à 1995) les premiers essais sur parcelles et bassins versants expérimentaux en vue de préciser les facteurs de l'érosion hydrique et de mesurer les pertes en terre par la méthode USLE de Wischmeier (***MINATET, 2005 ; Rishirumuhirwa, 2005)***. La région du Mirwa a alors été privilégiée en raison des risques d'érosion importants qu'elle présente. Ainsi, des stations constituées de parcelles de Wischmeier ont été implantées à Rushubi ainsi que sur deux micro-bassins versants de Cirisha et Nyarumpongo à Rushubi également ***(Duchaufour & Mikokoro, 2012)***.

Les résultats de ces travaux obtenus sur plusieurs années ont permis de quantifier les facteurs R et K ***(Bidou, 1988)*** et prouver les limites de cette méthode en ce qui concerne l'érosion hydrique des sols au Burundi. Cette équation a donc dû être adaptée aux conditions particulières du pays ***(Nsabimana, 1999)***. Toutefois, on est parvenu à démontrer que :

- ✓ tous les sols étudiés du Burundi ont une bonne à très bonne résistance à l'érosion (**0.20<K<0.03**) ***(Nsabimana, 1999, Rishirumuhirwa, 1999, Duchaufour & Mikokoro, 2012)***

- ✓ le rapport entre le total annuel des précipitations **P** et leur agressivité **R** varie de **0.2** à **0.3** ***(Roose, 1994 ; Nsabimana, 1999)*** : **R/P = 0.27 à Rushubi** (P = 1663mm et R = 444) et **0.23 à Gisozi** (P =1531mm et R = 354). Ce rapport est très petit par rapport à 0.5 trouvé en Afrique de l'Ouest ***(Bidou, 1988)***.

Ainsi, sur ces parcelles expérimentales, ces recherches sont parvenues à déterminer les mesures de l'érosion. Le constat est que l'on enregistre une perte en terre considérable,

variant de 1 à plus de 130 t/ha en moyenne par jour sur un sol nu labouré et pour une pluie de forte agressivité (***Bizimana & Duchaufour, 1992)***.

Les deux facteurs R et K ne peuvent pas justifier à eux seuls l'importance de l'érosion des sols dans ces montagnes (***Mathieu, 1987)***. Les facteurs LS et C jouent un rôle prépondérant dans le contrôle de l'érosion ***(Mathieu, 1987 ; Rishirumuhirwa, 1999)***. Il semblerait que sur de forte pente, il y a interaction entre les effets de la pente et la diminution du couvert végétal due aux carences hydriques et minérales dont souffrent les plantes du fait de l'érosion elle-même *(**Mathieu, 1987**)*. Les valeurs approximatives des facteurs USLE pour les différentes régions naturelles du Burundi et celles du BV Ntahangwa par conséquent ont été mises en place lors des travaux de recherche sur le contrôle de l'érosion de ***Rishirumuhirwa (1997)*** (**Tableau 13**).

Il a également pu démontrer que la bonne résistance des sols à l'érosion est liée aux pratiques culturales des agriculteurs où la bananeraie constitue un pivot des systèmes traditionnels d'exploitations. Et ***Duchaufour et al (1991)*** avaient montré qu'avant la crise politique de 1993, les pertes en terre dans le Mirwa central, caractérisé par des systèmes agricoles à très fortes densité bananière, étaient insignifiantes (0,1t/ha/an). Or, pendant cette crise, ***Rishirumuhirwa (1997)*** a évalué les risques d'érosion sous cultures entre 3 et 978 t/ha/an, avec des valeurs de l'indice C variant de 0,1 à 0,7 selon les systèmes d'exploitation (voir **Tableau 9)**. D'après lui, les risques élevés d'érosion de la région du Mirwa observés ces dernières années sont donc aggravés par la crise politique qu'a traversée le Burundi de 1993 à 2005 qui a particulièrement touché cette région des contreforts surplombant la ville de Bujumbura par la déstructuration des exploitations, le recul de l'élevage, des cultures en général et de la bananeraie en particulier.

Tableau 13 : Valeurs approximatives des facteurs USLE des régions naturelles du Burundi (*Rishirumuhirwa, 1997)*

Régions naturelles	R	K	LS	C/végét. natur.	C/culture	A végét. natur. (t/ha)	A culture (t/ha)
Imbo	350	0,07-0,14	0,6-1	0,01	0,1-0,7	0,15-0,5	1,5-34,3
Mirwa	475	0,07-0,14	1,1-21	0,001	0,1-0,7	0,04-1,4	3,7-977,6
Crête C-N*	550	0,07-0,14	1,1-21	0,001	0,1-0,7	0,04-1,6	4,2-1131.9
Plateau central	475	0,07-0,14	1,1-8,3	0,01	0,1-0,7	0,4-5,5	3,7-386,4
Dépression N	350	0,07-0,14	0,6-2,5	0,01	0,1-0,7	0,15-1,93	1,5-85,8
Dépression E	550	0,07-0,14	0,6-2,5	0,01	0,1-0,7	0,24-1,93	2,3-134,8

- **Usage des SIG et de la télédétection**

La quantification et la spatialisation de l'érosion, sur une grande échelle, à l'aide des SIG et télédétection ne sont pas très développées dans notre pays. Peu d'auteurs ***(Rijkee, 2016 ; Sindayihebura, 2017 ; Nijimbere & Riveros-Lizana, 2019)*** ont abordé ce sujet mais personne n'a traité le BV Ntahangwa pour le moment.

II.6 Impacts socio-économiques et environnementaux de l'érosion du BV Ntahangwa

L'érosion du BV Ntahangwa affecte la productivité des sols, la qualité des eaux et de la biodiversité du lac Tanganyika ainsi que les infrastructures socio-économiques de la ville de Bujumbura ; elle constitue donc une menace pour la survie des populations de ce BV. Ces impacts peuvent être observés aussi bien sur site que hors site :

1°. Sur site

La baisse de productivité des sols est abordée sous l'angle de la perte en nutriments des sols, généralement l'azote, le phosphore et le carbone ***(Gihimbare et al., 2011)***. Cependant, il n'est pas facile de déduire ces pertes étant donné que les propriétés physico-chimiques des sols (teneur en M.O, éléments nutritifs, CEC, acidité, …) de plusieurs exploitations agricoles du Burundi, le BV Ntahangwa y compris, ne sont pas connues ***(Nijimbere et al., 2020)***. Toutefois, dans les années 1990, des recherches menées sur la région du Mirwa, sur base de la parcelle de Wischmeier avaient montré, par rapport à un sol témoin, une chute moyenne de 2.3 contre 1.6 et 2.1 contre 1.3 respectivement pour le carbone organique et l'azote quand on considère respectivement la parcelle de Wischmeier et les parcelles cultivées et d'une augmentation de l'acidité d'une unité de pH et du taux d'aluminium libre dans les 2 cas (***Bizimana & Duchaufour, 1992)*** **(Tableau 14)**.

Tableau 14 : Identification des pertes chimiques sur parcelle cultivée et de Wischmeier, pour la région du Mirwa (Extrait de *Bizimana & Duchaufour, 1992)*

	C (%)	N (%)	C/N (%)	pH	Al^{3+} (méq/100g)
Sol témoin	3,97	0,36	11	4,7	2,67
P. Cultivées	2,5	0,27	9,2	3,9	3,46
P. Wischmeier	1,72	0,17	10	4,5	2,84

2°. Hors site

Les nuisances engendrées dans la ville de Bujumbura et sur le lac Tanganyika, via la rivière Ntahangwa sont énormes. Parmi les affluents burundais de ce lac, la Ntahangwa enregistre la plus grande concentration de matières en suspension (MES) : 923mg/l ***(Vandelannoote et al., 2002)*** en termes de particules minérales. Comme nuisances, on peut citer :

- ✓ ***la dynamique de la rivière Ntahangwa*** qui ne cesse de détruire des infrastructures (routes, maisons, …) par l'affouillement et l'affaissement de ses berges (Mutanga Nord & Sud, Kigobe, …) **(Figure 16)**. La Ntahangwa, tout comme la plus part des rivières issues des escarpements du Mirwa, a un caractère torrentiel et emporte des sédiments essentiellement grossiers : fraction de 250µm à 2mm ***(Sebahene et al., 1999)*** provoquant des inondations en son aval (en obstruant les systèmes de canalisation) qui paralysent la circulation et qui sont source de l'insalubrité, des maladies et des décès.

- ✓ *la sédimentation au port de Bujumbura* qui entrave l'accès des navires. ***Serrat-Capdevila et al. (2020)*** montrent, avec des images satellites de 2002 à 2016, que le delta de la Ntahangwa ne cesse d'accroître la quantité de sable, avec une augmentation de plus de 30ha due aux apports des sédiments de notre BV **(Figure 17).**



Figure 16: Nuisances dues aux crues de la rivière Ntahangwa suite à l'érosion de son BV.

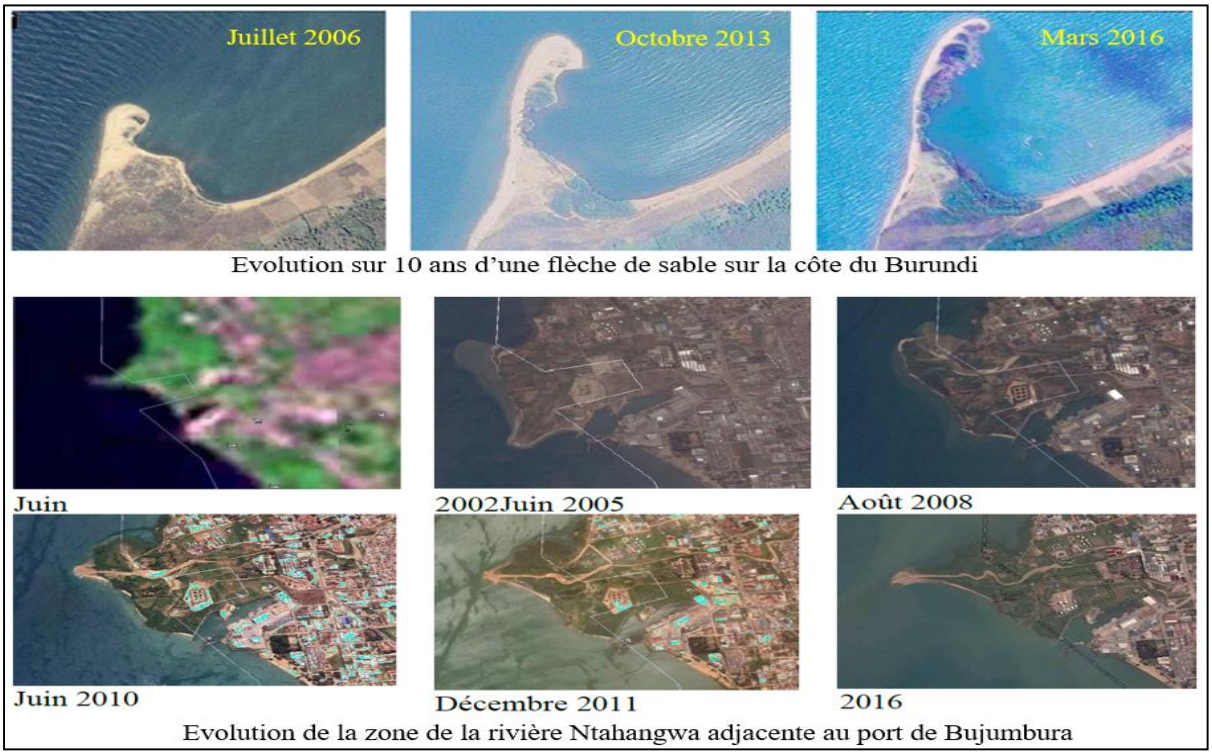


Figure 17 : Sédimentation du port de Bujumbura suite à l'érosion du BV Ntahangwa (*Serrat-Capdevila et al., 2020*).

- ✓ ***la sédimentation dans le lac Tanganyika***. Les dégâts concernent d'abord la baisse de la qualité des eaux par les MES qui accompagnent les crues. Par exemple, la turbidité de l'eau du lac Tanganyika a passé de 1.2 NTU en 1994 à 25 en 2017(*alors qu'elle ne devrait pas dépasser 5 NTU d'après l'Organisation Mondiale de la Santé, pour faciliter le traitement*)[1], poussant ainsi la REGIDESO soit à appliquer fréquemment le délestage de l'eau en Mairie de Bujumbura[2], soit à déplacer le point de captage de l'eau brute quand la turbidité dépasse la capacité technique de traitement de l'eau. Actuellement l'eau est captée à 3500 m sur une profondeur de 25 m par rapport au littoral du Lac Tanganyika alors qu'il était à 1800 m dans les années antérieures[3]. Si rien n'est fait, cette eau sera captée en RD Congo. Par conséquent, le coût sera énorme pour s'approvisionner en eau potable.

  Ensuite, avec cette sédimentation, les MES réduisent la transparence de l'eau et, en se déposant, couvrent les substrats rocheux et détruisent par conséquent les niches des espèces qui y vivent provoquant leur migration ou disparition ***(Sebahene et al., 1999)***. Par exemple, les Lates (Mukeke) diminuent au Burundi car ils sont moins actifs ou même absents dans les eaux plus troubles, ce qui est de plus en plus le cas au large du Burundi **(*Ntakimazi, 2006*).**

- ✓ ***la pollution de l'eau du lac Tanganyika*.** Les apports d'azote et de phosphore issus du lessivage des sols du BV vont entraîner l'eutrophisation de l'eau du lac marquée par des fluctuations des teneurs en oxygène dissous et du recouvrement des substrats du fond par des boues non oxygénées. Une incidence remarquable sur la composition de la faune des poissons se fait sentir : les Lates devraient se raréfier ou disparaître et les sardines (Ndagala) verront la réussite de l'éclosion de leurs œufs compromise **(*Ntakimazi, 2006*).**

Pour ce qui est des teneurs en nutriments entrant dans le lac, plusieurs auteurs ont montré la quantité de phosphore et/ou d'azote que la rivière Ntahangwa déverse annuellement dans le lac : ***Vandelannoote et al. (1996)***, ***Brion et al. (1999***), ***Ntakiyiruta et al (2017)***,… La rivière Ntahangwa a apporté dans ce lac 16,2 tonnes d'azote en 1999 (***Brion et al., 1999***) contre 1636 tonnes d'azote et 744 tonnes de phosphore en 2016 (***Ntakiyiruta et al, 2017***). Le constat est que ces teneurs évoluent avec le temps ; probablement en fonction de l'augmentation de la population et l'extension de l'urbanisation remarquables dans le BV Ntahangwa.

---

[1] : Source *:* Journal BurundiEco du 10 Janvier 2020: "*Vers le rationnement de l'eau potable en Mairie de Bujumbura."*

[2] : Source *:* Journal BurundiEco du 28 juillet 2017: "*Halte à la pollution du lac Tanganyika."*

[3] : Source *:* Journal BurundiEco du 1er juin 2018 : "*Quand la pollution du lac Tanganyika fait paniquer plus d'un.*"

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

La mise en place du modèle RUSLE nécessite des données sur la topographie, l'occupation du sol, la climatologie et la pédologie afin de permettre la déduction des facteurs d'érosion.

III.1 Inventaire des données utilisées

1. **La carte géologique du Burundi** au 1/100 000 (Feuilles Bujumbura et Gitega) nous a permis d'extraire les classes texturales du sol du BV Ntahangwa, procédure basée sur les règles de genèse des sols dérivées du matériau géologique parental ***(Buol et al, 2003)***. A partir de ces classes, nous avons alors déterminé le facteur K en observant le tableau des valeurs du facteur de K de ***Stone & Hilborn*** (***2000***) établi suivant la classe de texture.

2. **La carte topographique du Burundi** au 1/50 000 (Feuilles Bujumbura et Muramvya), qui propose une illustration détaillée et exacte des éléments anthropiques et naturels qui se trouvent sur le terrain, nous a servi de fond lors de l'élaboration des cartes factorielles.

3. **Les données des précipitations mensuelles** des 3 stations météorologiques de Gisozi, Bugarama et Bujumbura (aéroport) proches du BV Ntahangwa, d'une durée de 30 ans (1991-2020), ont été recueillies auprès de l'IGEBU pour la détermination du facteur R.

4. **Les images satellitaires** (Landsat 8 OLI & TIRS du 17 aout 2020) de 30 mètres de résolution, téléchargées sur le site "USGS Earth Explorer", nous ont permis de déterminer l'indice NDVI à partir duquel le facteur C a été calculé.

5. **Les images Google Earth** de 2020 ont été utilisées pour valider les classes d'occupation du sol obtenues à partir des images landsat.

6. **Le MNT** de 10 mètres de résolution, produit en 2012 ***(Nibigira, 2018)*** et fourni par le BCG, nous a servi pour l'élaboration de la carte du relief et celle des pentes du BV Ntahangwa. A partir de cette dernière, le facteur LS a été déterminé suivant l'approche de ***Desmet et Govers (1996)*** incorporée dans l'outil SAGA GIS de QGIS.

7. **Le logiciel QGIS**, version 3.20.1, dans lequel sont incorporés les outils ***GDAL*** *(Geospatial data abstraction library)* et ***SAGA GIS*** *(System for Automated Geoscientific Analyses)*, a été utilisé pour le traitement de toutes ces données et l'élaboration des cartes factorielles.

III.2 Méthode d'analyse des données

La méthodologie adoptée vise à exploiter des données satellitaires, pédologiques, géologiques, topographiques et climatiques pour la restitution et la cartographie des zones exposées à l'érosion. La première étape a consisté en la revue de la littérature, la collecte et la synthèse des données existantes sur la modélisation de l'érosion hydrique par l'approche RUSLE. Ensuite, nous avons déterminé chacun des cinq facteurs à partir de ces données satellitaires, géologiques, topographiques et climatiques ; puis, élaboré à l'aide du logiciel QGIS des couches (cartes) de répartition de ces cinq facteurs sur la zone d'étude. Enfin, le

croisement (la multiplication) de ces couches dans le logiciel QGIS nous a permis d'obtenir une spatialisation et une quantification de l'érosion susceptible de se produire.

III.3 Choix des équations

III.3.1 Le facteur R

Le facteur R est déterminé à partir des données pluviométriques de stations météorologiques de la zone d'étude ou par les données climatiques enregistrées ***(Ranaivoson, 2017)***. Par la suite, les résultats sont interpolés sur tout le bassin.

La formule proposée par ***Wischmeier et Smith (1978)*** pour le calcul de l'érosivité **(Equation 2)** n'est pas applicable dans le cas du BV Ntahangwa car aucune station pluviométrique qui enregistre automatiquement les données hydrométéorologiques n'y est implantée (voir **Figure 18**) et les 2 existantes qui lui sont proches ont été installées en 2017 (à Rushubi) et 2018 (à Buhonga); or, la série de données doit couvrir une période minimale de 20 ans comme nous l'avons déjà signalé. Nous avons alors utilisé les données des stations climatologiques classiques installées à Bujumbura (aéroport), Bugarama et Gisozi pour une période de 30 ans (1991-2020).

Le calcul du facteur R du BV Ntahangwa est inspiré par les formules proposées par ***Sindayihebura (2017)*** **(**voir **Tableau 1)** ainsi que le rapport R/P égal à 0.27 et 0.23 respectivement dans le Mirwa et sur la crête (Gisozi) (***Bidou, 1988)***. Pour la plaine de l'Imbo, nous avons pris R/P égal à 0.30 puisque là-bas R varie entre 300 et 400 pour des précipitations annuelles P ≤ 1100mm ***(Rishirumuhirwa, 1997, 1999 & 2005 ; MEEATU & MINAGRIE, 2016***) et que le rapport R/P au Burundi ***(Nsabimana, 1999)***, tout comme dans la région des montagnes tropicales ***(Roose, 1994)***, est compris entre 0.2 et 0.3**.** Et pour question d'uniformiser R sur toute la zone, nous avons privilégié le rapport R/P = 0.27 du Mirwa qui occupe presque la totalité de la zone d'étude (voir **Figure 11**). Ainsi, nous avons utilisé l'équation suivante **(Equation 7)**:

R = 0.27*P*17.02. (***Equation 7)*

La constante 17.02 est le facteur utilisé pour convertir R des unités américaines (R_{USA}) en unités SI (R_{SI}) ***(Wischmeier & Smith 1978 ; Århem & Fredén, 2014 ; Sindayihebura, 2017).***

Avant de déterminer le facteur R de notre zone d'étude, nous avons calculé les précipitations annuelles moyennes (PAM) à partir des précipitations mensuelles moyennes sur chacune des 3 stations météorologiques **(**voir **Annexe 1 & 2)**. Puis, ces résultats ont été chargés dans QGIS et pour obtenir une carte (couche raster) des PAM du BV, nous avons procédé par interpolation avec un outil de traitement de QGIS ***"IDW interpolation"*** *(Boîte à outils de traitements ->interpolation -> IDW interpolation)*. Enfin, pour obtenir la carte du facteur R, nous avons appliqué l'**équation 7** à l'aide de la calculatrice raster *(Boîte à outils traitements -> GDAL -> Divers raster -> Calculatrice raster).*

Le choix de cette méthode d'interpolation est conditionné par son adaptation aux variations de terrains contrairement aux autres qui sont généralement plus sensibles **(*Khali Issa et al., 2016)***. En effet, les points d'échantillonnage de l'érosion pluviale sont pondérés pendant

l'interpolation de telle sorte que l'influence de l'érosion pluviale est la plus importante au point mesuré et diminue à mesure que l'on s'éloigne du point ***(Mhangara et al., 2012)***.

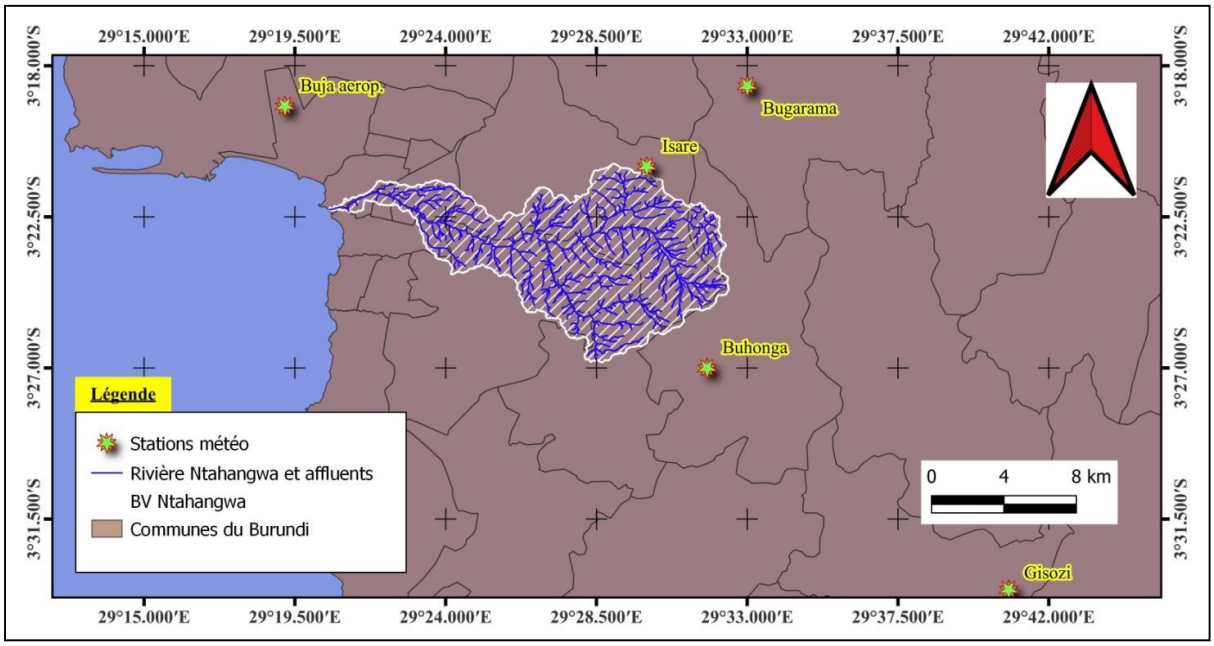


Figure 18: Les stations climatologiques aux environs du Bassin Versant de Ntahangwa.

III.3.2 Le facteur K

Suite aux contraintes du temps et des moyens financiers pour l'échantillonnage et l'analyse des différents types de sols de notre zone, pour déterminer le facteur K, nous nous sommes servi (i) de la carte géologique du BV Ntahangwa (celle modifiée par ***Kagaye (2015) (Figure 14***), (ii) des classes texturales du sol du BV dérivées du matériau géologique parental ***(Buol et al, 2003)*** **(Tableau 6)** ainsi que (iii) du tableau des valeurs de K de ***Stone & Hilborn*** (***2000***) **(Tableau 5).**

III.3.3 Le facteur LS

Le calcul du facteur LS a été effectué à partir de la carte des pentes et du MNT de 10 mètres de résolution, à l'aide de l'équation de ***Desmet et Govers (1996)*** incorporée dans le logiciel QGIS. Cette méthode requiert le MNT seulement ***(Elleaume, 2022)***. Nous avons utilisé l'outil de géotraitement ***LS-factor Field Based*** du module "*Terrain Analysis–Hydrology*" se trouvant dans l'extension SAGA GIS *(Outil Traitements -> SAGA GIS ->Terrain Analysis – Hydrology ->LS-factor Field based)*; une extension qui incorpore un algorithme de flux multiples et qui contribue à une estimation précise de l'accumulation de flux ***(Panagos et al, 2015)*** **(**voir **Annexe 3)**.

L'**approche de *Desmet et Govers (1996)*** a été choisie car elle est la plus appropriée pour les zones à topographie complexe comme la région de rifting ***(Nacishali Nteranya, 2020)*** dont fait partie notre zone d'étude.

III.3.4 Le facteur C

Une manière simple de déterminer le facteur C dans une zone donnée consiste à assigner les valeurs de C correspondant aux différentes classes d'occupation du sol en se référant aux

valeurs disponibles dans la littérature ou aux valeurs de C de la même région ***(Nacishali Nteranya, 2020)***. Cependant, la définition des classes d'occupation du sol diffère d'un pays à l'autre (voir **Tableau 9**). Pour le contexte de notre zone d'étude, les valeurs de C correspondant aux différentes classes d'occupation du sol ne sont pas disponibles.

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé l'indice **NDVI**. Le **NDVI** est calculé à partir de la différence normalisée entre deux bandes spectrales : le rouge (R) et le proche infrarouge (NIR) d'une image satellite et est donné par l'expression suivante **(Equation 8)** développée par ***Rouse et al (1974) (Assemian et al., 2020)***:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \qquad (Equation\ 8)$$

Où ***NIR*** est la valeur de la bande proche infra-rouge d'un pixel et ***Red*** la valeur de la bande rouge du même pixel ***(Århem & Fredén, 2014 ; Suriyaprasit & Shrestha, 2008)***.

Les valeurs NDVI varient de -1 à +1. ***Une végétation saine*** aura des valeurs NDVI élevées, la ***végétation malsaine*** ou morte des valeurs plus faibles alors que des éléments tels que ***le sol et la roche nue*** auront une valeur proche de zéro en raison de leur réflectance similaire dans les deux bandes d'ondes. En revanche, ***l'eau, les nuages et la neige*** ont des valeurs NDVI négatives ***(Karaburun, 2010 ; Århem & Fredén, 2014 ; Hamdi, 2016)***.

Pour calculer le facteur C, plusieurs auteurs ont proposé des formules (***Van Der Knijff et al., 1999 ; Suriyaprasit & Shrestha, 2008 ; Karaburun, 2010 ; Durigon et al., 2014 ; etc.)***. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé celle de ***Durigon et al. (2014)*** **(Equation 6.1)**.

Pour le calcul du facteur C, il convient mieux d'utiliser l'image NDVI acquise pendant la saison des pluies ***(Alexandridis et al., 2015 ; Karamage et al., 2016a ; Karamage et al., 2017 ; etc.)*** car pendant la saison des pluies l'érosion du sol est fortement active et la couverture végétale est à son apogée ***(Mhangara et al., 2012)***. Selon ***Alexandridis et al. (2015)***, le mois de novembre est le plus souvent le mois optimal pour l'estimation de la perte annuelle de sol (suivi respectivement par ceux de mars et octobre). Cependant, pour notre cas, nous n'avons pas pu obtenir, sur le site de l'**USGS *(https://earthexplorer.usgs.gov/)***, des images landsat de bonne qualité de ces mois pour l'année 2020 à cause des nuages ; de ce fait, la NDVI a été calculée à partir de l'image Landsat 8 OLI/TIRS du 17 aout 2020.

Pour le calcul de NDVI, nous avons besoins des bandes rouge et proche infrarouge (B4 et B5 respectivement pour Landsat 8). Une fois chargées dans la fenêtre de QGIS, ces bandes ont d'abord dues être converties en valeurs de réflectance par l'outil conversion de QGIS (*Outil de traitements -> GDAL ->Conversion raster -> Convertir*) ; puis, pour obtenir la couche NDVI, **l'équation 8** a été appliquée dans la calculatrice raster (*Boîte à outils traitements -> GDAL -> Divers raster -> Calculatrice raster*) (voir **Annexe 4**). A partir de cette couche raster de NDVI, nous avons appliqué l'**Equation 6.1** à l'aide de la calculatrice raster afin d'obtenir la couche du facteur C.

III.3.5 Le facteur P

La détermination du facteur P exige que les aménagements soient cartographiés et cette cartographie se fait à base des photos aériennes suivie d'une prospection de validation sur terrain *(**Nacishali Nteranya, 2020**)*. Une fois les aménagements cartographiés, on combine leur carte avec celle de la pente afin de déterminer sur quel niveau de pente l'aménagement en question a été effectué ***(Cherni & Samaali, 2012)***. Malheureusement, dans les pays peu développées comme le nôtre, l'établissement d'une carte du facteur P à l'échelle d'un BV avec un système complexe d'utilisation des terres est presque impossible (***Karamage et al., 2016b***).

Dans cette étude, au lieu de P = 1, qui indique une absence des pratiques de conservation, nous avons utilisé P = 0,75 ; valeur proposé par le Projet LADA pour les pays avec des aménagements mineurs des terres ***(Nachtergaele et al., 2010 ; Nacishali Nteranya, 2020)*** et qui a aussi été largement utilisée dans la sous-région : BV de la Nyabarongo (Rwanda) (***Karamage et al., 2016a),*** BV du lac Kivu (***Karamage et al., 2016b),*** au Rwanda ***(Karamage et al., 2016c ; Kulimushi et al., 2021)***, territoire d'Uvira (***Nacishali Nteranya, 2020***), en Ouganda ***(Karamage et al., 2017*)*,*** etc. En effet, l'une des tâches de ce projet LADA était de s'attaquer à l'évaluation de la dégradation des sols au niveau global (***Nachtergaele et al., 2010)***. Ainsi, en l'absence des données sur le mode de protection de sol par les trois mesures de contrôle de l'érosion du sol de ***Wischmeier & Smith (1978)***, le projet LADA a estimé les valeurs globales du facteur P à l'aide d'un indice lié à la performance globale de la culture par rapport aux intrants et à la gestion (***Nachtergaele et al., 2010)***, les a transformées en facteur P (***Karamag et al., 2017***) et a développé une carte mondiale **(Figure 19)** (***Nachtergaele et al., 2010 ; Karamage et al., 2016c ; Xiong et al., 2019***).

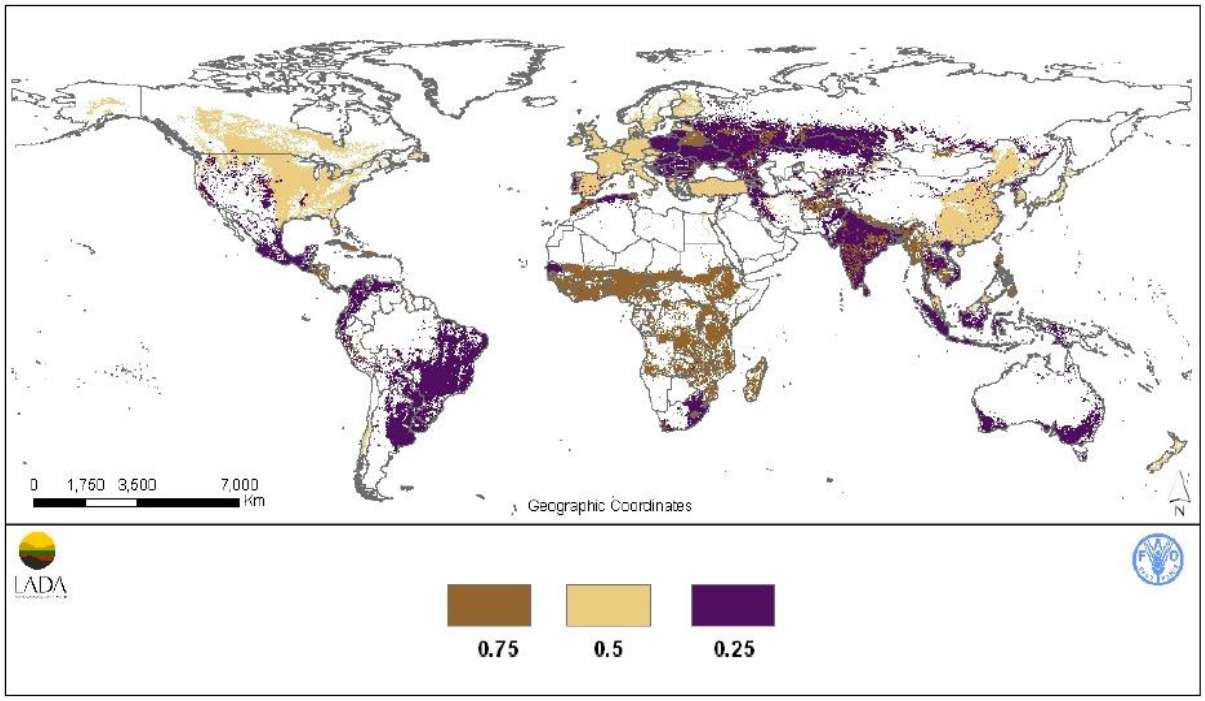


Figure 19: Carte mondiale du facteur P selon le projet LADA (*Nachtergaele et al., 2010)*

Ainsi, la multiplication des 5 facteurs effectuée à l'aide de la calculatrice raster de QGIS nous a permis de générer la carte des pertes en sols susceptibles de se produire sur le BV Ntahangwa. La **figure 20** résume l'approche méthodologique adoptée.

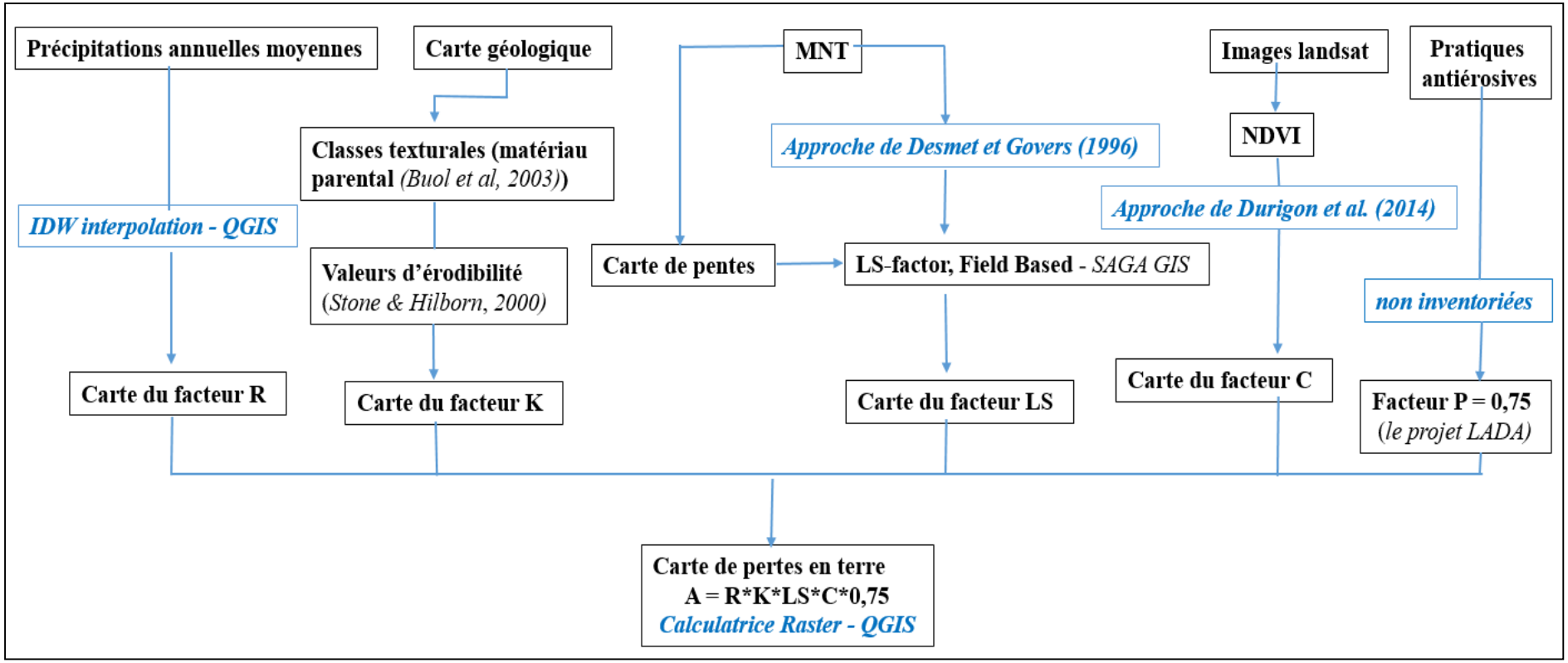


Figure 20: Organigramme de cartographie des pertes en sol selon le modèle RUSLE adoptée dans cette étude.

CHAPITRE IV: PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats présentés dans ce chapitre détaillent le calcul et la spatialisation d'une part des 5 facteurs de l'équation RUSLE et d'autre part la spatialisation et l'estimation des pertes de sols engendrées sur le BV Ntahangwa. Les résultats apportés dans le cadre de cette étude permettent de mettre en évidence *l'érosion potentielle* et celle *réelle* estimées. Ils apportent une estimation des pertes annuelles moyennes fournies pour chaque maille d'un ha du BV selon la modélisation RUSLE.

IV.1 Présentation des résultats

La spatialisation des 3 stations météorologiques ci-haut mentionnées a permis de définir la valeur minimale, la valeur maximale, la moyenne et l'écart type de chaque facteur et du taux d'érosion sur le BV Ntahangwa au cours de la période allant de 1991 à 2020 **(Tableau 15)**

Tableau 15 : Synthèse des facteurs de la RUSLE calculés et du taux d'érosion estimé sur le BV Ntahangwa au cours de la période 1991 – 2020

Valeur	K	R	LS	E_p	C	P	A
Minimale	0.0026	4029.81	0.030	0.948	0.142	0.75	0.101
Moyenne	0.0100	6363.63	6.142	373.107	0.284		74.391
Maximale	0.0237	7460.54	55.348	5848.60	0.500		1181.343
Ecart-type	0.0083	823.43	3.410	438.451	0.051		82.726

N.B : * Les valeurs sont en unités SI
* S.D = standard deviation (écart-type)
* N (nombre de pixels) = 906 206pour les paramètres R, K, LS &A et 123938 pour C.

⇨ Le nombre de pixels varie en fonction de la taille du pixel, c-à-d la résolution spatiale de l'image utilisée (MNT de 10 m pour R et la pente ainsi que des images Landsat de 30 m pour C) (voir **Annexe 5**).

IV.1.1 Le facteur R

Suivant la distribution des Précipitations annuelles moyennes (PAM) en fonction de l'altitude (**Figures 21**), la carte de spatialisation du facteur R montre un étagement croissant des valeurs avec la topographie (**Figures 22**). Ainsi, l'érosivité des pluies augmente naturellement d'aval (sur la plaine de l'Imbo) en amont du BV Ntahangwa (sur la crête en passant par les Mirwa). Les valeurs de R varient entre 4029.81 et 7460.54 MJ.mm/ha.h.an avec une moyenne établie à 6363.63 **(Tableau 16)**.

Tableau 16 : Les précipitations annuelles moyennes et le facteur R du BV Ntahangwa pour la période 1991 - 2020

Valeur	PAM (mm)	R_{USA}	R_{SI}
Minimale	876.92	236.77	4029.81
Moyenne	1384.78	373.89	6363.63
Maximale	1623.48	438.34	7460.54
Ecart-type	179.19	48.38	823.43

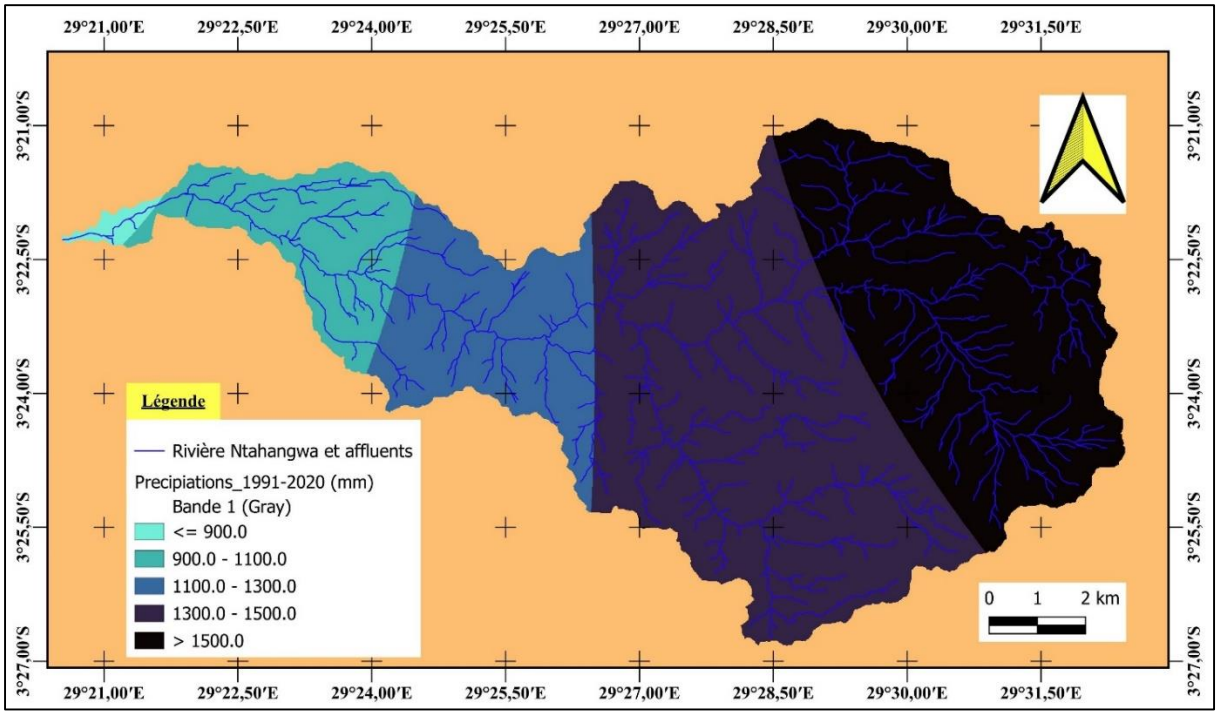


Figure 21: Précipitations annuelles moyennes du BV Ntahangwa de 1991 à 2020

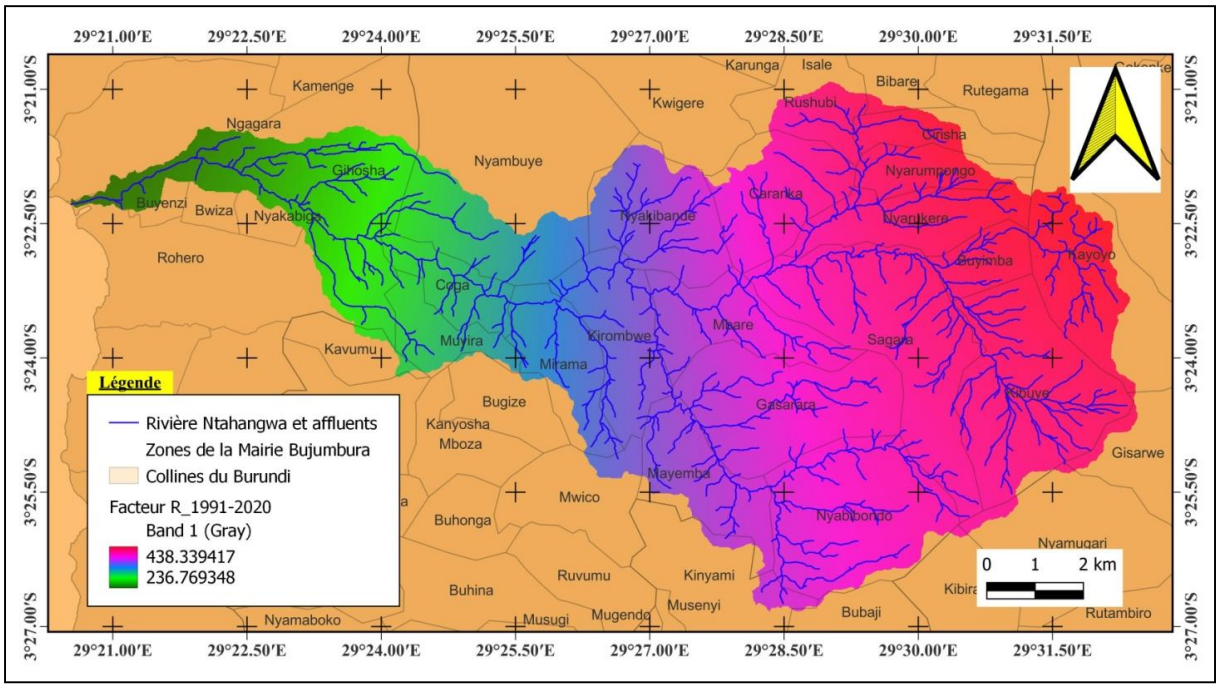


Figure 22: Facteur R du BV Ntahangwa enregistrés au cours de la période 1991 – 2020

IV.1.2 Le facteur LS

Les valeurs du facteur LS sur le BV Ntahangwa varient entre 0.030 et 55.348 avec une moyenne du bassin évaluée à 6.14 **(Tableau 15)**. Les valeurs les plus faibles, inférieures à 1***(5,86%)***, sont principalement observables dans la plaine de l'Imbo, dans les lits de la rivière Ntahangwa et de ses affluents ainsi qu'à quelques sommets de collines (**Figure 23**).

A l'inverse, les valeurs les plus élevées sont globalement associées à la région du Mirwa et à la crête. On constate à quelques endroits de la région du Mirwa, principalement dans les lits des affluents de la Ntahangwa, des valeurs extrêmes du facteur LS supérieures à 21 ***(0.19%)***.

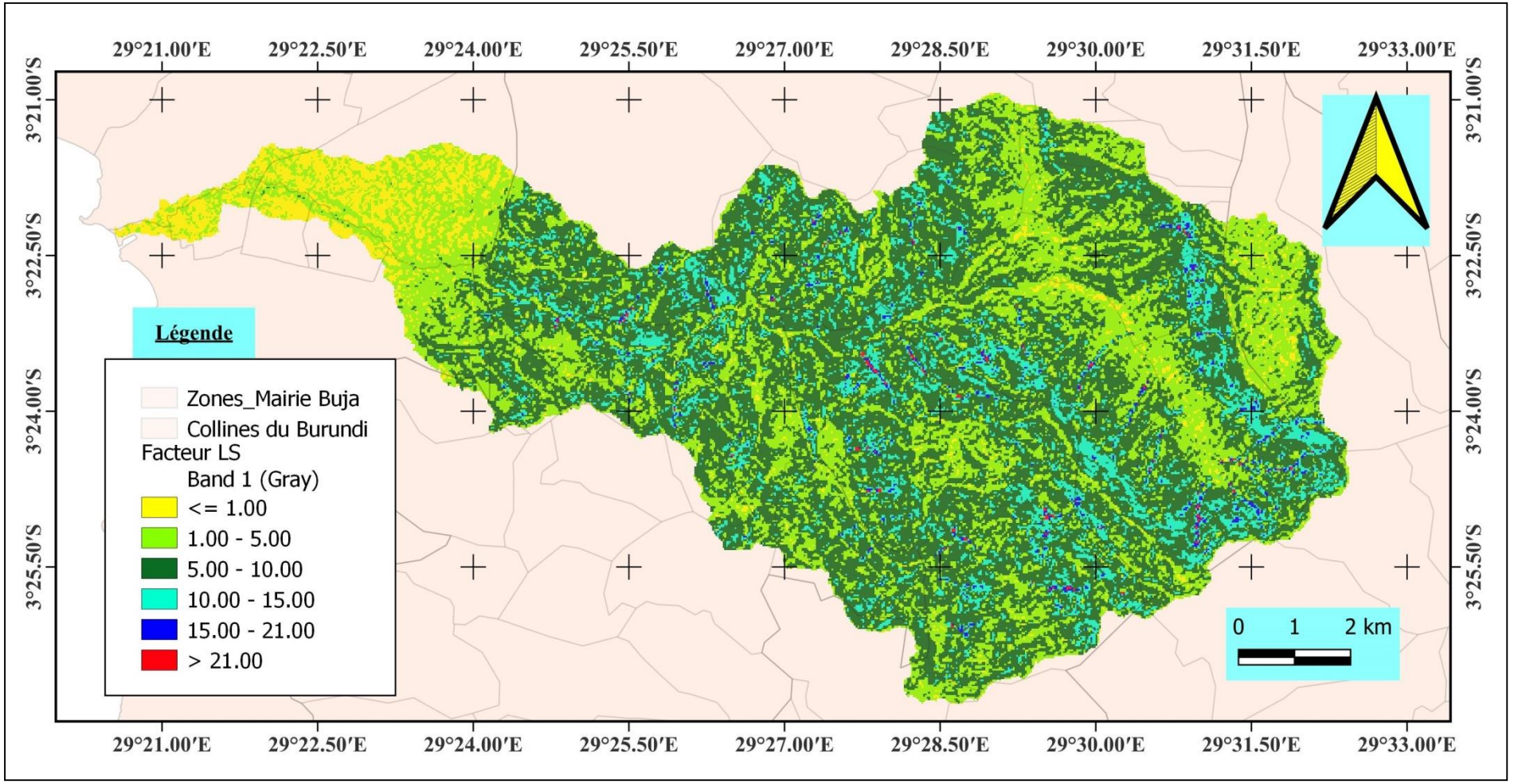


Figure 23: Facteur topographique LS du bassin versant de la rivière Ntahangwa.

IV.1.3 Le facteur K

Les valeurs de K (K_{USA}), dérivées du matériau géologique parental **(Tableau 6)**, sont comprises entre 0.02 et 0.18 (soit l'équivalent de 0,002634 à 0,023706 t.h/MJ.mm en unités SI) avec une valeur moyenne de 0.076 **(Tableau 15)**. **Le tableau 17** montre les valeurs du facteur K_{USA} des 5 types de lithologie du BV Ntahangwa vues aux figures 14 et 15.

Tableau 17 : Valeurs du facteur K_{USA} des lithologies du bassin versant de la Ntahangwa

Lithologie	Quartzite	Gneiss	Granite	dépôts sédim.	schistes
Texture du sol (*Buol et al, 2003*)	**S** Sable	**LS** Sable loameux	**SL** Loam sableux grossier	**SL** Loam sableux	**L** Loam sableux fin
Facteur K_{USA}	0.02	0.04	0.07	0.13	0.18
Occupation (%)	35.91	16.89	16.12	9.62	21.46

IV.1.4 Le facteur C

A partir de la NDVI **(Figure 24)**, nous avons déterminé le facteur C de notre zone d'étude **(Figure 25)** par la formule de ***Durigon et al. (2014)*** **(Equation 6.1)**. Les valeurs du facteur C ont été classées en 4 catégories suivant la densité de l'occupation du sol: **(1) Valeur élevée**, représentant les zones sans végétation comme les surfaces bâties, les rochers, le sol nu,… ; **(2) v. moyenne** pour les zones peu végétalisées comme les terres agricoles occupées par diverses cultures, … ; **(3) v. petite**, pour les zones avec une couverture végétale composée d'herbes et d'arbustes dispersés ici et là ; et **(4) v. très petite** pour les zones avec une végétation luxuriante composée de bananeraies et de palmeraies à forte densité ou de boisements.

La carte de répartition spatiale du facteur C montre la sensibilité de ces différents types d'occupation du sol vis-à-vis des processus érosifs. Les zones fortement végétalisées sont représentées par les valeurs très petites du facteur C ≤ 0.229 et les zones à facteur C plus élevé (C > 0.335) représentent les zones presque dépourvues de végétation **(Tableau 18)**.

Tableau 18: Classes d'occupation du sol du BV Ntahangwa (image landsat du 17/8/2020)

Valeur	NDVI	Facteur C		Appréciation de la valeur de C	Classes du Facteur C	Occupation du BV (%)	
Minimale	0.000	0.141		v. très petite	≤ 0.229	8.81	63.79
Moyenne	0.432	0.284		v. petite	0.229 – 0.278	54.98	
Maximale	0.716	0.500		v. moyenne	0.278 – 0.335	30.49	30.49
Ecart-type	0.102	0.051		v. élevée	> 0.335	5.72	5.72

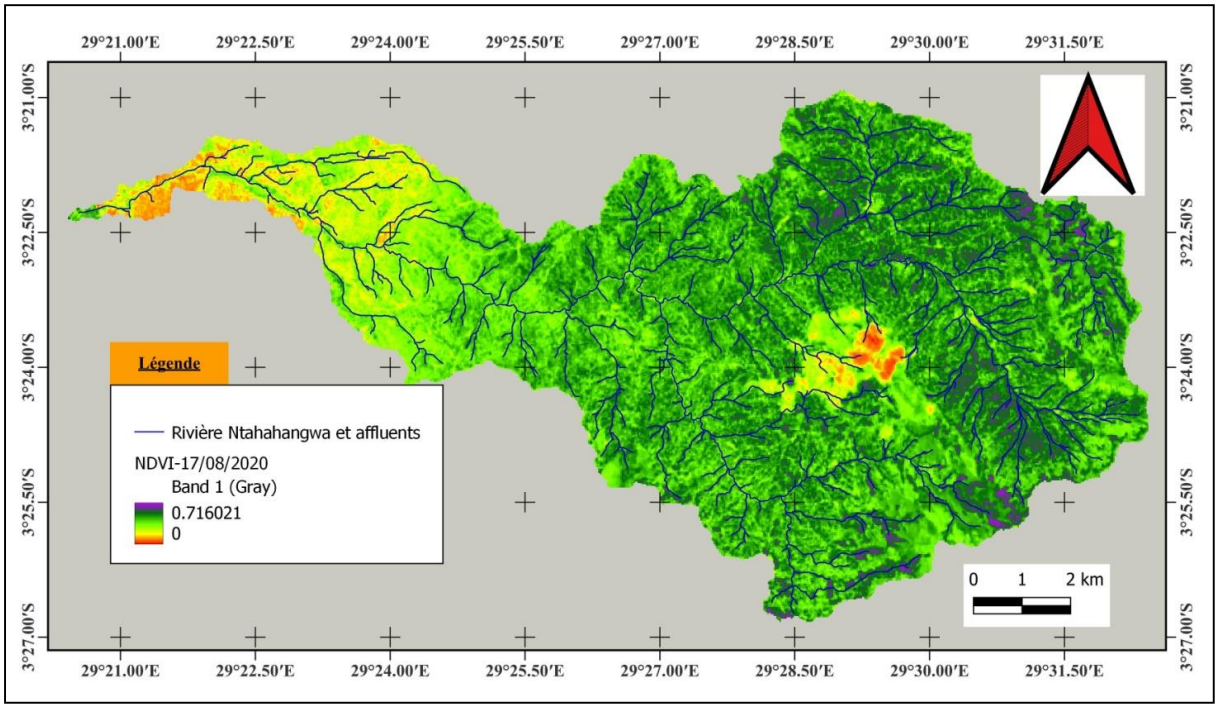


Figure 24: Indice NDVI du BV Ntahangwa extrait de l'image Landsat du 17/8/ 2020

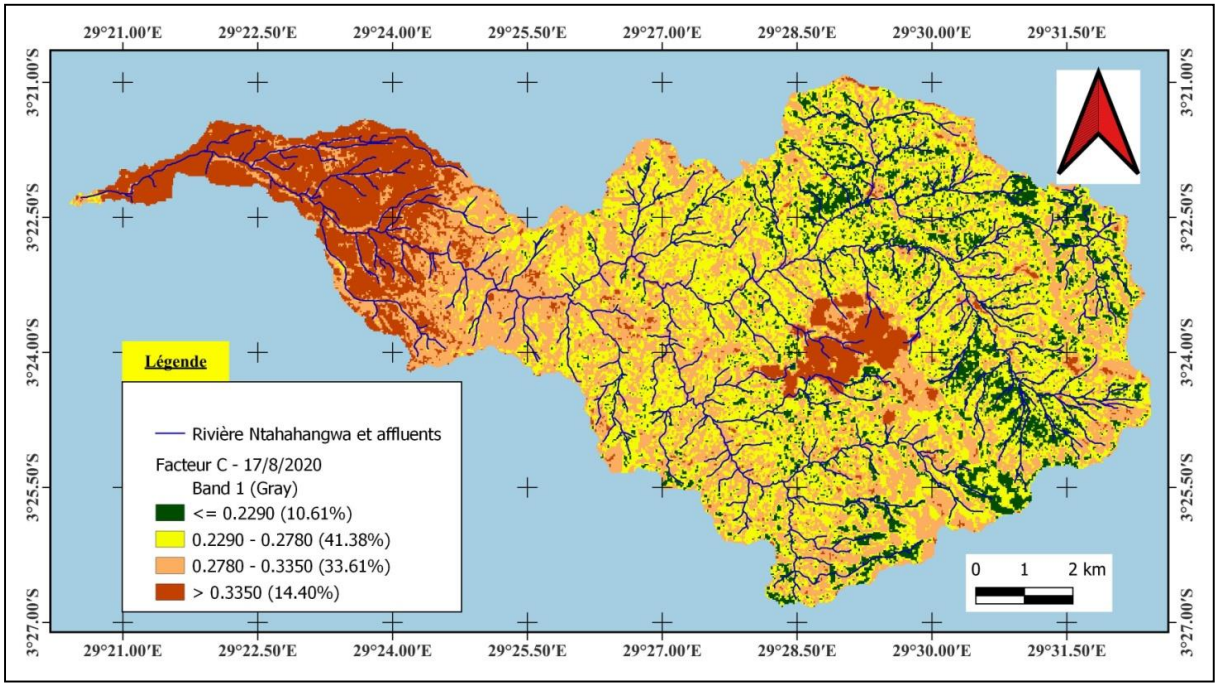


Figure 25: Facteur C et classes d'occupation du sol BV Ntahangwa (Landsat 17/8/ 2020)

IV.1.5 Le facteur P

Puisque les pratiques de conservation ne sont pas bien déterminées pour notre zone d'étude, nous avons affecté sur tout le BV Ntahangwa la même valeur du facteur P (P= 0,75) proposée par le Projet LADA.

IV.1.6 Le taux de pertes de sols : A

Le croisement des cartes des 5 facteurs de l'équation RUSLE (R, K, LS, C, P) intervenants dans l'érosion hydrique des sols permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent de mettre en évidence les dynamiques de l'érosion en nappe potentielle **(Figure 26)** et réelle **(Figure 27)** estimées sur le BV Ntahangwa. Le modèle RUSLE apporte une estimation moyenne des pertes de sols, fournie pour chaque maille d'1 ha du BV. Ces cartes de perte de sols montrent qu'en fonction des zones du BV, les valeurs de pertes en sols varient de 0.101 à 1182.343 t/ha/an. La moyenne étant évaluée à 74.391t/ha/an **(Tableau 15)**.

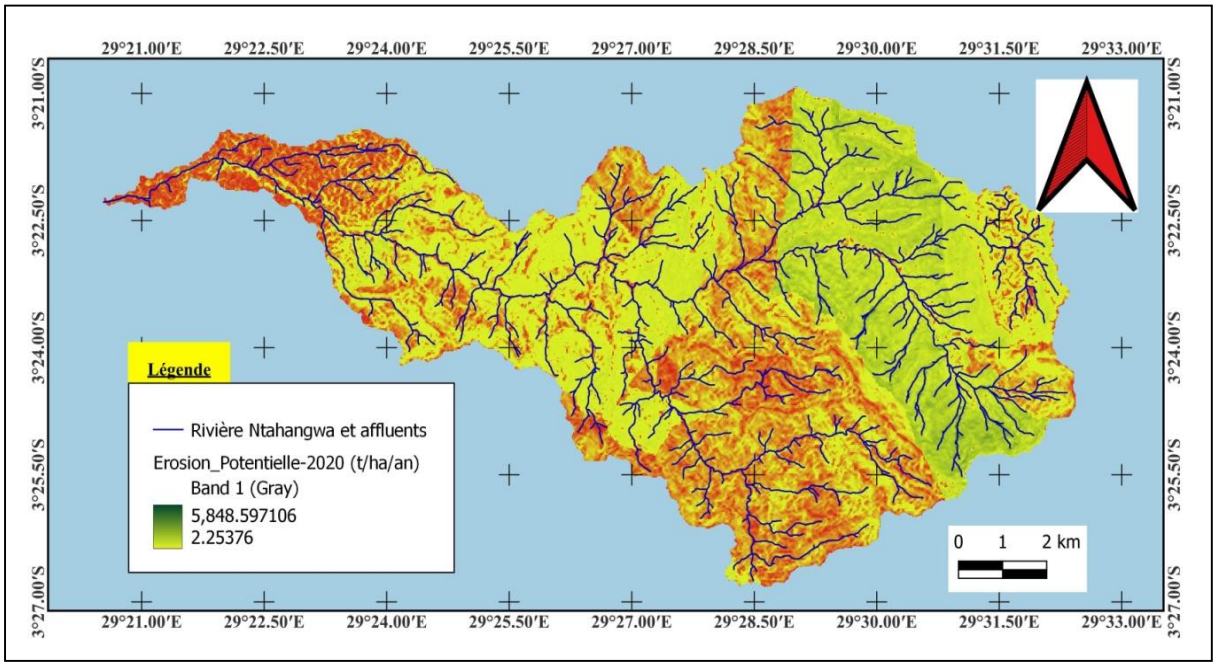


Figure 26: Taux d'érosion potentielle du BV Ntahangwa enregistré en 2020

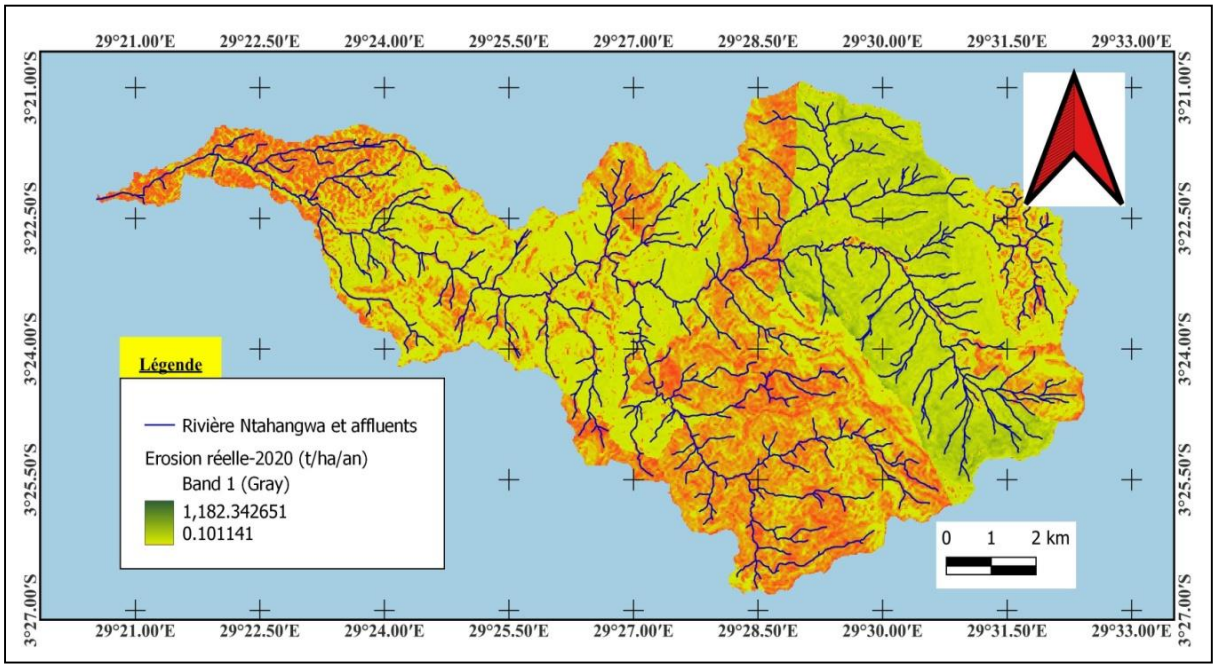


Figure 27: Taux d'érosion réelle du BV Ntahangwa enregistré en 2020

IV.2 Analyse et discussion des résultats

IV.2.1 Le facteur R

A première vue, on constate que le facteur R augment d'aval (plaine de l'Imbo) en amont (crête Congo-Nil), ce qui est normal puisque les précipitations annuelles dont il dépend évoluent dans le même sens. Les résultats trouvés dans notre zone sont relativement inférieures aux résultats des chercheurs antérieurs qui ont donné R_{USA} avoisinant 350 et 550 respectivement dans la plaine et sur la crête ***(Rishirumuhirwa, 1997)*** alors que pour nous, les valeurs trouvées varient de 236 à 438. Ceci serait peut-être dû :

(1) soit aux précipitations de ce BV qui auraient sensiblement baissé au cours de cette période de 1991 à 2020 ;

(2) soit au rapport R/P utilisé dans le calcul du facteur R **(Equation 7)** qui ne serait pas correct ou qui aurait changé suite aux changements climatiques ;

(3) soit à R qui varierait fortement selon que l'on considère une courte ou une longue période.

Les réponses aux 2 premières hypothèses constitueraient un autre sujet de recherche. Mais, on pourrait relier cela au fait que les précipitations (PAM) utilisées ont été générées par interpolation à partir des stations pluviométriques installées en dehors de la zone **(Figure 18)**. Pour la 3è, l'on constate que les chercheurs antérieurs qui ont travaillé sur notre zone ne considéraient qu'une période ne dépassant pas 10 ans (5 ans pour ***Ngarambe (1985)***, 6 à 10 ans pour ***Duchaufour et al. (1991)*** et 10 ans pour ***Simbakwira (1995)***) alors que ***Wischmeier et Smith (1978)*** préconisent une période minimale de 22 ans ; ce que d'ailleurs ***Rishirumuhirwa (1997)*** a confirmé : "*le coefficient α (α= R/P) a été obtenu sur des courtes périodes (3 à 10 ans) et leur validation nécessiterait une série de données plus longue de 20 à 25 ans.*"

IV.2.2 Le facteur K

Les résultats trouvés pour le facteur K, compris entre 0.020 et 0.180, corroborent ceux d'autres chercheurs (***Rishirumuhirwa, 1997 ; Nsabimana, 1999 ; Duchaufour et Mikokoro, 2012***) qui disent que le facteur K des sols du Burundi est compris entre 0.03 et 0.20. Les sols les plus sensibles à l'érosion, les plus érodibles donc, du BV Ntahangwa sont les sols loameux sableux fins développés sur les schistes alors que les sables dérivés des quartzites sont les plus résistants. C'est également ce qui est confirmé par ***Århem & Fredén (2014)*** dans la région de Mara en Tanzanie : *"les sols sableux, même-si ils sont facilement détachables, ont un facteur K faible puisqu'ils produisent moins de ruissellement tandis que les sols plus limoneux sont non seulement facilement détachables mais ont également tendance à se compacter et à former une croûte, ce qui augmente les risques de ruissellement"*. Egalement, d'après ***Morgan (2005)***, les sols contenant moins de 2% de carbone organique peuvent être considérés comme érodibles ; et il ajoute que de nombreux sables et limons sableux en contiennent moins de 2%.

Sur base de la susceptibilité à l'érosion, les sols du Burundi ont une bonne à très bonne résistance à l'érosion (***Rishirumuhirwa, 1997 ; Nsabimana, 1999 ; Duchaufour & Mikokoro, 2012)***. Ainsi, sur base des valeurs de K trouvées, nous pouvons constituer 3 classes de susceptibilité des sols du BV Ntahangwa: ***Très bonne résistance*** ($K_{USA} \leq 0.05$), ***Très bonne à bonne résistance*** ($0.05 < K_{USA} < 0.10$) et ***Bonne résistance*** ($K_{USA} \geq 0.10$)

(Tableau 19 & Figure 28) ; et cette classification concorde avec celles de ***Bolline & Rousseau (1978)*** et de ***Wall et al., 2002*** (voir **Tableau 2**).

Tableau 19: Les classes de susceptibilité des sols du BV Ntahangwa à l'érosion hydrique

Matériau parental	Classe texturale *(Buol et al, 2003)*	K_{USA} *(Stone & Hilborn, 2000)*	K_{SI}	Occupation (en %)	Susceptibilité à l'érosion		
					(1)	*(2)*	*(3)*
Schistes	L Loam sableux fin	0.18	0.0237	21.46	Bonne résistance	Légère	Bonne résistance
Dépôts alluvionnaires	SL – L Loam sableux	0.13	0.0171	9.62			
Granite	S – SL Loam sableux grossier	0.07	0.0092	16.12	Très bonne résistance		Bonne à Très bonne résistance
Gneiss	LS Sable loameux	0.04	0.0053	16.89		Très légère	Très bonne résistance
Quartzite	S Sable	0.02	0,0026	35.91			

(1), (2) et ***(3):*** Susceptibilité des sols du BV Ntahangwa à l'érosion respectivement sur base de la classification de ***Bolline & Rousseau (1978)***, de la classification de ***Wall et al. (2002*** et de la sensibilité des sols du Burundi (***Rishirumuhirwa, 1997 ; Duchaufour & Mikokoro, 2012***).

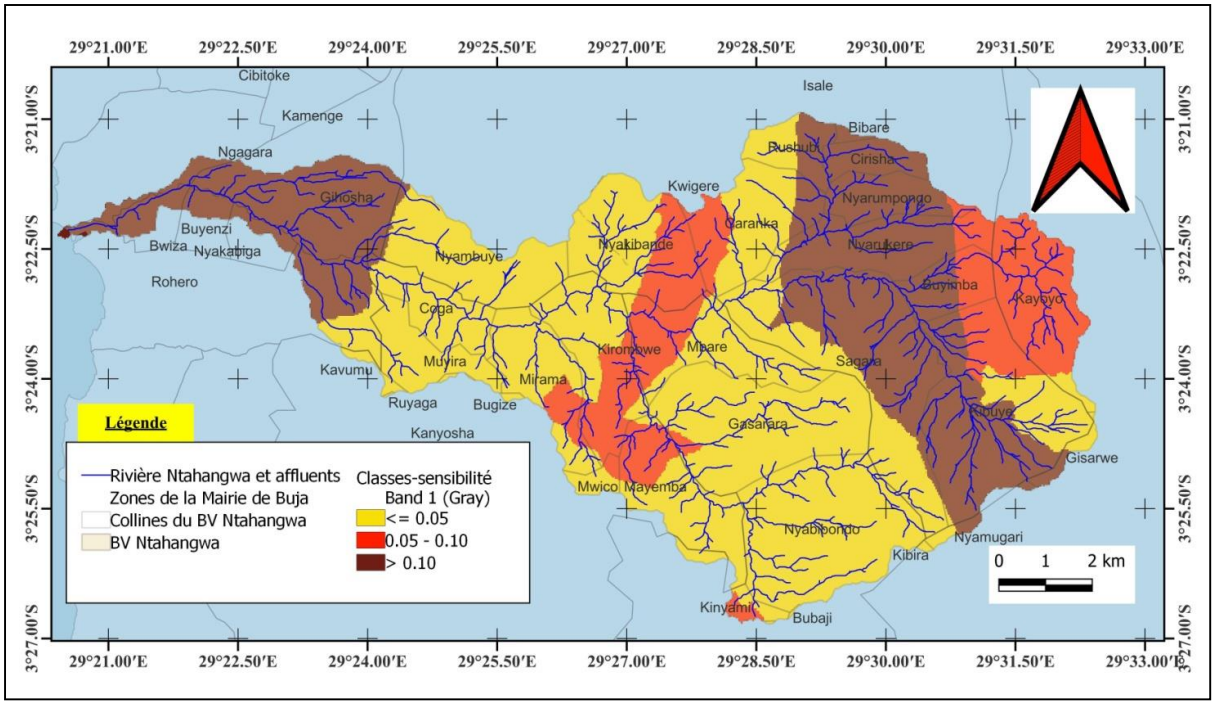


Figure 28: Classes de susceptibilité des sols du BV Ntahangwa à l'érosion hydrique

IV.2.3 Le facteur LS

Les valeurs du facteur LS sur le BV Ntahangwa varient entre 0.030 et 55.348 avec une moyenne sur l'ensemble du BV évaluée à 6.14. En général, les valeurs de LS trouvées dans le cadre de cette recherche sont comparables à celles de ***Rishirumuhirwa (1997)*** qui a proposé des valeurs de LS < 1 dans la plaine de l'Imbo et celles variant de 1 à 21 dans les escarpements du Mirwa et sur la crête (voir **Tableau 13**). En effet, les valeurs supérieures à 21 trouvées dans cette zone (principalement dans la région du Mirwa) occupent une faible proportion : *0,19%* (**Figure 23**). ***Rishirumuhirwa (1997)*** l'a également constaté car il a

suggéré que les régions du Mirwa et de la crête peuvent connaître une érosion qui peut etre multipliée par un facteur LS supérieur à 21 sur une pente de 50% de déclivité et de 40m de longueur. ***Nacishali Nteranya (2020)*** a également trouvé des résultats similaires (0,03 à 56,34) dans le territoire d'Uvira (RDCongo) de topographie similaire à la nôtre.

IV.2.4 Le facteur C

La valeur du facteur C est très élevée principalement dans la plaine de l'Imbo, et c'est normal puisque elle est occupée par les zones urbanisées de la ville de Bujumbura et ses environs. Par contre, les valeurs très petites sont rencontrées plus en amont. Si on analyse bien, la végétation plus dense se localise principalement sur les sols dérivés des schistes (donc fertiles) et parfois sur du quartzite et correspondraient respectivement aux bananeraies et aux boisements. Les valeurs de C trouvées en ce qui concerne la culture du bananier, (donc les valeurs les plus petites), sont supérieures à 0.14; elles s'écartent des valeurs de ***Roose (1977)*** et ***Rishirumuhirwa (1997)*** trouvées respectivement en Afrique de l'Ouest (C = 0.05) et au Burundi (C = 0.07 – 0.14) **(**voir **Tableau 9)**. Cela est peut-être dû au fait que nous avons utilisé les images de la saison sèche alors qu'il est souhaitable d'utiliser au mieux les images de la saison pluvieuse. De ce fait, le facteur C est surestimé.

IV.2.5 Taux d'érosion A

En analysant les valeurs du taux d'érosion potentielle (E_p) et réelle (A) du BV Ntahangwa **(Tableau 15)**, nous constatons que le taux d'érosion réelle **(A)** est inférieur à celui de l'érosion potentielle **(E_p)**, c'est l'effet de l'action anthropique (facteurs C et P), dont l'impact majeur devrait être de freiner ou de réduire l'érosion. Donc, le couvert végétal joue un rôle important dans le contrôle de l'érosion.

Bien que nous n'ayons pas estimé les taux d'érosion réelle A par rapport aux 3 zones du BV Ntahangwa, nous constatons que nos résultats (de 0.101 à 1182.343 t/ha/an) sont proches de celles de 1.5 et1131.9t/ha/an établies par ***Rishirumuhirwa (1997)*** respectivement dans la plaine de l'Imbo et sur la crête.

En observant les moyennes des pertes en terre évaluées sur le BV Ntahangwa à 74.391t/ ha/an, au cours de la période 1991-2020, nous déduisons que l'érosion en nappe sur notre zone est modérée car elle est comprise entre 50 et 100 t/ha/an d'après ***Rishirumuhirwa (1997)*** et ***Kim et al. (2005)*** (voir **Tableau 11**). Les zones de notre BV qui présentent des risques faibles à l'érosion (< 50 t/ha/an) ***(57.8%)*** sont notamment la plaine de l'Imbo (malgré le facteur C élevé) dont la pente et les précipitations sont faibles et le sol de très bonne résistance ainsi que des parties du Mirwa et de la crête (malgré les précipitations élevées et la pente raide) dont la longueur de pente est petite, le couvert végétal dense et surtout le sol de très bonne résistance. Les surfaces les plus sensibles, qui peuvent délivrer plus de 300 t/ha/an de matériaux sont minimes ***(2.5%)*** et sont localisées principalement aux endroits où les facteurs R, K, LS et C sont élevés (**Figure 29**).

Nous basant sur le seuil de tolérance de la FAO fixé à 12.7 t/ha/an, les résultats montrent que l'érosion dans presque tous les points de notre BV **(92.52 %)** dépasse cette limite (**Figure 30**). Il est donc urgent de promouvoir des actions et des pratiques antiérosives et de conservation d'eau et de sol aussi bien pour améliorer les rendements agricoles que pour lutter contre les dégâts d'inondation en aval et de pollution du lac Tanganyika.

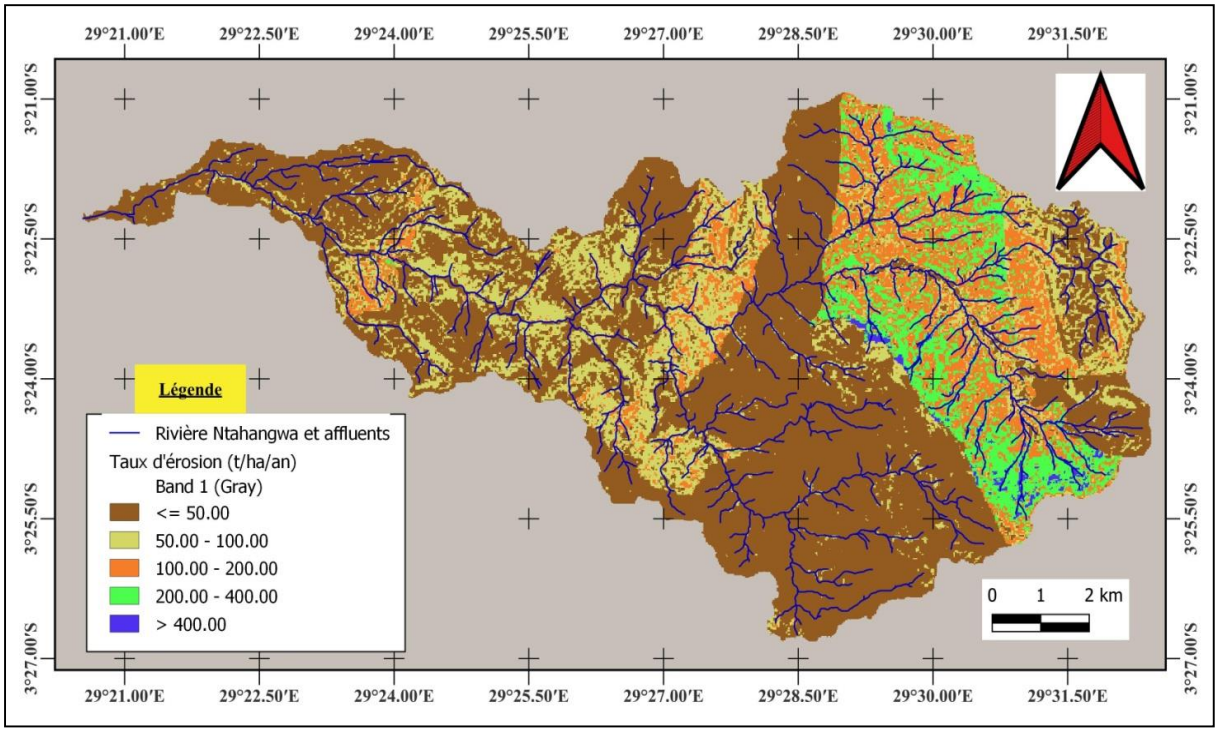


Figure 29 : Classes de vulnérabilité à l'érosion hydrique du BV Ntahangwa en 2020

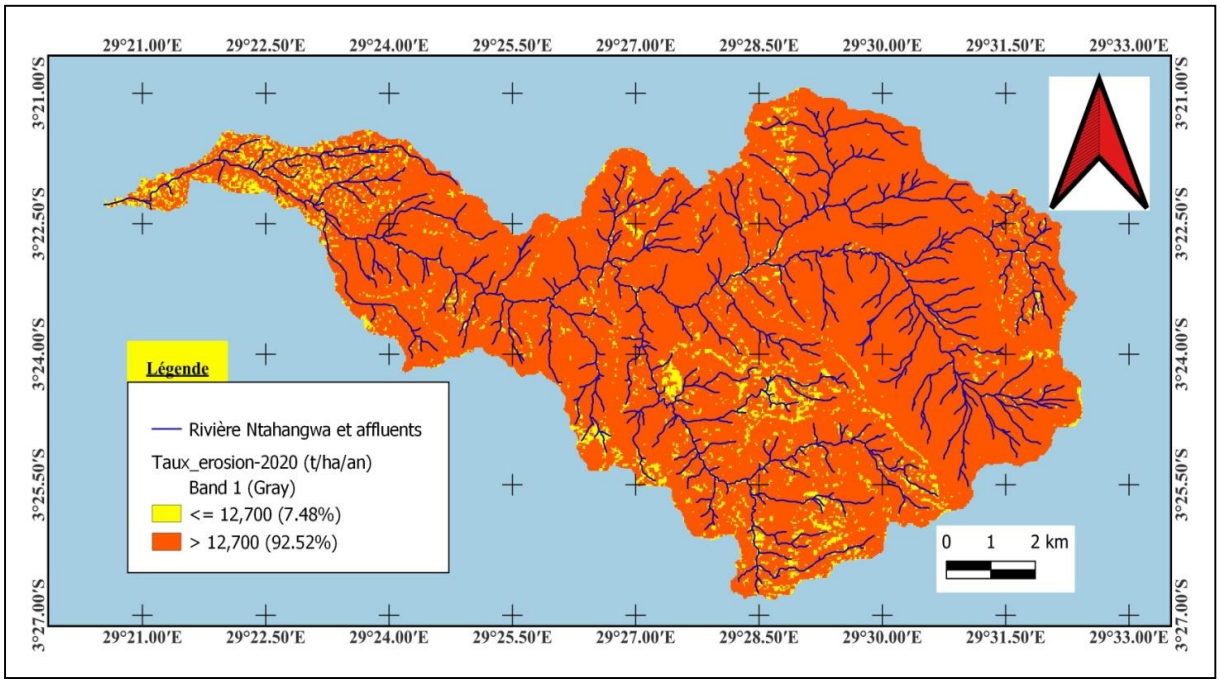


Figure 30 : Tolérance à l'érosion du BV Ntahangwa en 2020 selon la règle de la FAO.

CONCLUSION ET SUGGESTIONS

1. Conclusion générale

L'érosion hydrique des sols est aujourd'hui une des préoccupations environnementales auxquelles fait face le monde entier. La présente étude ***"Estimation quantitative des pertes en terres du bassin versant de la Ntahangwa suite à l'érosion hydrique en utilisant les systèmes d'information géographique et la télédétection"*** avait pour objectif de spatialiser et quantifier les pertes en terre sur notre zone d'étude, le bassin versant de la rivière Ntahangwa. L'approche adoptée s'est basée sur l'utilisation de l'équation universelle de pertes en terres (USLE) couplée à un Système d'information géographique et la télédétection (donc RUSLE : la version révisée de l'USLE). Il s'agit d'une équation empiriquement élaborée par Wischmeier et Smith en 1978 (A = R.K.LS.C.P) qui donne la quantité de terre (en t/ha/an) susceptible d'être décapée par l'érosion en nappe.

La spatialisation et la quantification de l'érosion sur notre zone d'étude ont été réalisées par le croisement des cinq principaux facteurs de l'équation entrant en jeu dans le processus érosif, à savoir : l'agressivité des précipitations (R), l'érodibilité des sols (K), l'inclinaison & la longueur de pente (LS), la couverture végétale (C) et les pratiques antiérosives (P). Cette modélisation de l'érosion hydrique a été mise en œuvre afin d'évaluer l'état de dégradation des sols du BV Ntahangwa et par conséquent son impact potentiel dans les processus d'engraissement de cette rivière et du lac Tanganyika.

Au cours de ces 30 dernières années (1991 – 2020), les résultats obtenus sur ce BV donnent une moyenne de pertes en sol de 74.4 t/ha/an. C'est-à-dire que, sur le BV Ntahangwa d'une superficie de ± 111.5 Km², 829 459.65 tonnes de matériaux (soit à peu près un million de tonnes) sont en moyenne arrachés chaque année. Outre la quantification du phénomène, sa spatialisation nous a permis de distinguer trois classes de vulnérabilité à l'érosion hydrique : les zones à faible vulnérabilité qui couvrent plus de la moitié du secteur d'étude *(57.8%)*, les zones à moyenne vulnérabilité *(39.7%)* ainsi que celles à forte vulnérabilité représentant une faible proportion *(2.5%)* ; par conséquent, le BV Ntahangwa n'est pas soumis à une érosion en nappe très intense.

Cependant, bien que l'érosion en nappe ne soit pas très intense, il faut signaler que le BV Ntahangwa est aussi soumis à d'intenses ravinements et glissement de terrain qui ne sont pas considérés par cette approche. Autre chose, même si cette valeur moyenne caractérise une érosion modérée sur ledit BV, elle reste de loin supérieure au seuil de tolérance proposé par la FAO. En plus, comme l'érosion en nappe est une érosion très sélective qui affecte la matière organique et l'argile qui sont les sources de fertilité du sol et que le taux d'érosion est supérieur à la norme de la FAO, il est évident que cette quantité perdue peut affecter la productivité du sol à long terme. Il est alors urgent d'améliorer les pratiques antiérosives ou les mettre en œuvre là où elles ne sont pas encore appliquées afin de minimiser les dégâts que cause l'érosion.

Notre hypothèse qui stipulait que "*le taux d'érosion hydrique en nappe sur le BV Ntahangwa n'a pas cessé d'augmenter au cours de ces 30 dernières années (1991 – 2020)*" a été

confirmée ; en effet, la valeur élevée trouvée de 1182.343 t/ha/an dépasse celle de 1131.9 t/ha/an qu'avait trouvé Rishirumuhirwa (1997). Les facteurs pente et occupation du sol jouent un rôle essentiel ; mais également, la nature du sol influence dans une moindre mesure.
Notre travail a permis d'estimer les pertes annuelles de sol dues à l'érosion hydrique en nappe sur le BV Ntahangwa ; mais nous n'avons pas pu quantifier avec précision les pertes réelles de ce BV car en effet, seule l'érosion en nappe est prise en compte dans ce modèle USLE alors que dans notre zone l'érosion par ravinement et les glissements de terrain sont courants. En plus, ce modèle ne tenant pas compte des processus de transport et sédimentation des matériaux ***(Payet et al., 2012*)**, majoritairement dépendant de la compétence des cours d'eau, cette estimation ne donne donc pas une prédiction des apports qui parviennent à la rivière Ntahangwa et le lac Tanganyika par conséquent. En effet, une grande partie de la terre arrachée de part et d'autre des champs est distribuée lors du parcours du ruissellement dans les zones d'accumulation du BV et n'arrive pas toute dans la rivière Ntahangwa.

Toutefois, avec cette méthode innovante dans notre zone d'étude, il est désormais possible de localiser les secteurs de forte érosion (en nappe) nécessitant une intervention prioritaire. Elle présente également l'avantage d'être reproductible à d'autres espaces. Par ailleurs, étant basée sur l'exploitation de données à référence spatiale, elle permet d'élaborer des documents graphiques pouvant constituer des outils d'orientation à la prise de décision en vue d'une utilisation rationnelle des sols du BV et de la gestion durable du lac Tanganyika.

2. Suggestions

Nous constatons l'évidence que notre recherche n'a pas épuisé toutes les données nécessaires pour évaluer la problématique de l'érosion sur notre zone d'étude et proposer les solutions efficaces qu'il faut apporter. C'est pour cette raison que nous aimerions émettre des suggestions pour améliorer cette étude dans le but d'enlever les lacunes qu'elle présente.

- ⇨ **A toute personne impliquée dans la gestion du bassin versant de la Ntahangwa** :

Chacune à son niveau (agriculteur, aménagiste, administratif local, le ministère en charge de l'agriculture et de l'environnement,…), nous conseillons de mettre en place des voies et moyens pour essayer de réduire au maximum cette érosion jusqu'au moins au seuil de tolérance. Les mesures de réduction de l'érosion, donc les techniques de lutte antiérosive, peuvent être soit biologiques, soit mécaniques/physiques, soit combinées. Elles peuvent consister en la création d'obstacles au ruissellement, en la protection des pentes contre l'érosion, en la gestion du sol,…

La plupart des valeurs du facteur P ont été reconnues comme variant en fonction de la pente du terrain et ayant des limites de longueur de pente ***(Laflen & Moldenhauer, 2003)*** ; il faudrait donc essayer, dans la mesure du possible, de mettre en pratique les techniques de lutte antiérosive qu'ont proposées les ministères ***MEEATU & MINAGRIE (2016)*** **(Tableau 20)**

Tableau 20: Techniques antiérosives proposées par *MEEATU & MINAGRIE (2016)*

Pente (en %)	Technique de protection recommandée
0 – 2	Billons et Haies vives
2 – 6	Fossés antiérosifs et haies vives
6 – 25	Terrasses progressives
25 – 55	Terrasses radicales
> 55	Reboisement

⇨ **A d'autres chercheurs** :

- Nous les incitons à se familiariser avec cette approche USLE, surtout sa version informatisée (RUSLE) afin (1) de produire des données sur tous les BV des rivières du Burundi qui pourront faciliter les décideurs à prendre des mesures adéquates en vue de la gestion durable des eaux et des sols du Burundi ; mais aussi (2) pour pouvoir dégager les formules plus fiables des facteurs USLE (surtout le facteur R car les stations de mesure des précipitations ne sont pas suffisantes et le facteur P car il n'existe pas encore des valeurs bien établies) qui peuvent facilement être appliquées sur tout le pays ou tout au moins sur une région naturelle.

- Comme la méthodologie (USLE) utilisée ne tient pas compte des processus de transport et de sédimentation des matériaux, nous leur proposons d'affiner ce travail, en utilisant d'autres approches, pour savoir la quantité de matériaux du BV Ntahangwa qui atteint chaque année le lac Tanganyika.

- Nous n'avons pas pu déduire la quantité et la qualité d'éléments minéraux (nutriments) se trouvant dans cette masse perdue chaque année. Nous leur demandons de continuer ce travail par des analyses de laboratoire ou autres, pour pouvoir dégager les conséquences de cette perte sur la productivité des sols des collines surplombants la plaine de l'Imbo, sur la rivière Ntahangwa et le lac Tanganyika, ce qui apportera une plus-value pour une étude pareille.

⇨ **A l'IGEBU et ses partenaires**

Nous aimerions leur demander d'augmenter le nombre de stations météorologiques, si possible, que chaque BV des grandes rivières du Burundi ait un nombre suffisant, et surtout celles à enregistrement automatique et en temps réel des données hydrométéorologiques qui sont préconisées dans le calcul du facteur R.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AEE, 2019. Les terres et les sols en Europe. Pourquoi convient-il d'utiliser ces ressources vitales et limitées de manière durable? Copenhague, Danemark.

AIEA, 1984. Sediments and pollution in waterways : General considerations, Vienna. Austria. IAEA-TECDOC-302.

Alexandridis, T., Sotiropoulou, A., Bilas, G. K. N. & Silleos, N., 2015. The effects of seasonality in estimating the C-factor of soil erosion studies. Land Degradation and Development.26, 596–603.

Århem, K. & Fredén, F., 2014. Land cover change and its influence on soil erosion in the Mara region, Tanzania – Using satellite remote sensing and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) to map land degradation between 1986 and 2013.

Arnoldus, H.M.J., 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. FAO Soils Bull., 34:39 51.

Asri, A., 2017. Cartographie de vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant d'Oued Zeddine (W. Ain Defla).

Assemian, A.E., Dje-Bi, D.S& Samaké, Y., 2020. DALOGEO: La revue de Géographie de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (Côte d'Ivoire). [En ligne] Available at: https://revuegeo-univdaloa.net/fr/publication/classification-par-arbre-de-decision-la-cartographie-des-eaux-de-surface-et-des-types# [Accès le 27 avril 2023].

Barriuso-Mediavilla, A., Del-Bosque-González, I., Salas-Tovar, E. & Sanz-Cañada, J., 2017. GIS model for potential soil erosion with the optimization of RUSLE equation. Case of study: olive oil PDO in Aragón and Andalucía Regions (Spain). AGILE 2017, p. 8.

Bidou, J.-E., 1988. Erosion des sols au Burundi. Géographie et aménagement dans l'Afrique des grands lacs, 25-29 janvier. pp. 2-20.

Bizimana, M. & Duchaufour, H., 1992. Restauration de la fertilité et conservation des eaux et des sols en régions montagneuses au Burundi. Quelques réflexions après 10 années de recherche. Bull. Réseau Erosion 12, pp. 161-178.

Bolline, A. et Rosseau, P., 1978. L'érodibilité des sols de la Moyenne et Haute Belgique. Utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte en sol. Bull. Soc. géogr. de Liège, 14, p127 - 141

Boughalem, M., Mazour, M. & Zaagane, M., 2012. Utilisation des SIG pour l'aménagement du bassin-versant de l'ISSER (Algerie). Lutte antiérosive : Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles.

Bouderbala, D., Souidi, Z., Hamimed, A. & Bouamar, B., 2018. Estimation of rainfall erosivity by mapping at the watershed of Macta.Rev. Bras. Cartogr., 71(1), pp. 274 – 294.

Brion, N., Nzeyimana, E., Goeyens, L., Nahimana, D. and Baeyens, W., 1999. Nitrogen dynamics in northern Lake Tanganyika. Pollution Control and Other Measures to Protect Biodiversity in Lake Tanganyika (UNDP/GEF/RAF/92/G32). 12p.

Brown, R.B., 2003. Soil Texture. Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Instit. of Food and Agricul. Sc., Univ. of Florida, Fact Sheet SL29, 8 p.

Buol, S., Southard, R., Graham, R. & McDaniel, P., 2003. Soil Genesis and Classification, 5th edition. Iowa, USA: Iowa State University Press, Ames.

Burengengwa, E., 1993. Etude hydrogéologique du BV Ntahangwa. Bujumbura. Univ. du Burundi. Mémoire de Licence.

Cherni, S. & Samaali, H., 2012. Estimation des paramètres de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et du SIG : cas du bassin-versant de l'Oued Tlil (Nord-Est de la Tunisie). Revista de geomorfologie. Bucarest (Roumanie), Volume 14, pp. 29-37.

Dabral, P.P., Baithuri, N. & Pandey, A., 2008. Soil Erosion Assessment in a Hilly Catchment of North Eastern India Using USLE, GIS and Remote Sensing. Water Resource Management22:1783–1798. Springer Science + Business Media B.V. 2008

Delenne, C., 2006. Extraction et caractérisation des vignes à partir de données de télédétection à très haute résolution spatiale. Application en Languedoc-Roussillon pour la constitution de bases de données géographiques. Doctoral dissertation, ENGREF (AgroParisTech).

Desmet, P.J., Govers, G., 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*. 51: 427–433.

Duchaufour, H. & Mikokoro, C., 2012. Evaluation qualitative et quantitative de l'érodibilité de différentes paysagères du Burundi : de la parcelle au micro bassin. Lutte antiérosive : Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles.

Duchaufour, H., Bizimana, M., Lebreton, M., Mikokoro, C., Barancira, O., Nijimbere, D., 1991. Rapport annuel ISABU 1989 - 1990, Partie Erosion. Département des études du milieu et des systèmes de production. Programme Agroforesterie, Sylviculture et Erosion. ISABU.

Durigon, V., Carvalho, D., Antunes, M., Oliveira, P., & Fernandes, M., 2014. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. International Journal of Remote Sensing, 35 (2), 441–453.

El Hage Hassan, H., 2011. Les apports d'un S.I.G. dans la connaissance des évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du risque érosif dans la plaine de la Bekaa (Liban) : exemple d'un secteur du Bekaa el Gharbi. Université d'Orléans.

Elleaume, N., 2022. Modélisations de contributions de la nature aux populations pour l'adaptation des socio-écosystèmes aux changements globaux dans la vallée de la Maurienne (Alpes françaises). Univ. Grenoble Alpes. Thèse de doctorat.248p.

Fox, D., 2008. Université Côte d'Azur. [En ligne] Available at: https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/degsol/DFox.php [Accès le 20 octobre 2022].

Gihimbare, A., Ndabirorere, S. & Ruzima, S., 2011. Etude sur les coûts de l'inaction contre la dégradation des sols au Burundi. Rapport final, MEEATU.

Gitas, I.Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos G.N., and Karydas, C.G., 2009. Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSeLeProceedings*8, (1) p 40-52. Thessaloniki, Greece.

Hamdi, A., 2016. Estimation de l'erosion hydrique au Maghreb et l'application sur le bassin versant Oued Trouch, ENSH, Algérie: Mémoire de Master. http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.871081.

Kagaye, M., 2015. Contribution à l'étude géologique et à l'inventaire des ressources en eau dans le Bassin versant de la Ntahangwa, Univ. du Burundi. Mémoire de Licence.

Karaburun, A., 2010. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. Ozean Journal of Applied Sciences, 3(1). 77- 85.

Karamage, F., Zhang, C., Kayiranga, A., Shao, H., Fang, X., Ndayisaba, F., Nahayo, L., Mupenzi, C., & Tian, G., 2016a. USLE-Based Assessment of Soil Erosion by Water in the Nyabarongo River Catchment, Rwanda. *Inter. Jour. of envir. Resear. And pub. health*, 13,835.

Karamage, F., Shao, H., Chen, X., Ndayisaba, F., Nahayo, L., Kayiranga, A., Kehinde Omifolaji, J., Liu, T.& Zhang, C., 2016b. Deforestation effects on soil erosion in the Lake Kivu Basin, D.R.Congo – Rwanda. Journal of Forests, 7(281), p. 17.

Karamage, F., Zhang, C., Ndayisaba, F., Shao, H., Kayiranga, A., Fang, X., Nahayo, L., Nyesheja, M.E., Tian, G. 2016c. Extent of cropland and related soil erosion risk in Rwanda. Sustainability. 8(7):609.

Karamage, F., Zhang, C., Liu T., Maganda, A. & Isabwe, A., 2017. Soil erosion risk assessment in Uganda. Forests 8(7): 1–20.DOI:10.3390/f8020052.

Khali Issa, L., Lech-Hab, K.B.H., Raissouni, A. & El Arrim, A., 2016. Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). J. Mater. Environ. Sci., 7(8), pp. 2778-2795.

Kim, J.B., Saunders, P., Finn, J.T., 2005. Rapid assessment of soil erosion in the Rio Lempa Basin, Central America, using the USLE and GIS. Environ. Manag. 36,872–885.

Kolli, M., Opp, C. & Groll, M., 2021. Estimation of soil erosion and sediment yield concentration across the Kolleru Lake catchment using GIS. Envir. Earth Sc., 80 (4), p. 1–14.

Kiunsi, R. & Meadow, M., 2006. Assessing land degradation in the Monduli District, northern Tanzania. Land Degradation Development Journal, Volume 17, pp. 509-525.

Koussa, M. & Bouziane, M., 2019. Estimation des paramètres de l'érosion hydrique par Approche SIG/USLE : cas du bassin versant de l'Oued Arab (région de Khenchela, Nord-Est de l'Algérie). Agric. and Forestry Journ., 3(1), pp. 36-45.

Kulimushi, L. C., Maniragaba, A., Choudhari, P., Elbeltagi, A., Uwemeye, J., Rushema, E. & Singh, S.K., 2021. Evaluation of soil erosion and sediment yield spatio-temporal pattern during 1990–2019. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12:1, 2676-2707.

Laflen, J. & Moldenhauer, W., 2003. Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story. WASWC Special Publication No 1.

Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C. & Daroussin, J., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. INRA, IFEN.

Leumbe Leumbe, O., Bitom, D. & Assako Assako, R., 2012. Evaluation des pertes en terres en region de montagne tropicale humide (cas du massif volcanique des Bambouto-Ouest Cameroun). Lutte antiérosive : Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles.

Lo, A., El-Swaify, S.A., Dangler, E.W. and Shinshiro, L., 1985. Effectiveness of EI_{30} as an erosivity index in Hawaii. In: S.A. E1-Swaify, W.C. Moldenhauer and A. Lo (Editors), Soil Erosion and Conservation. Soil Conservation Society of America, Ankeny, pp. 384 392.

MAEP, 2004. Etudes de gestion durable des sols dans le cadre du projet bassins versants périmètres irrigués. Rapport provisoire.

Mathieu, C., 1987. Contraintes techniques et sociales en conservation du sol et des eaux en zones à très forte densité de population : l'exemple des montagnes du Mumirwa au Burundi. Tropicultura, 5(3), pp. 137-148.

Mathieu, C., 2020. La dégradation des sols en France et dans le monde, une catastrophe écologique ignorée du monde. Acad. des sciences d'outre-mer.

MEEATU & MINAGRIE, 2016. Directives et bonnes pratiques de gestion durable des terres au Burundi.Bujumbura.

MEEATU, 2011. Stratégie nationale et plan d'action de lutte contre la degradation des sols 2011-2016.Bujumbura.

MEEATU, 2013. Plan régional de mise en œuvre de la Stratégie Nationale et Plan d'Action sur la Biodiversité en zones écologiques de Mumirwa et de la Crête Congo-Nil.Bujumbura.

MEEATU, 2014. Cinquième rapport du Burundi à la convention CDB.Bujumbura.

Mhangara, P., Kakembo, V. & Lim, K., 2012. Soil erosion risk assessment of the Keiskamma catchment, South Africa using GIS and remote sensing.Environ. Earth Sci., Issue 65, p. 2087–2102.

MINATET, 2005. Programme d'Action National sur la lutte contre la dégradation des terres (PAN).Bujumbura.

Morgan, R.P.C., 2005. Soil erosion and conservation. 3rd ed. Blackwell Publishing Ltd.

Mve, I. & Becker, A., 2020. Etat des lieux des services hydrologiques et météorologiques du Burundi. Rapport final de Deltares. Bujumbura.

Nachtergaele, F., Petri, M., Biancalani, R., Van Lynden, G. & Van Velthuizen, H., 2010. Global Land Degradation Information System (GLADIS). Beta Version. An information database for land degradation assessment at global level. LADA, Technical Report: No. 17.

Nacishali Nteranya, J., 2020. Cartographie de l'érosion hydrique des sols et priorisation des mesures de conservation dans le territoire d'Uvira (RD Congo). VertigO.

Ndikubwayo, E., 2019. Contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain de la partie nord de la mairie de Bujumbura, Burundi.ULiège & UCLouvain. Mémoire de Master.

Ngarambe, V., 1985. Influence des pratiques culturales sur le développement de l'érosion hydrique en zone de culture intensive du Mumirwa. Mém. F.ét., Fac. Sc. Agro., texte ronéot., 114p. Univ. du Burundi. Bujumbura

Nibigira, L., 2018. Etude des risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans la région des lacs Kivu et Tanganyika, Univ. de Liège. Thèse de doctorat.

Nijimbere, G. & Riveros Lizana, C., 2019. Assessment of soil erosion of Burundi using RS and GIS by RUSLE model. RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 27(1), pp. 17-28.

Nijimbere, S., Kaboneka,S., Ndihokubwayo, S., Irakoze, W. et Ndikumana, J., 2020 : Caractérisation physico-chimique des sols d'une exploitation agricole du Mumirwa en commune Rumonge (Burundi). Revue de l'Univ. du Burundi/Série-Sciences Exactes et Naturelles. Volume 29 (2020) 34-44.

Nill, D., Schwertmann, U., Sabel-Koschella, U., Bernhard, M., Breuer, J., 1996. Soil erosion by water in Africa. Principles, prediction and protection.

Nsabimana, S., 1999. Etude quantitative de l'érosion hydrique en milieu rural du Burund. Bulletin du RESEAU EROSION n° 19, pp. 417-426.

Nshimirimana, B., 2015. Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le BV Ntahangwa : cas des glissements de terrain. Univ. du Burundi. Mémoire de Licence.

Ntakiyiruta, P., Nahimana, D. & Ntakimazi, G., 2017. Contribution à l'estimation quantitative des nutriments apportés par la rivière Ntahangwa au lac Tanganyika. Afrique SCIENCE 13(1) (2017) 360 – 370. ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.info3.

Ntakimazi, G., 2006. Les écosystèmes naturels humides. Etude sectorielle.Projet de Préparation du PANA.Bujumbura.

ONU, 2004. Les résidus de pesticides, une bombe à retardement dans les pays pauvres. Communiqués de presse, Couverture des réunions & communiqués de presse: SAG/288.

Paul-Hus, C., 2011. Méthodes d'étude de l'érosion et gestion des sites dégradés en Nouvelle-Calédonie. Centre de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, Québec. Mémoire.

Payet, E., Dumas, P. & Pennober, G., 2012. Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. VertigO, 11(3).

Panagos, P., Borrelli, P., & Meusburger, K., 2015. A new European slope length and Steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water. Jour. Of Geosc., 5, 117–126.

Parveen, R. & Kumar, U., 2012. Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. *Jour. Of Geog. Inform. System*, 2012, 4, p.588-596.

Pham, T. G., Degener, J. & Kappas, M., 2018. Integrated universal soil loss equation (USLE) and GIS for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. International Soil and Water Conservation Research, Volume 6, p. 99–110.

Prasuhn, V. 2007 : Quelle quantité de terre perdue? Fiche technique: EROSION. Editeur: AGRIDEA, 1000 Lausanne 6 et 8315 Lindau.

Printemps, J., 2007. Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie : Utilisation de l'Equation Universelle de Perte de Sol assistée d'un SIG sur les communes de Voh, Koné et Pouembout. Univ. Joseph Fourier. Nouv.-Caléd. IRD-Nouméa.

Ranaivoson, R.M., 2017. Modélisation de l'érosion hydrique par le modèle empirique RUSLE dans le bassin versant du lac Itasy. Mémoire de Master. Univ. d'Antananarivo.

Renard, K.G., & Ferreira, V.A., 1993. RUSLE Model Description and Database Sensitivity. Journal of Environment Quality, 22(3), 458.

Renard, K. & Freimund, J., 1994. Using monthy precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE.J. Hydrol., Volume 157, p. 287–306.

Renard, K., Foster, G., Weesies, G. & Porte, J., 1991. RUSLE-Revised universal soil loss equation.Journal of Soil and Water Conservation, Volume 46(1), pp. 30-33. www.swcs.org

Rijkee, P., 2016. Erosion Potential and Farmer Perceptions in Makamba, Burundi.Wageningen University, the Netherlands. MSc thesis.

Rishirumuhirwa, T., 2005. Lutte antiérosive et recherche en gestion et conservation sols au Burundi. Erosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols. Actes des journées scientifiques du réseau érosion et GCES de l'AUF Antananarivo (Madagascar). Editions scientifiques GB. Paris, France. ISBN: 2-84703-032-8.

Rishirumuhirwa, T., 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro – Burundi), Lausanne.Thèse n° 1636: EPFL.

Rishirumuhirwa, T., 1999. Acquis de la recherche en gestion conservatoire de la fertilité, de l'eau et du sol au Burundi. Bulletin du RESEAU EROSION n° 19, pp. 287-296.

Rishirumuhirwa, T., 2012. Effets des crises politiques au Burundi sur les processus érosifs dans la région du Mirwa Central. Lutte antiérosive : Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. CDrom E. Roose eds, Editions IRD, Montpellier.

Roose, E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. ORSTROM, trav. et doc. n° 78, 108p. Paris

Roose, E., 1990. Un programme national de Gestion Conservatoire de l'Eau et de la fertilité des Sols (G.C.E.S.) au Burundi. Rapport de Mission effectué au Burundi du 26/2 au 16/3/1990). ORSTOM centre Montpellier.

Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO, 70. Rome.

Roose, E., Boli, Z. & Rishirumuhirwa, T., 2015. Les sols tropicaux et leur dégradation en fonction des types d'érosion. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditérranéens : contribution à l'agroécologie. Version préliminaire. E. Rooseeds, Editions IRD, Montpellier.

Roose, E., Sabir, M. & Laouina, A., 2010. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. IRD Éditions.

Rouse, J.W., R.H. Haas, R.H., Deering, D.W. & Sehell, J.A. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Remote Sensing Center, Final Rep. RSC 1978-4, Texas A&M Univ., College Station.

Sabushimike, J.-M., 2015. Vulnérabilité des bassins versants de la région des Mirwa : impacts socio-économiques et environnementaux. https://www.artes-research.com/wp-content/uploads/2015/03/CRTM-Expos%C3%A9-Prof-Sabushimike-JM-LA-VULNERABILITE-DES-MIRWA.compressed.pdf.

Sadiki, A., Bouhlassa, S., Auajjar, J., Faleh, A., & Macaire, J.-J., 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. Bulletin de l'Institut Scientifique, Issue 26, pp. 69-79.

Sebahene, M., Nduwayo, M., Songore, T., Ntungumburanye, G. and Drieu, O. (ed.), 1999. Travaux Hydrologique et d'échantillonnage sédimentologique du Bassin du Lac Tanganyika (Burundi). Pollution Control and Other Measures to Protect Biodiversity in Lake Tanganyika (UNDP/GEF/RAF/92/G32). 74p. http://www.ltbp.org/FTP/SSS8.PDF

Sabir, M., 1986. L'érosion hydrique et sa quantification, Mémoire de DEA: Université de Paris XI & ORSTOM. France.

Samake,O., 2017. Estimation de l'érosion des sols sous culture en zone soudanienne du Mali : cas du village de Kani (cercle de Koutiala). Mémoire. Institut polytechnique rural de formation et de recherche appliquée (IPR/IFRA) de Katibougou, Mali.

Serrat-Capdevila, A., Lajaunie, M. L., Bonzanigo, L., Figueira, P., Bench, R., 2020. Port Access in Lake Tanganyika: Key Challenges and Recommendations. Doc. of the World Bank.

Simbakwira, N., 1995. Evaluation de l'indice d'agressivité climatique de l'équation de Wischmeier dans les stations de Tora et de Teza en région du Mugamba. Mémoire ISA. Univ. du Burundi, 78 p.

Sindayihebura, A., 2017. Upgrading of land resources datasets to support rural land use planning in Burundi. Thèse de doctorat nº 1436, Fac. des Sc. de la Bio-ingén., KU Leuven.

Stone, R.P. & ***Hilborn, D., 2000.*** Equation universelle des pertes en terre (USLE).Fiche technique du MAAARO, commande nº 00-002. AGDEX 572/751. Ontario, Canada.

Suriyaprasit, M. & Shrestha, D. P., 2008. Deriving land use and canopy cover factor from remote sensing and field data in inaccessible mountainous terrain for use in soil erosion modelling. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(Part B7).

Vaezi, A., Sadeghi, S., Bahrami, H. & Mahdian, M., 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. Geomorphology, Volume 97, p. 414 – 423.

Van der Knijff, J., Jones, R. & Montanarella, L., 1999. Soil erosion assessment in Italy. European Soil Bureau, Joint Research Centre (JRC) of the European Commission.

Vandelannoote, A., Robberecht, H., Deelstra, H., Vyumvuhore, F., Bitetera, L., & Ollevier, F., 1996. The impact of the River Ntahangwa, the most polluted Burundian affluent of Lake Tanganyika, on the water quality of the lake. *Hydrobiologia*, *328*, 161-171.

Vandelannoote, A., Deelstra, H., Ntakimazi, G., Kimbadi, S., & Ollevier, F., 2002. Sediment pollution at the North End of Lake Tanganyika. *Bulletin des séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer*, *48*(4), 515-527

Wall, G., Coote, D., Pringle, E. & Shelton, I.J. (éditeurs), 2002. RUSLE-CAN — Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada: No de la contribution AAC2244F.

Wischmeier, W. H. & Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537.

Xiong, M., Sun, R. & Chen, L., 2019. Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling.. Progress in Physical Geography, p. 1–19.

ANNEXES

***ANNEXE 1*: Les précipitations mensuelles moyennes enregistrées aux trois stations météorologiques proches du BV Ntahangwa de 1991 à 2020.**

STATION METEO-GISOZI

ANNEE	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1991	197.6	221.9	108.0	207.4	217.0	41.2	9.0	0.6	43.8	219.2	146.8	181.5
1992	138.8	222.4	145.1	160.2	88.1	8.4	0.0	0.6	36.4	166.8	135.5	125.8
1993	140.9	122.2	141.4	155.6	175.7	0.8	0.0	15.7	0.4	119.6		110.1
1994	153.6	241.7	163.5	78.2	80.7	11.5	0.2	1.8	54.0	128.8	260.7	166.3
1995	130.6	126.7	178.4	177.5	123.7	39.1	0.0	0.0	10.7	165.4	187.7	95.5
1996	213.2	266.3	307.2	176.0	46.5	0.0	0.3	15.0	158.4	49.1	113.1	192.9
1997	144.2	75.2	244.9	285.5	140.8	24.5	0.0	13.7	9.3	181.8	329.3	290.5
1998	196.8	160.6	227.6	129.5	245.7	2.7	6.2	8.8	42.4	105.0	56.3	83.6
1999	193.3	95.4	295.3	168.9	50.4	0.0	0.0	50.7	70.8	90.1	188.5	253.9
2000												
2001	251.0	124.6	116.6	218.9	143.3	2.9	6.6	10.4	162.8	156.8	104.7	191.5
2002	225.9	103.9	170.1	259.0	75.5	0.0	0.0	0.0	72.4	102.9	147.6	174.8
2003	167.9	184.6	200.8	230.6	94.5	2.6	0.0	1.5	102.7	161.0	141.8	105.8
2004	235.0	138.7	168.0	209.5	4.3	0.0	0.0	2.4	111.6	63.3	185.6	192.6
2005	223.5	71.0	82.7	110.1	182.2	2.1	0.0	62.5	29.3	76.5	103.2	172.1
2006	211.2	161.5	181.2	202.4	235.9	0.0	1.8	31.4	44.4	49.1	317.2	267.0
2007	184.2	210.5	111.9	237.6	110.5	22.0	22.5	41.0	53.6	123.3	178.6	138.3
2008	213.5	272.0	183.8	133.9	20.0	15.5	6.0	13.8	89.0	230.9	81.3	138.3
2009	281.2	209.3	232.8	189.9	103.4	8.3	22.5	24.4	41.5	145.9	178.2	197.2
2010	178.5	159.9	238.0	149.8	69.4	8.8	0.0	0.0	89.7	209.6	165.5	222.4
2011	188.1	145.6	160.0	247.3	119.5	46.0	24.2	9.9	93.5	99.4	301.0	260.3
2012	104.7	202.3	193.7	287.8	166.0	29.5	0.9	41.4	70.9	185.0	156.2	262.2
2013	132.4	160.1	156.9	206.1	58.5	0.0	0.0	23.0	147.4	306.4	578.3	279.5
2014	217.3	213.2	176.4	185.2	16.5	9.6	4.9	42.1	224.7	224.7	172.7	224.3
2015	179.2	256.3	229.9	255.8	113.1	10.0	0.0	6.7	76.1	234.3		215.9
2016	422.6	381.3	137.4	212.4	38.4	4.3	0.0	11.0	35.9	161.5	106.4	192.6
2017	127.1	163.3	248.2	139.3	63.9	0.0	2.9	26.4	23.6	151.7	210.7	94.1
2018	208.4	128.5	168.8	247.5	122.5	0.2	2.2	72.8	45.1	103.2	167.0	176.7
2019	140.6	150.1	233.4	149.8	33.2	6.5	7.3	28.5	157.7	310.3	223.9	283.0
2020	263.9	186.4	326.2	303.9	41.6	8.6	3.3	17.0	59.8	69.4	176.1	170.8

STATION METEO-BUGARAMA

ANNEE	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1991	53.2	100.7	107.0	204.2	196.3	126.0	5.5	10.1	38.6	205.2	127.9	170.7
1992	181.4	172.9	226.9	242.8	158.7	40.1	1.4	34.6	39.8	206.7	225.7	182.4
1993	161.1	177.6	287.5	137.9	198.6	13.7	0.0	5.4		37.4		199.8
1994	147.0	165.1	272.0	261.6	89.2	0.0	0.0	8.4	31.0		410.9	344.5
1995	332.3	129.7	201.7	197.6	173.1	91.5	0.7	0.0	25.2	222.1	211.6	97.8
1996	222.0	266.8		271.4	27.3	0.2	0.7		2.5	80.3	84.5	
1997			160.9	136.9	151.9	5.5	0.0	12.5	0.6	176.3	312.6	200.8
1998	231.6	232.1	366.6	299.0	109.1	0.0	0.0	28.7	14.0	149.3	82.6	123.7
1999	251.7	56.4	347.3	164.1	19.3	0.0	0.0	125.9	123.2	163.0	217.6	251.6
2000	158.7	92.6	213.2	92.5	14.3	0.0	0.0	0.0	9.4	173.6	262.5	213.2
2001	226.3	117.6	320.5	283.6	86.1	17.3	48.3	47.7	155.7		200.7	173.4
2002	302.5	116.5	232.3	289.0	90.5	0.0	0.0			57.2	220.4	206.0
2003	186.4	167.9	260.9	169.6	207.6	1.8	0.6	8.6	59.8	148.9	135.7	170.0
2004	133.7	119.8					4.8	10.1	196.9	134.4	193.1	310.1
2005	235.0		201.5	125.4	183.5	36.9	0.0	66.2	58.3	82.0	122.9	107.1
2006	156.5	166.3	200.5	289.0	0.0	0.0	0.0	27.8	34.2	143.8	364.4	331.6
2007	232.7	123.0	97.1	202.8	54.9	87.2	25.7	53.9	66.4	232.3	146.3	116.9
2008	127.8	170.4	163.0	210.7	61.3	67.2	23.6	12.3	98.4	98.7	184.2	268.3

2009	240.4	180.0	232.2	182.2	119.1	39.6	2.7	6.8	77.1	79.0	371.2	213.2
2010	207.9	206.8	249.5	185.0	100.7	6.5	0.0	0.0	152.6	80.4	160.2	178.7
2011	93.4	102.1	224.5	162.7	214.6	59.9	17.6	12.1	91.9	183.8	251.8	235.7
2012	51.0	116.5	182.4	305.2	168.9	91.8	2.8	53.4	107.3	190.2	188.2	273.3
2013	191.1	103.7	181.9	203.9	55.2	0.0	0.0	40.0	159.8	104.4	161.7	206.4
2014	165.7	215.0	84.0	112.8	11.8	108.5	9.2	71.4	205.6	307.4	124.8	197.7
2015	162.8	122.5	185.9	267.3	178.4	27.0	0.0	0.0	78.2	269.7	233.3	213.2
2016	350.2	282.8	195.4	237.4	73.7	29.1	0.0	6.2	73.2	169.3	170.2	95.5
2017												
2018												
2019					67.2	82.2	4.8	0.0	204.9	349.0	273.8	573.7
2020	246.6	134.5	419.9	275.0	144.2							239.1

STATION METEO-BUJUMBURA AEROPORT

ANNEE	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1991	45.6	128.0	131.7	93.9	71.6	5.5	8.0	3.6	13.5	110.7	79.8	111.0
1992	64.8	85.9	96.5	52.4	108.8	7.7	0.0	0.0	15.7	33.0	84.8	68.2
1993	83.2	134.3	116.1	64.5	59.0	0.5	0.0	0.0	1.2	28.7	71.1	56.7
1994	156.8	11.5	59.2	109.1	35.8	0.6	0.0	10.0	5.7	64.6	100.4	104.4
1995	29.4	139.9	20.2	104.8	51.4	9.7	0.0	0.0	6.8	66.5	55.4	0.0
1996	116.5	42.8	178.5	81.3	7.6	20.4	0.0	1.2	39.1	105.0	51.6	77.0
1997	19.4	18.6	0.0	90.5	31.6	0.0	0.0	0.0	9.4	91.8	10.8	
1998	105.7	114.9	217.4	78.8	93.6	19.9	3.8	2.0	27.3	41.1	31.2	57.8
1999	65.8	13.9	147.1	92.5	25.3	0.3	4.5	30.3	60.1	48.2	128.3	159.6
2000	103.1	37.0	149.4	42.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	40.2	203.8	150.7
2001	113.1	77.2	99.9	97.9	9.3	49.8	7.6	0.0	62.3	67.6	82.9	74.6
2002	135.4	122.1	124.4	79.5	34.0	0.0	0.0	0.0	4.8	74.9	57.1	133.3
2003	46.5	60.9	100.8	68.1	25.0	1.9	0.5	2.5	54.6	78.4	68.0	38.3
2004	103.2	23.1	162.8	93.7	0.7	0.0	1.5	1.7	73.6	37.1	45.4	214.7
2005	195.2	61.0	145.9	70.2	130.6	1.1	0.0	4.8	4.2	33.5	116.1	55.0
2006	87.0	121.0	111.1	111.2	88.9	2.5	0.9	38.1	32.3	63.0	157.1	116.0
2007	142.7	81.7	86.5	149.9	22.2	10.7	52.3	6.9	29.9	112.8	63.4	94.6
2008	99.0	166.7	71.4	69.2	23.2	89.2	15.1	3.6	31.9	69.7	65.1	37.0
2009	125.5	148.8	184.8	133.3	86.8	1.6	0.0	3.5	5.0	67.6	249.0	225.8
2010	210.4	124.0	155.8	63.7	33.8	4.4	3.7	0.0	41.2	50.9	90.8	79.0
2011	75.6	88.4	173.3	116.9	64.3	33.3	23.6	4.6	86.1	67.5	108.9	194.8
2012	68.4	96.2	43.6	104.1	54.4	46.8	0.0	29.5	33.6	172.7	56.7	246.0
2013	91.6	66.0	85.9	113.4	37.8	0.0	0.0	13.5	79.4	12.4	59.5	123.2
2014	113.1	160.4	80.6	55.6	5.7	18.5	0.0	22.5		76.4	45.2	196.3
2015	76.2	136.4	54.7	100.4	43.0	2.9	0.0	6.4	23.1	118.9	97.5	118.6
2016	113.7	110.5	31.4	78.8	27.5	0.0	0.0	0.0	22.4	4.6	53.6	22.9
2017	37.7	123.1	119.9	54.0	34.3	0.0	0.0	21.0	25.4	28.1	126.9	50.4
2018	85.7	120.6	126.7	239.0	91.2	3.0	21.6	16.8	4.3	42.1	112.4	100.0
2019	91.0	108.3	100.2	108.3	38.5	9.9	5.1	6.2	54.8	133.5	124.2	177.9
2020	119.7	103.2	96.3	132.3	13.3	14.0	0.0	22.1	39.9	21.7	155.5	192.3

<u>ANNEXE 2</u>: Calcul des PAM sur les 3 périodes considérées au niveau des 3 stations météo.

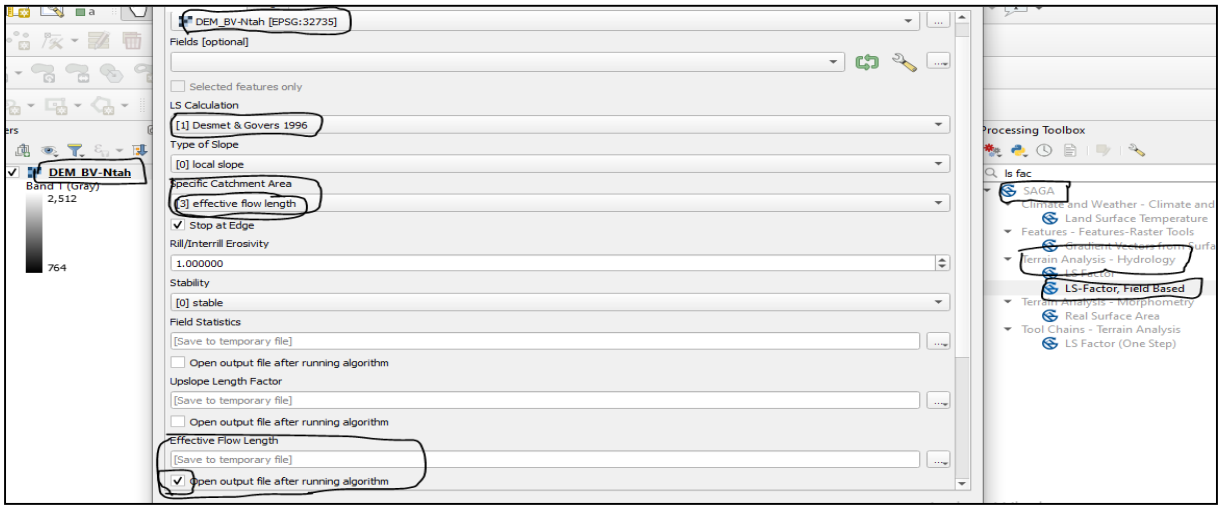
$$\mathbf{PAM_x} = \sum_{12}^{1} \mathbf{PMM_x}$$

$\mathbf{PAM_x}$ et $\mathbf{PMM_x}$: les précipitations annuelles &mensuelles moyennes de la période 1991 – 2020.

Station météo	Longitude (en degrés)	Latitude (en degrés)	PAM (en mm)
Bugarama	29.55	-3.31	1634.2
Gisozi	29.68	-3.56	1501.6
Bujumbura (Aérop.)	29.32	-3.32	766.6

ANNEXE 3 : Détermination du facteur LS dans SAGA GIS.

On charge le modèle MNT dans l'interface de QGIS. Puis, dans l'outil de traitement, on ouvre l'outil de traitement LS-factor Field based de SAGA GIS *(Outil Traitements -> SAGA GIS ->Terrain Analysis – Hydrology ->LS-factor Field based)*, ensuite on choisit le modèle de calcul de LS de Desmet et Govers (1996).



ANNEXE 4 : Traitement d'images avec QGIS pour le calcul du NDVI

1° Téléchargement d'images

Les images Landsat 8 que nous avons utilisées ont été téléchargées sur le site de l'**USGS *(https://earthexplorer.usgs.gov/)***. Pour le calcul de NDVI, on a besoin des bandes rouge et proche infrarouge (c-à-dB4 et B5). Les valeurs de ces bandes téléchargées sont données en unités de radiance. Elles doivent être corrigées/converties pour avoir des données de réflectance qui ne dépendent pas des conditions atmosphériques.

2°Processus de traitement

On charge dans l'interface de QGIS les bandes (rouge & infrarouge) à utiliser. On ouvre ensuite l'outil **Traitements -> GDAL ->Conversion raster -> Convertir.** Pour la suite, on utilisera le raster converti pour toutes les opérations futures.

3° Calcul du NDVI

Pour le calcul du NDVI, on utilise généralement une correction en TOA (Top of Atmosphere) en réflectance. Pour convertir les données d'une bande (radiances) en TOA réflectances, on utilise la formule suivante:

$$R_{TOA} = \frac{MP * Q + AP}{\sin \theta}$$

- R_{TOA} : est la réflectance TOA corrigée de l'incidence solaire.
- MP : Facteur de redimensionnement multiplicatif spécifique à la bande à partir des métadonnées *"REFLECTANCE_MULT_BAND_X"*, où X est le numéro de bande.
- AP : Facteur de redimensionnement additif spécifique à la bande à partir des métadonnées *"REFLECTANCE_ADD_BAND_X"*, où X est le numéro de bande.
- Q : valeur fournie dans la bande X du pixel.

- θ : angle d'élévation du soleil au centre de l'image (en radians), fourni dans les métadonnées : *SUN_ELEVATION*.

Ces données nécessaires aux différentes corrections **(Figure A)** sont obtenues à partir des métadonnées contenues le "**document texte** terminé par **MTL" (Figure B)**.

- **Exemple de calcul pour l'image Landsat 8 avec QGIS**

Pour calculer la correction atmosphérique de la Bande X (rouge : X = 4 ; infrarouge : X = 5), on a besoin des deux valeurs **MP et AP** correspondantes à cette bande et, pour la correction finale, la valeur de θ.

On ouvre alors la calculatrice raster (**Boîte à outils traitements -> GDAL -> Divers raster -> Calculatrice raster**) ; on entre la formule de calcul correspondant aux formules de $\mathbf{R_{TOA}}$ avec les valeurs obtenues du document texte MTL.

Exemple pour la ***B4 : ((0.00002 * A)-0.1)/0.87646401*** **(Figure C)**.

Une fois exécutée la commande, nous retrouvons une nouvelle image avec des valeurs de réflectance au lieu de radiances. Pour les trois périodes considérées, les différentes valeurs utilisées sont reprises dans le **Tableau A**.

Ensuite, dans calculatrice raster, on détermine le NDVI en affectant A à la bande 5 (proche IR), B à la bande 4 (rouge) et on entre la formule ***(A-B)/(A+B)*****(Figure D).** A la fin, on peut appliquer un gradient de couleurs pour pouvoir effectuer la classification des couverts végétaux.

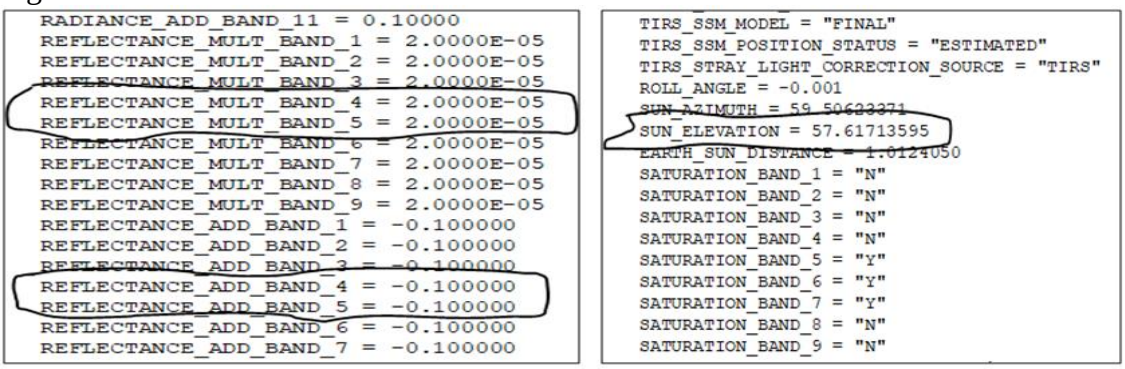


Figure A : Les métadonnées de l'image Landsat 8 pour le calcul de NDVI.

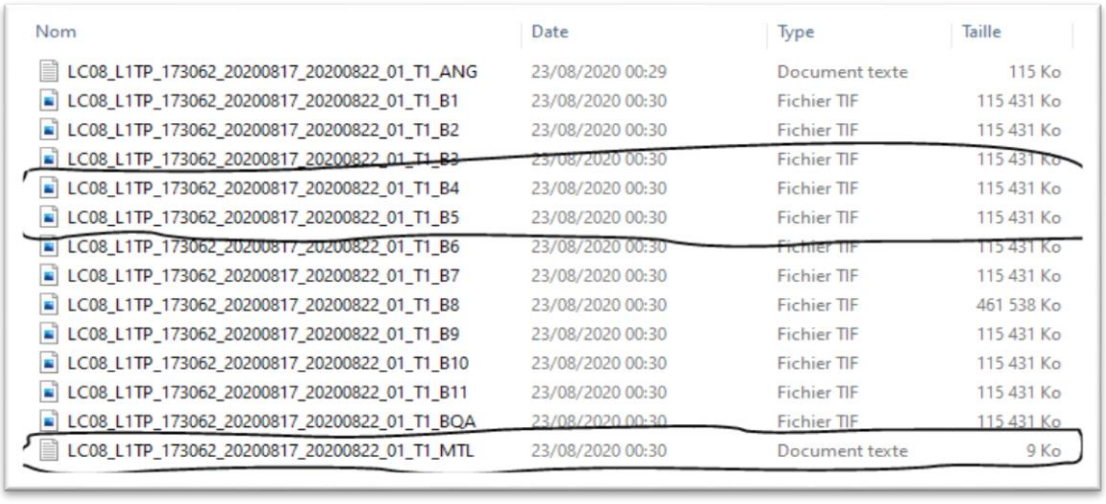


Figure B : répertoire contenant une série de fichiers de l'image Landsat 8 OLI &TIRS.

Tableau A : Les valeurs des métadonnées des bandes rouges et proche-infrarouges des images Landsat 8 utilisées dans notre travail.

Bande	MP	AP	θ (en radians)	sinθ
Red (B4)	$2.0*10^{-5}$	0.1	57.617	0.876
NIR (B5)	$2.0*10^{-5}$	0.1		

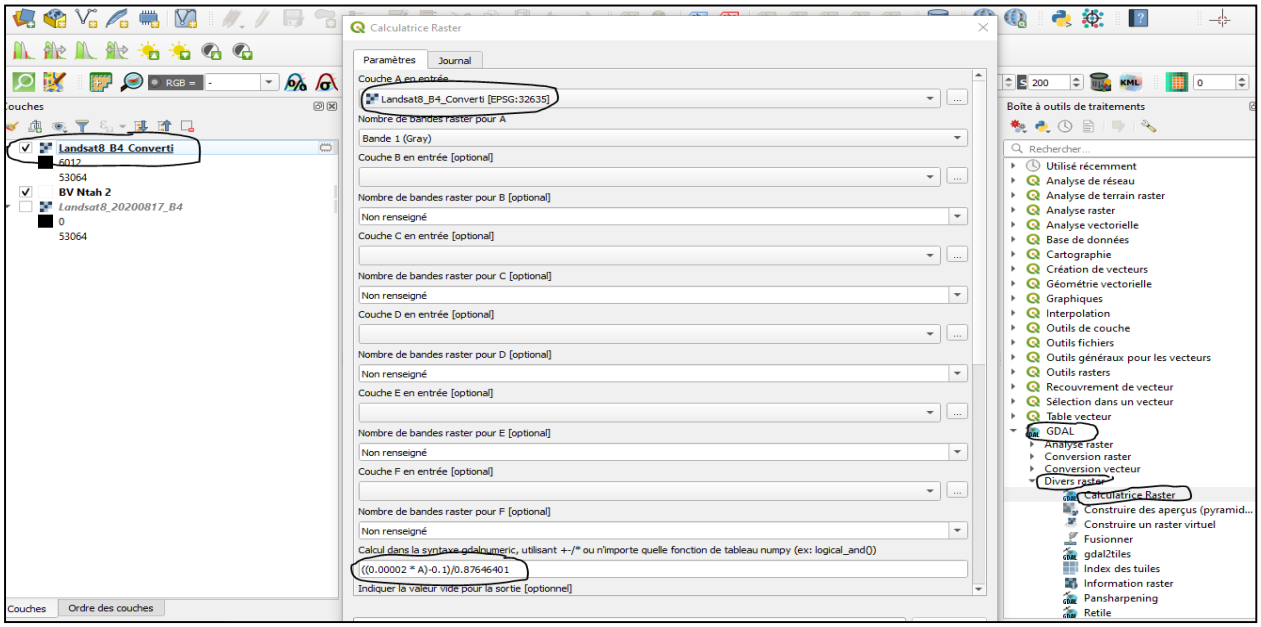


Figure C : Correction en réflectance TOA de la bande 4_Landsat8 convertie de notre zone.

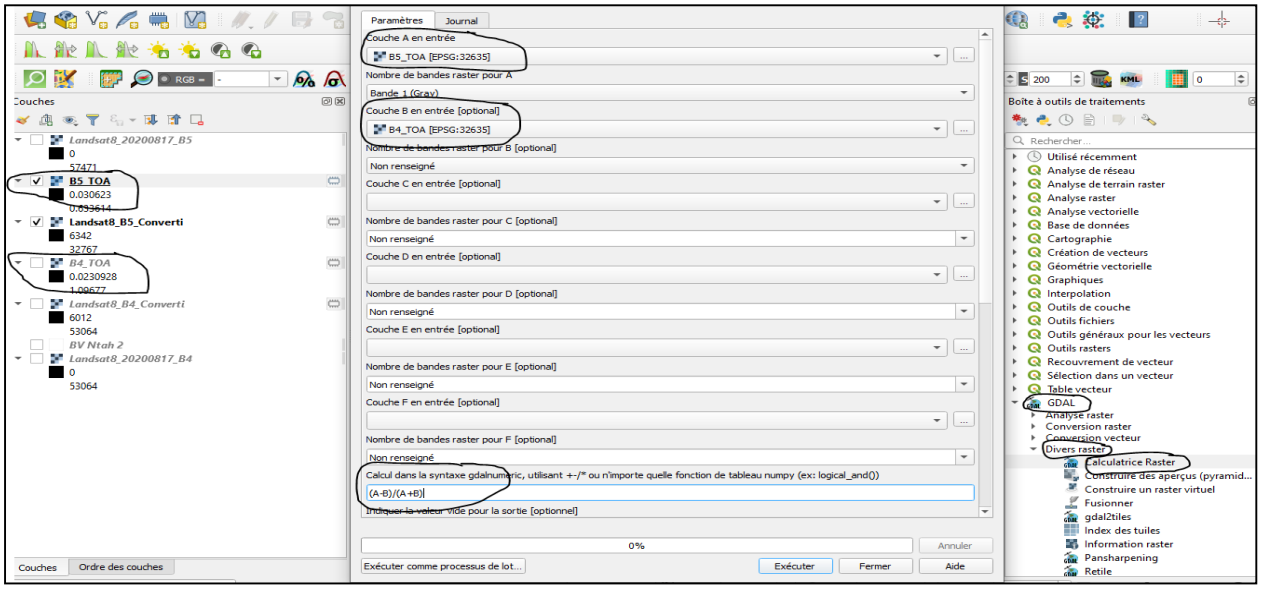


Figure D : Calcul de NDVI de la bande 5 Landsat 8 du 17/08/2020 pour le BV Ntahangwa.

SOURCE :

Tutoriel classification d'images avec QGIS :
https://www.sigterritoires.fr/index.php/tutoriel-classification-dimages-avec-qgis-2-pretraitement-et-exploration-des-donnees/

***ANNEXE 5* : Détermination du nombre de pixels des couches raster**

Voici un extrait du *rapport sur les valeurs uniques de la couche raster*, un algorithme de QGIS donnant le nombre et la superficie de chaque valeur unique d'une couche raster donnée.



Fichier analysé: G:/Mon draft_mémoire/LES FACTEURS USLE_BV NTAH/R Fact/R_Factor-2020-UTM.tif (Bande 1)

Emprise: 760238.92819999999657273,9618605.1863000001758337 : 782336.00740000000022352,9629558.4594000000506639

Projection: EPSG:32735 - WGS 84 / UTM zone 35S

Largeur en pixels: 1982 (unités par pixel 11.1489)

Hauteur en pixels: 993 (unités par pixel 11.0305)

Nombre total de pixels: 1968126

Nombre de pixels NODATA: 1061920

Valeur	Nombre de pixels	Surface (m²)
236.769	1	122.9775650491519
236.784	2	245.9551300983038
236.807	1	122.9775650491519

Fichier analysé: G:/Mon draft_mémoire/LES FACTEURS USLE_BV NTAH/C Fact/2020-C fact.tif (Bande 1)

Emprise: 760005.0000000000000000,-381375.0000000000000000 : 782295.0000000000000000,-370485.0000000000000000

Projection: EPSG:32635 - WGS 84 / UTM zone 35N

Largeur en pixels: 743 (unités par pixel 30)

Hauteur en pixels: 363 (unités par pixel 30)

Nombre total de pixels: 269709

Nombre de pixels NODATA: 145771

Fichier analysé: G:/Mon draft_mémoire/LES FACTEURS USLE_BV NTAH/K Fact/K-Factor.tif (Bande 1)

Emprise: 760000.34719999999601394,9618625.4693999998271465 : 782320.34719999999601394,9629515.4693999998271465

Projection: EPSG:32735 - WGS 84 / UTM zone 35S

Largeur en pixels: 744 (unités par pixel 30)

Hauteur en pixels: 363 (unités par pixel 30)

Nombre total de pixels: 270072

Nombre de pixels NODATA: 146133

Valeur	Nombre de pixels	Surface (m²)
0.02	44502	40051800
0.04	20933	18839700
0.07	19978	17980200
0.13	11923	10730700
0.18	26603	23942700

Détermination du nombre de pixels occupés par notre zone.

- ✓ Sur base de la couche raster C-factor :
  - Nbre total de pixels = 269709
  - Nbre de pixels sans données (nodata) = 145771
  - ⇨ **Nbe de pixels avec données** = 269709 – 145771 = **123938**

- ✓ Sur base de la couche raster R-factor :
  - Nbre total de pixels = 1968126
  - Nbre de pixels sans données = 1061920
  - ⇨ **Nbe de pixels avec données** = 1968126 – 1061920 =**90620**