



Université catholique de Louvain (UCLouvain)

Faculté des bioingénieurs

Earth and Life Institute/Environmental Sciences

**Caractérisation de l'état de dégradation des
terres par l'érosion hydrique dans le Sud-Kivu
montagneux à l'Est de la R.D. Congo**

Aimé Heri-Kazi Bisimwa

Avril 2020

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de
docteur en sciences agronomiques et ingénierie
biologique de l'UCLouvain

Membres du jury :

Président : Prof. Marnik Vanclooster (UCLouvain, Belgique)

Superviseur : Prof. Charles Biolders (UCLouvain, Belgique)

Lecteurs : Prof. Veerle Vanacker (UCLouvain, Belgique)

: Prof. Aurore Degré (ULiège, Belgique)

: Prof. Ann Verdoodt (UGhent, Belgique)

: Dr. Nsharwasi Léon Nabahungu (IITA/D.R. Congo)

Crédits

Cette thèse de doctorat (PhD) a été financée grâce à une bourse doctorale 'Coopération au développement' de l'Université catholique de Louvain (UCLouvain), complétée plus tard par celle de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES). Une grande partie des recherches sur le terrain a été financée par le projet VLIR-UOS en partenariat avec la Faculté des sciences agronomiques de l'Université Catholique de Bukavu (UCB). Je suis très reconnaissant envers toutes ces organisations pour leur confiance et leur soutien financier.

In memoriam

A mon cher Papa Patient-Corneille Nyamofi Mugula Mweze, décédé
à l'aube de l'aboutissement de cette thèse

A ma tendre épouse et à nos chers enfants !

« Ne cherche jamais à limiter tes défis; cherche plutôt à défier tes limites. Il n'y a qu'ainsi qu'on pourra être fier de soi ! »

Remerciements

L'aboutissement de cette thèse a bénéficié du concours de plusieurs personnes et institutions. Je suis très reconnaissant envers l'Université catholique de Louvain (UCLouvain) pour la bourse doctorale sans laquelle une bonne partie de ce travail n'aurait pas pu voir le jour. Aussi, je n'oublie pas l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) pour la bourse additionnelle octroyée et qui m'a permis de finaliser la rédaction et la présentation de ce manuscrit. Mais également, je suis très reconnaissant envers le projet VLIR-UOS pour son apport financier à travers la Faculté des sciences agronomiques de l'Université Catholique de Bukavu (UCB) qui m'a permis de payer les frais de laboratoire et une grande partie de mes recherches sur terrain. C'est ici aussi l'occasion de remercier très sincèrement le gestionnaire local de ce projet, Feu Mr Mundi Muhanzi Dieudonné, assassiné lâchement à la veille de la présentation de ce travail, qui s'était pourtant investi corps et âme pour faciliter les nombreux déplacements sur terrain en nous disponibilisant véhicule et chauffeur du projet. Que tous ses collaborateurs trouvent en ces mots une consolation et ma reconnaissance pour le grand travail abattu ensemble.

Un remerciement spécial est adressé à mon promoteur, le Prof Charles Bielders qui a accepté de diriger ce navire très chavirant dans ses débuts, en supportant mes limites et qui m'a permis d'arriver à bout de ce travail. Ses commentaires, remarques et suggestions d'une qualité scientifique très élevée, tant pour les activités de terrain que lors de la rédaction de toutes les parties de cette thèse m'ont permis de m'améliorer et d'avoir un esprit de synthèse. Et, à travers lui, je tiens aussi à remercier mon équipe d'accompagnement qui m'a donné la chance d'améliorer mes présentations et surtout mon travail de terrain lors de la collecte des données.

Je suis très reconnaissant envers tous les étudiants finalistes de la faculté des sciences agronomiques de l'UCB et en particulier leur superviseur, Mr Christian Mushayuma qui ont permis la collecte des données sur terrain. Les jours passés ensemble sur terrain, même les dimanches et jours fériés, ont démontrés leurs sens d'engagement et d'encouragement pour un travail bien fait. Que tous les paysans qui ont participé dans nos enquêtes et qui ont accepté que nous puissions collecter les données dans leurs champs soient aussi remerciés par ces mots.

Je voudrais profiter de cette occasion pour remercier tous les collègues chercheurs du labo GERU qui m'ont donné un coup de main dans la formulation du projet de recherche, la cartographie ainsi que dans certaines analyses statistiques. Je pense particulièrement à Issoufou O; à P. Tovihoudji; Adèle Ouedraogo; à Raed Fehri; à Mokrane Kadir et à tous les autres collègues avec lesquels on a partagé des moments agréables lors des journées GERU. Je suis particulièrement reconnaissant à Mme Carine Demeyer pour tous les services rendus et à tous les techniciens GERU qui n'ont pas hésité à m'apporter une aide quelconque.

Je voudrais aussi remercier les collègues de l'Université Catholique de Bukavu, Prof Janvier Bashagaluke et Prof Jean-Petit Mulume qui ont accepté très sportivement, à chaque demande, de faire des relectures de mes chapitres et pour les nombreux encouragements reçus au moment où j'en avais tellement besoin. Qu'à travers eux, tous les autres collègues qui m'ont apporté un quelconque soutien, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

A ma famille et à toutes les personnes qui m'ont encouragé et su trouver des mots pour réconforter ma famille biologique lors des événements malheureux survenus à mon absence, qu'elles trouvent aussi à travers ces lignes, mes sincères remerciements et reconnaissances.

Enfin, je voudrais remercier une personne très spéciale pour moi, ma tendre épouse, qui s'est donnée tout entière pour moi en acceptant mes nombreuses absences (terrains et études en Belgique) pour élever seules nos enfants. Aussi, pour tous les sacrifices financiers consentis et qui m'ont permis de commencer le travail de terrain avant tout autre soutien extérieur. Je tiens à ce que ces quelques lignes montrent ma profonde reconnaissance pour tout cela.

Summary

The Kivu dorsal in South Kivu (eastern D.R. Congo) is characterized by a diversity of soils and cropping systems. Socioeconomic contexts vary considerably in terms of population density and wealth as well as access to agricultural extension services, road infrastructure and markets. These factors should affect the degree of pressure on soil resources, but the extent of the phenomenon and its characteristics remain fundamentally unknown. A few available studies describe water erosion as the main cause of food insecurity in smallholder households, but these studies do not discuss its causes nor its prevalence. The general objective of this study was, therefore, to characterize water erosion in small-farmer fields in South Kivu, to describe their severity and extent in order to develop, in the long term, recommendations for the implementation a tool and a system for the coordinated management of actions to combat soil erosion. Two different approaches were combined: (1) surveys of 720 households and community surveys to assess on the one hand, how the diversity of biophysical and socioeconomic contexts affect crops choice, farming practices and the state of resulting soil degradation, and on the other hand, to assess farmers' knowledge of soil conservation measures against erosion and, (2) measurements of soil loss by erosion in rills and gullies in 90 farmers' fields to quantify the extent and temporal variability of soil loss across 4 rainy seasons (2015-2017), and analyse the relationships between the severity of erosion and various explanatory variables related to cropping systems and farmers' field characteristics. Survey results showed that farms are characterized by their small size and generalized poverty. The state of degradation is perceived as moderate, but it is severe to very severe for more than a third of farms. Soil erosion, loss of soil nutrients and organic matter are the main types of soil degradation. Population pressure partly explains the differences observed between watersheds. The poorest households have on average the highest levels of degradation. However, no cause-effect link could be established between the degradation level and cropping systems due to the predominance of mixed cropping systems. Over 60% of farmers are aware of the seriousness of land degradation and have a good knowledge of traditional control measures as well as modern technologies which they consider to be more effective, although their level of adoption is very low (21%). Farmers hardly recognize the potential impact of their crops and cropping practices on the degradation processes. Adoption constraints for the erosion control technologies relate to external factors which are strongly related to the great precariousness of their livelihoods. Finally, the measured erosion rates, which ranged from 0.03 to 17.99 mm/season and 0.13 to 16.3 mm/season for rills and gullies, respectively, confirm that erosion is very severe, and that soil productivity is likely to be affected. These results suggest that actions should be quickly taken to stop the negative effects of water erosion on agricultural plots, but also to use the proposed methodology to prioritize sites at risk of water erosion to install adequate mitigation measures.

Résumé

La dorsale du Kivu au Sud-Kivu (Est de la R.D. Congo) est caractérisée par une diversité de sols et de systèmes de culture. Les contextes socioéconomiques varient également considérablement en termes de densité de population et de richesse, d'accès aux services de vulgarisation agricole, aux infrastructures routières et aux marchés. Ces facteurs devraient affecter le degré de pression sur les ressources en sol mais l'ampleur du phénomène et ses caractéristiques restent fondamentalement inconnues. Les quelques études disponibles décrivent l'érosion hydrique comme la principale cause de l'insécurité alimentaire des ménages de petits exploitants mais ne discutent ni ses causes, ni la prévalence du phénomène. L'objectif général de cette étude était donc de caractériser l'érosion hydrique dans les champs de petits exploitants de la dorsale du Kivu, d'en déterminer la sévérité et l'étendue dans le but d'élaborer, à terme, des recommandations pour la mise en œuvre d'un outil et d'un système de gestion coordonnée des actions de lutte contre l'érosion. Deux approches différentes ont été combinées : (1) des enquêtes auprès de 720 ménages et des communautés pour évaluer d'une part comment la diversité de contextes biophysiques et socioéconomiques affecte le choix de cultures et pratiques agricoles et l'état de dégradation du sol qui en résulte, et d'autre part, d'évaluer les connaissances des agriculteurs concernant les mesures de conservation de sol contre l'érosion et, (2) des suivis de l'évolution de pertes en terres par l'érosion en rigoles et ravines sur 4 saisons culturales (2015-2017) dans 90 parcelles pour quantifier l'étendue et la variabilité temporelle de l'érosion, et analyser ses liens avec diverses variables explicatives liées aux systèmes de culture et aux caractéristiques biophysiques des parcelles. Les résultats de l'enquête ont montré que les exploitations agricoles se caractérisent par leur petite taille et leur état de pauvreté global. L'état de dégradation est perçu comme moyen, mais il est sévère à très sévère pour plus d'un tiers des exploitations. L'érosion du sol, les pertes en éléments nutritifs et en matière organique sont les principaux types de dégradation. La pression démographique explique en partie les différences observées entre les bassins versants. Les ménages les plus pauvres ont en moyenne les niveaux de dégradation les plus élevés. Cependant, aucun lien de cause à effet n'a pu être établi avec les pratiques agricoles en raison de la prédominance des associations de plusieurs cultures. Plus de 60% des exploitants sont conscients de cet état grave de dégradation et ont une bonne connaissance des méthodes traditionnelles de lutte et des technologies modernes qu'ils jugent plus efficaces, bien que leur niveau d'adoption soit très faible (21%). Aussi, ils ne reconnaissent que très peu les liens que peuvent avoir leurs cultures et pratiques agricoles adoptées avec l'état de dégradation de leurs terres. Par ailleurs, il est apparu que les freins à l'adoption de ces technologies concernent les facteurs externes qui sont plus en lien avec la grande précarité du milieu. Enfin, les taux d'érosion mesurés, variant de 0,03 à 17,99 mm/saison et de 0,13 à 16,3 mm/saison pour les rigoles et les ravines, respectivement, confirment que l'érosion hydrique y est très sévère et que la productivité des sols y serait potentiellement affectée. Ces résultats suggèrent que des actions soient rapidement entreprises pour stopper les effets négatifs de l'érosion hydrique sur les parcelles agricoles mais aussi, d'utiliser la méthodologie utilisée dans ce travail pour prioriser les sites à risque d'érosion hydrique au niveau de petits bassins versants afin d'y installer des mesures adéquates d'atténuation.

Contenus

In memoriam.....	v
Remerciements	ix
Summary.....	xi
Résumé.....	xii
Contenus.....	xiii
Liste des figures et photos.....	xvii
Liste des tableaux.....	xxiii
Liste des acronymes.....	xxvii
Introduction générale.....	1
1.1. Contexte de l'étude.....	3
1.2. Description de la zone d'étude	6
1.2.1. Localisation de la zone d'étude	6
1.2.2. Caractéristiques biophysiques	9
1.2.3. Caractéristiques socio-économiques et des systèmes de production agricole.....	17
1.3. Cadre théorique et description du problème	19
1.3.1. Définition du cadre théorique	19
1.3.2. Description du problème.....	28
1.4. Objectifs de l'étude.....	32
1.5. Méthodologie générale.....	33
1.5.1. Approche globale de l'étude.....	33
1.5.2. Aperçu général sur la méthodologie	35
1.6. Structure de la thèse.....	42
Dégradation des terres cultivées au Sud Kivu, R.D. Congo: perceptions paysannes et caractéristiques des exploitations agricoles.....	45
Résumé.....	46
2.1. Introduction.....	47
2.2. Matériels et méthodes.....	49
2.2.1. Sélection des sites	49
2.2.2. Méthodologie	51
2.2.3. Traitement et analyse des données	53

2.3. Résultats.....	56
2.3.1. Caractéristiques des exploitations agricoles au sein des bassins versants	56
2.3.2. Caractérisation de l'état de dégradation	71
2.3.3. Analyse des facteurs de dégradation des terres pour l'ensemble des bassins étudiés	76
2.4. Discussion générale	81
2.4.1. Caractéristiques générales des exploitations.....	81
2.4.2. Perception des producteurs sur l'état de dégradation.....	84
2.4.3. Etat de dégradation à l'échelle des ménages.....	86
2.4.4. Etat de dégradation entre bassins versants et au niveau de la zone dans sa globalité	88
2.4.5. Etat de dégradation et occupation des sols	90
2.5. Conclusion.....	92
Erosion and Soil And Water Conservation in South-Kivu (Eastern D.R. CONGO): The Farmers' view	95
Abstract.....	96
3.1. Introduction.....	97
3.2. Materials and methods	102
3.2.1. Study area.....	102
3.2.2. Data Collection	102
3.2.3. Data analysis	104
3.3. Results	105
3.3.1. Erosion indicators.....	105
3.3.2. Causes of water erosion.....	110
3.3.3. SWC measures and adoption constraints	118
3.4. Discussion.....	127
3.4.1. Awareness of soil erosion problems and causes	127
3.4.2. Adopted control measures and their effect on soil erosion	130
3.5. Conclusions	136
Extent of soil loss by rill and gully erosion in smallholder farms in the Kivu dorsal, , D.R. Congo	139
Abstract.....	140
4.1. Introduction	141
4.2. Materials and methods.....	145
4.2.1 Study area.....	145

4.2.2. Data collection and processing	147
4.2.2 Statistical analysis.....	153
4.3. Results	155
4.3.1. General characteristics of monitored farmer fields.....	155
4.3.2. Extent of soil erosion rates in the two watersheds.....	162
4.3.3. Effects of measured factors on rill and gully erosion	166
4.4. Discussion.....	171
4.4.1. Biophysical characteristics of croplands and watersheds.....	171
4.4.2. Soil loss by rills and gullies	173
4.4.3. Explaining variability in soil loss by rills and gullies at plot and whole-field scales	175
4.4.5. Opportunities for estimating the extent of soil erosion at cropland level	177
4.5. Conclusion	178
Conclusions et perspectives	181
5.1. Introduction.....	183
5.2. Principaux résultats.....	185
5.2.1. Diversité des contextes biophysiques et socioéconomiques en lien avec l'état de dégradation des sols.....	185
5.2.2. Opportunités de la prise en compte des perceptions paysannes dans l'évaluation des obstacles à l'adoption des méthodes de lutte contre l'érosion	187
5.2.3. Etendue de perte des terres par érosion en rigoles et en ravines, et sa variabilité à l'échelles des parcelles agricoles et des bassins versants 189	
5.3. Principales implications et recommandations	191
5.4. Perspectives pour les recherches futures	195
Références bibliographiques	199
ANNEXES.....	221
ANNEXES A.....	222
ANNEXES B.....	231
ANNEXES C.....	247
Publications et conférences.....	249
A propos de l'auteur	251

Liste des figures et photos

1.1.	<i>Carte administrative de la province du Sud-Kivu, R.D. Congo</i>	8
1.2.	<i>Localisation de la dorsale du Kivu au Sud-Kivu (en couleur violet-claire à foncée sur la carte à droite) avec un zoom sur les 4 territoires de la zone d'étude (Walungu, Kabare, Kalehe et Idjwi à gauche). Délimitation réalisée à l'aide d'un modèle numérique de terrain d'une résolution de 30 x30 m disponible sur le site d'ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Relection Radiometer); GDEM2 (Global Digital Elévation Model, version 2). Carte conçue avec ArcGIS version 10.4. ESRI (Environmental System Research Institute) grâce aux données issues du référentiel géographique commun de la R.D. Congo (www.rgc.cd) (adaptée à partir d'IPAPEL, 2010)</i>	10
1.3. (a)	<i>Pluviométries et températures moyennes mensuelles pour deux stations des territoires de Walungu et Kabare pour les années 2013-2016 (Sources : données prélevées sur terrain lors des suivis des parcelles agricoles-stations de Kadubo (Walungu) et de Lwiro (Kabare)) et (b) moyenne (et écart-types) des précipitations annuelles et des températures annuelles sur une période de 20 ans (1991-2010) sur base des données des stations de Bukavu, INERA-Mulungu et CRSN-Lwiro (IPAPEL, 2010).</i>	11
1.4.	<i>Illustration des unités pédologiques de la dorsale du Kivu avec la localisation des huit bassins versants de la zone d'étude. Adaptée sur base de la carte pédologique de la dorsale du Kivu (E=1/500 000) actualisée par Van Ranst et al. (2010).</i> ..	14
1.5.	<i>Comparaison de la dorsale du Kivu avec les autres territoires de la province du Sud-Kivu en ce qui concerne les proportions du nombre de ménages agricoles, des superficies cultivées et de la production agricole totale sur deux années (2016-2017). Adapté selon le rapport biannuel de l'Inspection provinciale de l'agriculture, pêche et élevage pour 2016 – 2017 (IPAPEL, 2018).</i>	18
1.6.	<i>Schéma de l'approche globale de l'étude montrant les liens entre les démarches méthodologiques à différentes échelles d'analyse en vue d'améliorer l'évaluation et la gestion de la dégradation des terres au sein de la dorsale du Kivu.</i>	34
2.1.	<i>Répartition des moyens de production et durée d'exploitation des parcelles par les ménages (n=90; N=720) : (a) superficie totale de l'exploitation, (b) nombre de parcelles par ménage, (c) droit de propriété des parcelles, (d) durée de la mise en culture, (e) durée d'exploitation par le ménage, (f) quantité et type de main d'œuvre familiale – Distribution of resources available for production and duration of exploitation by households (n = 90, N = 720): (a) total farm area, (b) number of plots per household, (c) plot tenure right, (d) duration of cultivation, (e) duration of exploitation by the household, (f) quantity and type of family labor.</i>	58

2.2. Représentation schématique des différentes positions topographiques au sein de la zone d'étude (1 = Sommet de colline; 2= Plateau; 3= Flanc de colline; 4= Bas de colline; 5 = Bas fond. - Schematic representation of different topographic positions within the study area (1=hilltop; 2=Plateau; 3=Hillside; 4=Downhill; 5=Depression).	60
2.3. Répartition des parcelles selon les positions topographiques par bassin versant – Distribution of plots according to their topographic positions by watershed (n=90; N=720).	61
2.4. Fréquences (%) d'adoption des pratiques agricoles par les ménages par bassin : (a) types d'amendements; (b) types d'association des cultures - Frequencies (%) of adoption of farming practices by households within watersheds : (a) types of amendments; (b) types of crop association.	66
2.8. Résultats de l'ACP sur base des quatre variables socio-économiques retenues pour la typologie des exploitations agricoles. Les informations fournies par l'analyse sont résumées sur les axes F1 et F2. La longueur et la direction des lignes indiquent l'influence de chaque variable au sein de chacun des quatre types de ferme agricole - PCA results based on four socio-economic variables selected for farm typology. The information provided by the analysis is summarized on the F1 and F2 axes. The length and direction of the lines indicate the influence of each variable within each of the four farm types (p-value =0,025; DDL=6). Factor loadings are provided in supplementary materials (Annex Table A.4).	67
2.5. Indices de l'état de dégradation général des sols selon la perception des producteurs par bassin versant: (a) courbes de fréquences cumulées des niveaux de dégradation générale, (b) box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) des indices de dégradation avec les lettres de comparaison des moyennes. Les bassins qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différents – Index of soil degradation status according to the farmers' perception per watershed : (a) cumulative frequency curves of general status of degradation, (b) box plots (average, extreme values, minimum/maximum) of degradation indexes with mean comparison letters.	72
2.6. (a) Répartition des états de dégradation en fonction de la position topographique pour l'ensemble des bassins versants, (b) Box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) de l'indice moyen de dégradation par bassin versant pour la position flanc de colline avec les lettres de comparaison des moyennes – (a) Distribution of degradation states for each topographical position across all watersheds (b) Box plots (average, extreme values, minimum / maximum) of the degradation indexes per watershed for the hillside position with mean comparison letters (LSD).	74

2.7. Box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) d'indice de sévérité pour les différents types de dégradation selon la perception des ménages au sein des huit bassins avec les lettres de comparaison des moyennes - Box plots (average, extreme values, minimum/maximum) of severity index for the different types of degradation according to the farmers' perception in the eight watersheds with mean comparison letters (LSD): (a) water erosion, (b) soil nutrient depletion, (c) loss of organic matter and (d) soil compaction.	75
2.9. Box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) de l'indice moyen de dégradation pour (a) les différents types de ferme agricole et (b) en fonction des classes de richesse, pour les huit bassins versants enquêtés avec les lettres de comparaison des moyennes. - Box plots (average, extreme values, minimum/maximum) of the degradation index for (a) different types of farms and (b) different wealth classes, across the eight watersheds with mean comparison letters (LSD).....	77
2.10. Distribution (a) des cultures et (b) des pratiques culturales en fonction des niveaux de dégradation des parcelles pour la position flanc de collines pour l'ensemble des huit bassins et la p-value du test de χ^2 indépendant - Distribution of (a) crops and (b) cropping practices across degradation levels for the hillside position for all eight watersheds and the p-value of the independent χ^2 test.	79
3.1. Frequency distribution of perceived severity of observed signs of erosion (% farmers, n= 720). No answer refers to the farmers that did not observe the sign in their field.	109
3.2. Cumulative distribution of erosion severity index in the eight watersheds of Kivu dorsal (N = 90 in each watershed). Kal = Kalehe; Kab = Kabare; Idj = Idjwi; Wal = Walungu; All= the total of 8 watersheds.	110
3.3. Frequency distribution of perceived importance of the soil erosion causal factors listed in table II (% farmers, N = 720). No answer refers to the farmers that did not report the causal factor.	111
4.1. Location of the 45 monitored fields in each of the two watersheds in two territories (Kabare and Walungu) of the Kivu dorsal. Northern South Kivu (Eastern D.R. Congo).	147
4.2. Example of rill erosion rate data and calculated cumulative erosion rates. Dashed blue line: biweekly observed rill erosion rate in a given farmer field. Yellow and red line: cumulative minimum and maximum rill erosion rates, respectively. The real soil loss of the field lies in between these two lines. See text for explanation.	151

4.3. Rainfall distribution for the four monitored rainy seasons (2015-2017) in the two watersheds (Wal2 and Kab2): cumulative year rainfall and daily rainfall distribution. The arrows mark the erosion monitoring periods in the two watersheds. SA = long rainy season, SB = short rainy season.....	161
4.4. (a) Proportions of fields affected by rills or gullies and (b) fraction of whole field affected by rill and gully erosions, plotted by watershed Wal2 and Kab2. (R=Rill and G=Gully). §The area affected by gullies has been multiplied by 10 to be better projected on the same graph.	162
4.5. (a) Average rill characteristics (rill density, width and depth) and (b) gully characteristics (density, top width and depth) grouped by season and watershed. Bars denote standard deviation (SD). SA: the long rainy season; SB: the short rainy season. Rill widths are average of top and bottom widths. § Gully density data have been multiplied by 10 to be better projected in this	163
4.6. (a) Minimum and (b) maximum rill erosion rates of the rill-affected subplots ('damage areas': n= variable in each season), plotted by season and watershed (SA: the long rainy season; SB: the short rainy season). (c) "Whole field" minimum rill erosion rate and gully erosion rate averaged over the 4 seasons by watershed (Wal2 and Kab2).	164
4.7. Average seasonal rill erosion rate (mm) as a function of seasonal rainfall (mm) for the two watersheds (Wal2 and Kab2).....	166
4.8. Scatter plots of minimum rill erosion rate (mm) compared to (a) the soil pH (water); (b) the soil sand content (%), (c) the plant cover rate (%) and (d) the topsoil depth for both watersheds.....	168
4.9. Scatter plots of average gully erosion rate (mm) compared to many variables: (a)the soil SOC content (%); (b) the sum of bases content (cmol ⁺ ·kg ⁻¹), (c) topsoil depth (cm) and (d) the soil silt content (%) for both watersheds.....	169
4.10. Summary result of principal component analysis (PCA) to link minimum rill and gully erosion rates (RE-min and GE (mm)) with major explanatory variables for both watersheds: (TD: topsoil depth, SOC: soil organic carbon, SL: slope length, Rainfall, Cover: soil cover, SB: sum of bases, pH(H ₂ O): pH-water, ECEC: effective cationic exchange capacity, SG: slope gradient, and CLAY: soil clay content and SILT: soil silt content. Factor loadings are provided in supplementary materials (Annex Table A.9).	170
4.11. Box plots of minimum seasonal rill erosion rate as a function of the dominant cropping system (CS1=bean, CS2=mix of cassava-bean-maize, CS3=cassava, and CS4=sweet potato).....	171

A.1. Cumulative probability of occurrence of soil losses, plotted by minimum (a) and maximum (b) rill erosion rates for the four monitored seasons (2015-2017), grouped by watershed (Wal2 and Kab1). SA: the long rainy season; SB: the short rainy season.	227
A.2. Summary result of principal component analysis (PCA) to link minimum rill erosion loss rate with major explanatory variables at plot scale (damaged area) (RE-min), plotted by watershed (a) Wal2=Kadubo and (b) Kab2= Mushuva (TD: topsoil depth, SOC: soil organic carbon, SL: slope length, Rainfall, Cover: soil cover, SB: sum of bases, pH(H ₂ O): pH-water, ECEC: effective cationic exchange capacity, CLAY: soil clay content, SG: slope gradient, and SILT: soil silt content).	227
A.3. Summary result of principal component analysis (PCA) to link seasonal minimum rill erosion rate with major explanatory variables at 'whole field' scale (RE-min.- whole field), plotted by watershed (Wal2 and Kab2) (TD: topsoil depth, SOC: soil organic carbon, SL: slope length, Rainfall, Cover: soil cover, SB: sum of bases, pH(H ₂ O): pH-water, ECEC: effective cationic exchange capacity, CLAY: soil clay content, SG: slope gradient, and SILT: soil silt content). Factor loadings are provided in supplementary materials.	229
Photos	
3.1. Pictures of surveyed farmers' fields: A; B. permanent gullies, and C. a farmer field with rills in the Kivu dorsal.	128
4.1. Examples of (a) a permanent channel (gully) and (b) ephemeral channels (rills) in a given plot on the monitored farmers' fields	148
A.1. Deux parcelles de manioc associé au haricot, patate douce et quelques pieds de maïs avec plusieurs incisions par érosion en rigoles.	247
A.2. A gauche : mesure d'une grande rigole qui s'est agrandie lors d'un évènement pluvieux, et à droite, une ravine permanente qui se creuse au fil de la saison pluvieuse.....	247
A.3. Champ de manioc récolté avec grandes incisions (rigoles) en formation au cours d'une saison pluvieuse.....	248
A.4. Colline mise en culture avec élimination des végétations herbacées et ligneuses sans aucun dispositif de lutte contre les érosions, observation des incisions (rigoles) qui se creusent sur les parcelles déjà labourées.	248

Liste des tableaux

1. 1. Principales zones agroécologiques du Sud-Kivu. La dorsale du Kivu est concernée par les zones de moyennes et de hautes altitudes	16
1. 2. Principales caractéristiques socioéconomiques et biophysiques des huit bassins au sein de la dorsale du Kivu, RD. Congo - Main socioeconomic and biophysical characteristics of the eight watersheds within the Kivu dorsal, DR. Congo	37
2. 1. Variables utilisées comme indicateurs de richesse pour la catégorisation des ménages enquêtés au sein de la dorsale du Kivu, RD. Congo - Variables used as wealth indicators for the categorization of surveyed households within the Kivu dorsal, DR. Congo (Louvain Développement, 2008)	55
2. 2. Types et objectifs de l'élevage pratiqué par les ménages au sein des bassins enquêtés et résultats du test de khi-deux - Types and objectives of animal rearing in the surveyed watersheds and chi-square test results (n=90; N=720)	59
2. 3. Répartition des fréquences des principales cultures cultivées par les ménages au sein des huit bassins de la dorsale du Kivu et résultats du test de khi-deux - Frequency distribution of main crops grown by farmers in the eight watersheds of the Kivu dorsal and chi-square test results (n=90; N=720)	63
2. 4. Contribution des 4 principales variables pour la typologie des ménages (N= 720) à la formation de deux axes de l'ACP - Contribution of 4 main variables for the farm typology (N = 720) to the formation of the two axes from the PCA	69
2. 5. Répartition des 720 ménages par différents types de ferme agricole et au sein des classes de richesse dans les 8 bassins versants - Distribution of the 720 households within the different farm types and within the wealth classes in the eight watersheds	70
2. 6. Résultats du test de khi-deux entre la répartition des 720 ménages au sein des différents types de ferme agricole - Chi-square test between the distribution of 720 households within the four agricultural farm types.	71
3.1. Weighting factors used to calculate erosion severity	104
3.2. Frequencies of observed signs of erosion within the eight watersheds and Chi-square test (Chi ²) results (% farmers; n = 90 for each watershed)	106
3.3. Frequencies of erosion factors and location on topographic positions, and the summary results of chi-square test (Chi ²)	108
3.4. Frequencies of perceived causes of soil erosion within the eight studied watersheds and Chi-square test (Chi ²) results (% farmers, n = 90 for each watershed)	113
3.6. Frequency distribution for perceived effect of crops and common farming practices on soil erosion (promote, limit or no effect) (% farmers, N = 720). Adopters correspond to the farmers cultivating a given crop or applying a given farming practice. Respondents correspond to the fraction of adopters that evaluated the crop / farming practice impact on erosion.	116

3.7. Summary results of chi-square test (χ^2) to link crop types in the eight surveyed watersheds with the perceived soil erosion indicators(DDL=11).	117
3.8. Frequency of SWC measures adopted within the eight watersheds and Chi-square test (χ^2) results (% farmers; n = 90 for each watershed).....	120
3.9. Reported SWC measures: percentage farmers aware of the anti-erosive function, percentage adopters, and frequency distribution regarding the perceived effectiveness for erosion control (N = 720).....	120
3.10. Reported constraints/reasons for non-adoption of each SWC measures (n=567).....	121
3.11. Number of respondents for each constraint identified in the adoption of each SWC measure (n is variable for each constraint).	123
3.12. Summary results of logistic regression analysis between erosion severity index and each significant adopting SWC measures/techniques in the study area (variables and model parameters).....	124
3.13. Summary results of chi-square test (χ^2) to link (a) agricultural practices and (b) adopted SWC measures in the eight surveyed watersheds with the perceived soil erosion indicators	126
4.1. Frequency distributions for biophysics farmers' field characteristics in the monitored watersheds of the Kivu dorsal in western South Kivu (n=90, SD=standard deviation).	156
4.2. Statistical comparison (Student t-test) for soil sample analyses in the Wal2 and Kab2 watersheds, n=90 (t-test prob.= Student test probability)	156
4.3. Prevalence of erosion and soil and water control measures (SWC) within the selected household's fields in the monitored watersheds of the Kivu dorsal in western South Kivu (n=90, SD=standard deviation).	157
4.4. Proportions of planted crops on the monitored farmer fields during the four rainy seasons (2015-2017), grouped by watershed (n=45).	159
4.5a. Land use/cropping system definition based on vegetation cover percentage in each plot.	160
4.5b. Proportion (%) of plots per type of land use/cropping system in the two watersheds for the four monitored seasons (2015-2017).....	160
4.6. Summary of the results of the linear mixed-model analysis for minimum and maximum rill erosions and, gully erosion rates using square root transformed data for the two watersheds all over the four monitored seasons (2015-2017).	165
4.8. Spearman correlation coefficients among soil properties and rill and gully erosion for the two watersheds	167

<i>A.1. Facteurs et critères d'observation pour la caractérisation des contextes (Territoire et parcelle agricole).....</i>	<i>222</i>
<i>A.2. Répartition des intervalles de pentes au sein de chacun des huit bassins de la dorsale du Kivu.....</i>	<i>224</i>
<i>A.3. Caractéristiques importantes des différents types de fermes agricoles selon la catégorisation des ménages enquêtés au sein de la dorsale du Kivu. RD. Congo.....</i>	<i>224</i>
<i>A.4.Coordonnées des quatre variables socio-économiques introduits dans l'ACP pour la typologie des exploitations agricoles</i>	<i>225</i>
<i>A.5.Loading contributions (rows) for correspondence analysis between SWC measures/techniques and their adoption constraints.</i>	<i>225</i>
<i>A.6. Rainfall events[n], daily amount and standard deviation (SD) and the total rainfall amount [mm] in the monitored four rainy seasons 2015-2017, grouped by watershed</i>	<i>226</i>
<i>A.7. Statistics summary of the damaged area soil loss by rill erosion (minimum and maximum), average "whole field" minimum rill loss rate, and gully erosion [mm] for four seasons from 2015 to 2017, grouped by watershed. (Means analysis were performing on damaged areas minimum and maximum rill erosions and, gully erosion rates using square root transformed data)</i>	<i>226</i>
<i>A.8. Factors loadings for PCA to link seasonal minimum rill erosion loss rate (RE-min (mm)) with major explanatory variables at whole field scale for both watersheds</i>	<i>229</i>
<i>A.9.Spearman correlation coefficients among soil properties and rill and gully erosion for the two watersheds separately</i>	<i>228</i>
<i>A.10. Factors loadings for PCA to link seasonal minimum rill erosion loss rate (RE-min (mm)) with major explanatory variables at whole field scale for Wal2 watershed</i>	<i>230</i>
<i>A.11. Factors loadings for PCA to link seasonal minimum rill erosion loss rate (RE-min (mm)) with major explanatory variables at whole field scale for Kab2 watershed</i>	<i>230</i>

Liste des acronymes

ACP	: Analyse en composantes principales (Principal component analysis (PCA))
AGL	: African great Lake regions
ARES	: Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur
CAH	: Classification ascendante hiérarchique (Agglomerative hierarchical clustering (AHC))
CES	: Conservation de l'eau et du sol
CS	: Cropping system
ECEC	: Effective cationic exchange capacity
IPAPEL	: Inspection Provinciale d'Agriculture Pêche et Elevage / Sud-Kivu
LMM	: Linear mixed model
MIPRO	: Mission de Programmation de relance du secteur agricole et rurale
pH	: Hydrogen potential
PNSAR	: Programme National de Relance du Secteur Agricole et Rural
RDC	: République Démocratique du Congo
RGL	: Région des Grands Lacs africains
SOC	: Soil organic carbon
SWC	: Soil and water conservation
UCB	: Université Catholique de Bukavu
UCLouvain	: Université catholique de Louvain
USLE	: Universal Soil Loss Equation
VLIR-UOS	: Flemish Interuniversity Council-University Cooperation for Development

Chapitre 1

Introduction générale

1.1. Contexte de l'étude

L'érosion du sol est définie comme le détachement et le transport de particules de sol par des différents agents (eau, vent, outils de travail du sol, gravité, etc.) (Lal, 2003). C'est un phénomène géologique naturel, qui peut être fortement accéléré suite aux interventions humaines. L'érosion des sols affecte de très nombreux pays du monde depuis de nombreuses décennies (Pimentel and Kouang, 1988); elle est généralement considérée comme étant la principale cause de dégradation des terres (Valentin et al., 2005). La dégradation des terres est quant à elle définie comme le déclin temporaire ou permanent de la capacité de production des terres, et la diminution du potentiel de production, y compris ses principales utilisations (par exemple, cultures, pâtures, forêts), ses systèmes de production agricoles (par exemple, agriculture de subsistance), et sa valeur en tant que ressource économique (Dovie, 2015). L'érosion des sols et la dégradation des terres fonctionnent en tandem, chacune exacerbant l'autre (Kiage, 2013). En effet, selon Lal (2001), l'érosion peut entraîner une baisse de la qualité des sols et déclencher le processus de dégradation car elle implique un retrait physique du sol dans une direction verticale et/ou horizontale. Elle peut être aussi une manifestation de la dégradation du sol résultant d'une sensibilité accrue à l'érosion suite, par exemple, à la perte de couvert végétal ou à une perte de matière organique du sol.

Les phénomènes d'érosion résultent de l'interaction entre de nombreux facteurs. Certains de ces facteurs sont permanents ou n'évoluent que très lentement comme ceux relatifs aux caractéristiques texturales du

sol ou à la topographie, d'autres présentent un caractère aléatoire comme les précipitations alors que d'autres encore évoluent rapidement au cours du défrichement et de la mise en valeur des terres comme leur stabilité structurale et résistance mécanique en lien avec l'évolution de la teneur en matière organique et de la structure du sol (Le Bissonnais et al., 2002; Roose et Sarrailh, 1989). Parmi les causes de dégradation des terres par érosion sur le continent africain, on cite la croissance rapide de la population humaine conduisant à la déforestation et à une rapide extension des terres cultivées, la mauvaise gestion des sols, l'insécurité du régime foncier, la variation des conditions climatiques ainsi que les caractéristiques intrinsèques des sols fragiles (Bationo et al., 2012; Lal, 2001).

La République Démocratique du Congo (RDC) n'échappe pas à l'érosion, en particulier dans sa partie orientale où se trouve la province du Sud-Kivu, et plus particulièrement dans sa région des hautes altitudes (la dorsale du Kivu). Une étude sur l'impact de l'érosion des terres agricoles à l'échelle mondiale a placé la RDC parmi les points noirs en Afrique subsaharienne, avec des taux moyens de perte de sol sur les terres agricoles estimés être compris entre 4 à 23 t/ha/an, impliquant un taux d'exportation de carbone organique du sol (COS) allant de 3 à 32 g C/m²/an (Van Oost et al., 2007). Vers les années 1990, selon une étude menée dans la Région des grands lacs africains (RGLA) regroupant le Rwanda, le Burundi et la dorsale du Kivu, des pertes en terres sur sol nu de l'ordre de 35.5 t/ha en six mois avaient été rapportées, mettant en évidence la sensibilité du milieu à l'érosion (Lunze, 1992, cité par Rishirumuhirwa, 1994). Plus

récemment, selon les estimations de Karamage et al. (2016a) réalisées à partir de l'équation USLE, le bassin du lac Kivu serait exposé au risque d'érosion des sols avec un taux annuel moyen de 30 t/ha/an, deux tiers de la superficie étant sujette à des taux d'érosion >10 t/ha/an.

Actuellement, avec l'évolution dans la densité de population et de la pratique de l'agriculture que connaît la dorsale du Kivu, l'érosion y représente une menace très sérieuse. En effet, la dorsale du Kivu est une vaste zone jouissant de conditions éco-climatiques très favorables à l'agriculture le long du lac Kivu (Pécrot et Léonard, 1960). La présence du lac Kivu et de la ville de Bukavu facilite l'accès aux marchés urbains pour l'écoulement des productions agricoles. Malheureusement, cela entraîne aussi l'afflux massif des populations vers cette zone, y compris depuis les régions environnantes (Goma au Nord-Kivu et Cyangugu en République Rwandaise). Le taux de croissance annuel de la population dans cette région est de 5,53% (Relief web, juillet 2011), contre 3,30% par an au niveau national (Populationdata.net, décembre, 2019), avec une densité de population variant de 190 à 922 hab./km². L'étude menée par Carrol (1980) montre que pour une densité de population dépassant 50 hab./km², une occupation quasi permanente des terres s'impose, ce qui aggrave encore plus les phénomènes d'érosion. Ainsi, la pression démographique élevée a entraîné le défrichement des forêts pour l'installation des cultures et la disparition de la jachère. Malheureusement, pour couvrir le sol, les cultures vivrières sont beaucoup moins efficaces que les formations naturelles qu'elles remplacent après défrichement (Rishirumuhirwa, 1994). De plus, les

sols cultivés sont constamment mis à nu et fragilisés par les labours et les sarclages successifs (Lunze, 1992).

Ainsi, le pourcentage élevé de terres sous cultures (Bitijula and Lal, 1983), l'exploitation des cultures sur des pentes fortes, la forte pluviosité, la forte acidité des sols et leur teneur faible en matière organique, en défaveur de leur stabilité structurale (Lunze, 1992), sont autant des paramètres qui font que la dorsale du Kivu soit dans un contexte favorable à l'érosion (Mastaki et al., 2013). Il en découle des pertes en terres, en carbone et en éléments nutritifs qui induisent des déséquilibres dans les systèmes de production de type autosubsistance (Buchekuderwa et Mapatano, 2013), des coulées de boue, mais aussi des transferts de sédiments, de carbone et de nutriments qui polluent les eaux des rivières et du lac Kivu (Zirirane et al., 2015). Les processus de l'érosion constituent ainsi une des causes majeures de l'insécurité alimentaire (Tollens, 2004; Bisimwa et Mambo, 2009), particulièrement au sein des ménages agricoles des petits producteurs.

1.2. Description de la zone d'étude

1.2.1. Localisation de la zone d'étude

La province du Sud-Kivu est située à l'Est de la République Démocratique du Congo (R.D.C.), approximativement entre 1°44' 38'' et 5°2' longitude Est et entre 26° 80' et 29° 20' de latitude Sud (Figure 1.1).

Limitée au nord par la province du Nord-Kivu, au sud par la province du Tanganyika et à l'ouest par la province du Maniema, le Sud-Kivu partage ses frontières de l'Est avec le Rwanda, le Burundi et la

Tanzanie. Sa superficie est de 64 450 km² et sa population était estimée à 6.530.904 habitants en 2016, avec une densité moyenne de 101 habitants par km² (CAID, 2016). Du point de vue administratif, la province du Sud-Kivu est subdivisée en huit territoires et trois communes composant la ville de Bukavu.

La présente étude a été menée dans la dorsale du Kivu. La dorsale du Kivu est une vaste zone montagneuse située à l'Est de la province du Sud-Kivu. Elle est le prolongement de la chaîne des Monts Mitumba culminants à 2670 m d'altitude (Cazaneve-Piarrot, 2009) et traverse 3 territoires : Kabare, Walungu et Kalehe. A cause de son relief montagneux, on y associe aussi le territoire d'Idjwi qui est une île située dans le lac-Kivu.

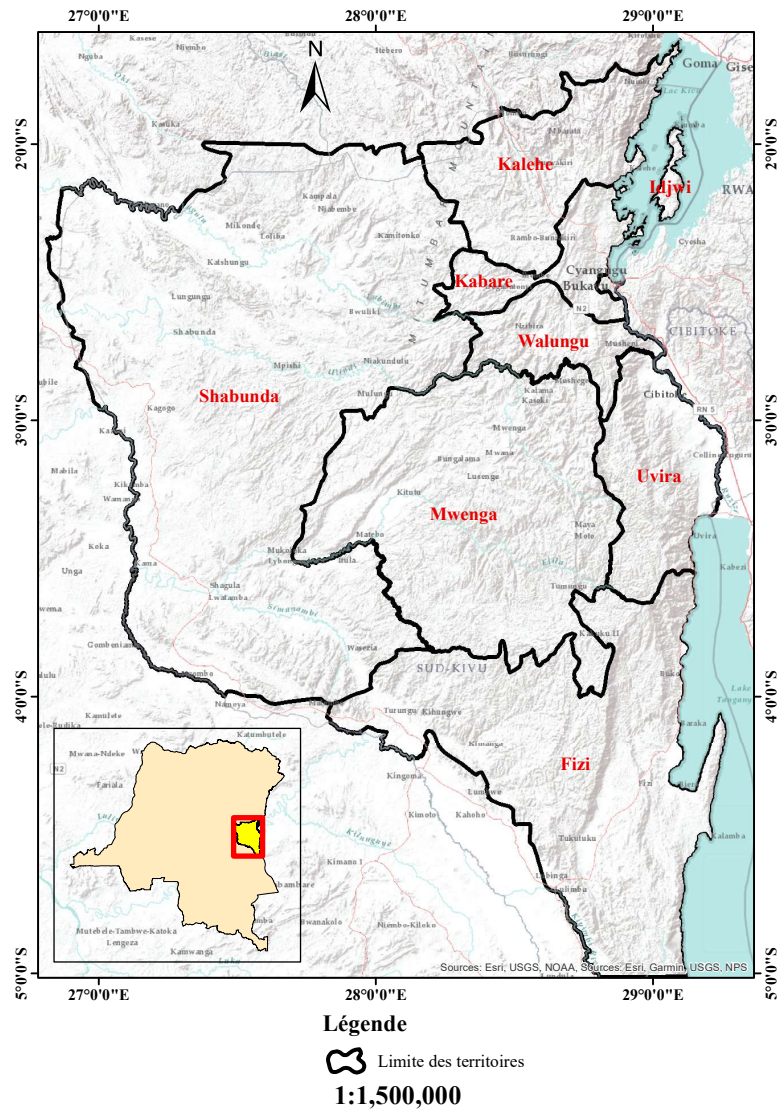


Figure 1.1. Carte administrative de la province du Sud-Kivu, R.D. Congo

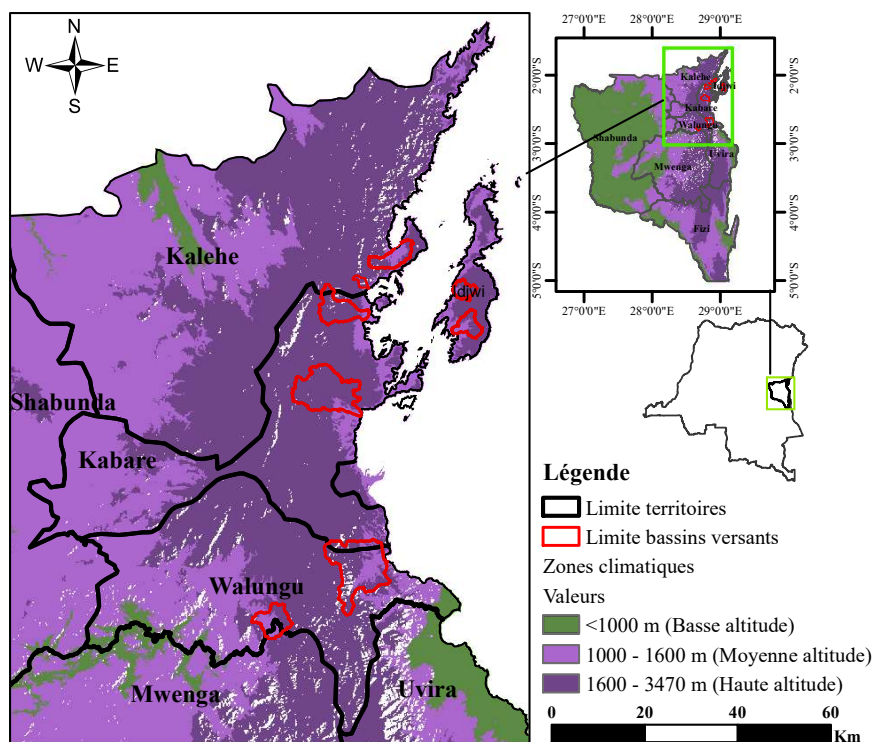
Source : Conçue avec ArcGIS version 10.4. grâce aux données issues du référentiel géographique commun de la R.D. Congo (www.rgc.cd)

1.2.2. *Caractéristiques biophysiques*

- **Relief**

La région de la dorsale du Kivu se déploie sur deux versants et s'étend au Nord dans la province du Nord-Kivu. Dans la partie qui concerne la province du Sud-Kivu, elle est bordée au nord par la route Bukavu-Goma. Elle forme ensuite la longue chaîne de montagne qui domine le rive Ouest du lac Kivu et le cours supérieur de la rivière Ruzizi au Sud-Est (Figure 1.2). Les sommets ont une altitude moyenne de 2670 m. Les points culminants sont les monts Kahuzi, volcan éteint, et Muhi, dont l'altitude dépasse largement 3000 m (Pécrot et Léonard, 1960).

Par endroits, le relief du sommet de la dorsale du Kivu est peu accidenté, vestige toujours étroit et peu étendu des anciennes pénéplaines tertiaires basculées lors de la formation du Graben. Ce mouvement de bascule intéresse tout son versant occidental et explique sa pente assez faible vers l'ouest. Le versant oriental lui-même est très accidenté, profondément disséqué par le réseau hydrographique dont l'érosion remontante est très vive. Ce versant oriental, issu d'un jeu des failles importantes, descend en pente souvent abrupte et par de hauts escarpements vers le lac Kivu. Une ligne Sud-Ouest – Nord-Est marque une zone de flexure dans le relief et constitue pratiquement la limite occidentale de hautes pénéplaines du Kivu et le bord de la cuvette centrale (Cahen et al., 1946; Pécrot et Léonard, 1960).



Notes : Les bassins versants en rouge sont présentés à la section 1.5.2

Figure 1.2. Localisation de la dorsale du Kivu au Sud-Kivu (en couleur violet-claire à foncée sur la carte à droite) avec un zoom sur les 4 territoires de la zone d'étude (Walungu, Kabare, Kalehe et Idjwi à gauche). Délimitation réalisée à l'aide d'un modèle numérique de terrain d'une résolution de 30 x 30 m disponible sur le site d'ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Relection Radiometer); GDEM2 (Global Digital Elévation Model, version 2). Carte conçue avec ArcGIS version 10.4. ESRI (Environmental System Research Institute) grâce aux données issues du référentiel géographique commun de la R.D. Congo (www.rgc.cd) (adaptée à partir d'IPAPEL, 2010).

- Climat

Le climat de la région étudiée varie fortement avec l'altitude et la situation géographique. Ainsi, il est parfois qualifié de climat des montagnes à cause de cette particularité qui crée un microclimat propre à cette zone (ex., Mutombo et al., 1999). Suivant la classification de Köppen, on y rencontre différents types de climats, depuis le climat équatorial Af (Walungu) jusqu'aux types montagnards Cf en passant

par les climats Am et Aw à saison sèche plus marquée (Kabare nord, Kalehe et Idjwi). En général, au-delà de 1900 mètres d'altitude, le climat est de type Cw (climat de montagne subtropical dont les températures moyennes mensuelles sont inférieures à 22 °C).

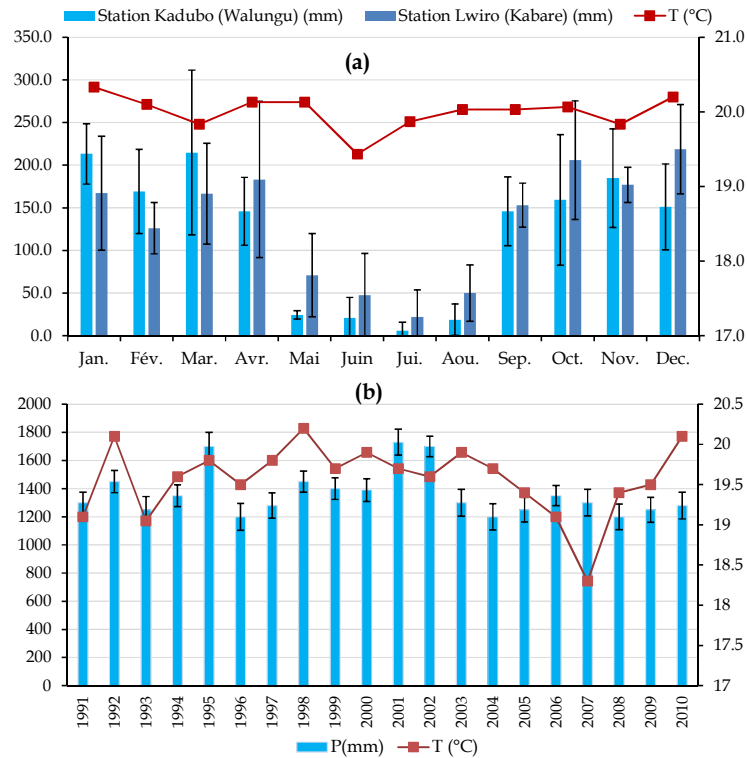


Figure 1.3. (a) Précipitations mensuelles et températures moyennes des territoires de Walungu et Kabare pour 4 années (2013-2016) pour 2 stations (Sources : données prélevées sur terrain lors des suivis des parcelles agricoles-stations de Kadubo (Walungu) et de Lwiro (Kabare)) et (b) Précipitations annuelles (avec écart-types pour 3 stations) et températures moyennes sur une période de 20 ans (1991-2010) sur base des données des stations de Bukavu, INERA-Mulungu et CRSN-Lwiro (IPAPEL, 2010).

La pluviométrie annuelle moyenne enregistrée dans cette zone sur 20 ans varie entre 1200 et 1750 mm, tandis les températures moyennes annuelles varient très peu, entre 18,5 et 21,5°C (Figure 1.3b). Le régime pluviométrique est bimodal. La saison pluvieuse dure 9 mois au total

et est répartie sur une longue saison, de septembre à janvier (Saison A : SA), et une courte saison, de février à mai (Saison B : SB). En conséquence, il y a deux saisons de culture par an. On observe aussi une saison sèche plus ou moins marquée entre mi-juin et mi-septembre ne dépassant généralement pas trois mois. Le total de la pluviométrie pour la grande et la petite saison varie fortement avec une différence moyenne supérieur à 200 mm (Figure 1.3a).

- Sols

Les sols de la dorsale du Kivu sont très diversifiés. On y trouve des sols dérivés de roches basaltiques, très argileux, essentiellement les Nitisols et les Ferralsols rouges. Ils sont compacts et leur fertilité est tributaire de leur degré d'altération. On y observe également des sols jeunes volcaniques, relativement fertiles, des sols à colluvions localisés aux pieds de collines, ainsi que des sols hydromorphes à alluvions et à colluvions dans les bas-fonds (FAO, 1998; Hecq, 1958 et Mizota, 1989, cités par Mutombo et al., 1999).

Très schématiquement, la zone d'étude peut être subdivisée en deux zones. La première zone comprend le territoire de Kalehe et le nord du territoire de Kabare et est constituée de terres considérées comme ayant encore un grand potentiel agricole à cause de leur localisation sur des sols issus d'un volcanisme récent (environ 2000 ans) (Andosols molliques, Nitisols dystriques, Nitisols humiques et Cambisols eutriques). En revanche, la deuxième zone comprend les territoires de Walungu et Idjwi et de la partie sud du territoire de Kabare. On y trouve des sols anciens, en majorité issu de roches d'origine basaltique

et fortement altérés (Cambisols orthiques, Nitisols dystriques et Nitisols humiques) (FAO, 1998).

Au niveau des séries de sols (un regroupement de sols ayant en commun un ensemble de caractères relatifs au développement du profil d'une part et au matériau parental d'autre part), cinq principales unités pédologiques sont observées (Figure 1.4). Au Sud-est, où sont localisés les huit bassins versant de la zone d'étude, les sols les plus représentatifs sont ceux dérivés de dominance de roches basiques (gabbro, basalte, dolérite, amphibolites), avec localement les sols dérivés de roches magmatiques ou métamorphiques acides et micaschistes et secondairement, par ceux dérivés de dominance de schistes et schiste-gréseux du soubassement et des argilites du système de Karroo (Cahen et al., 1946).

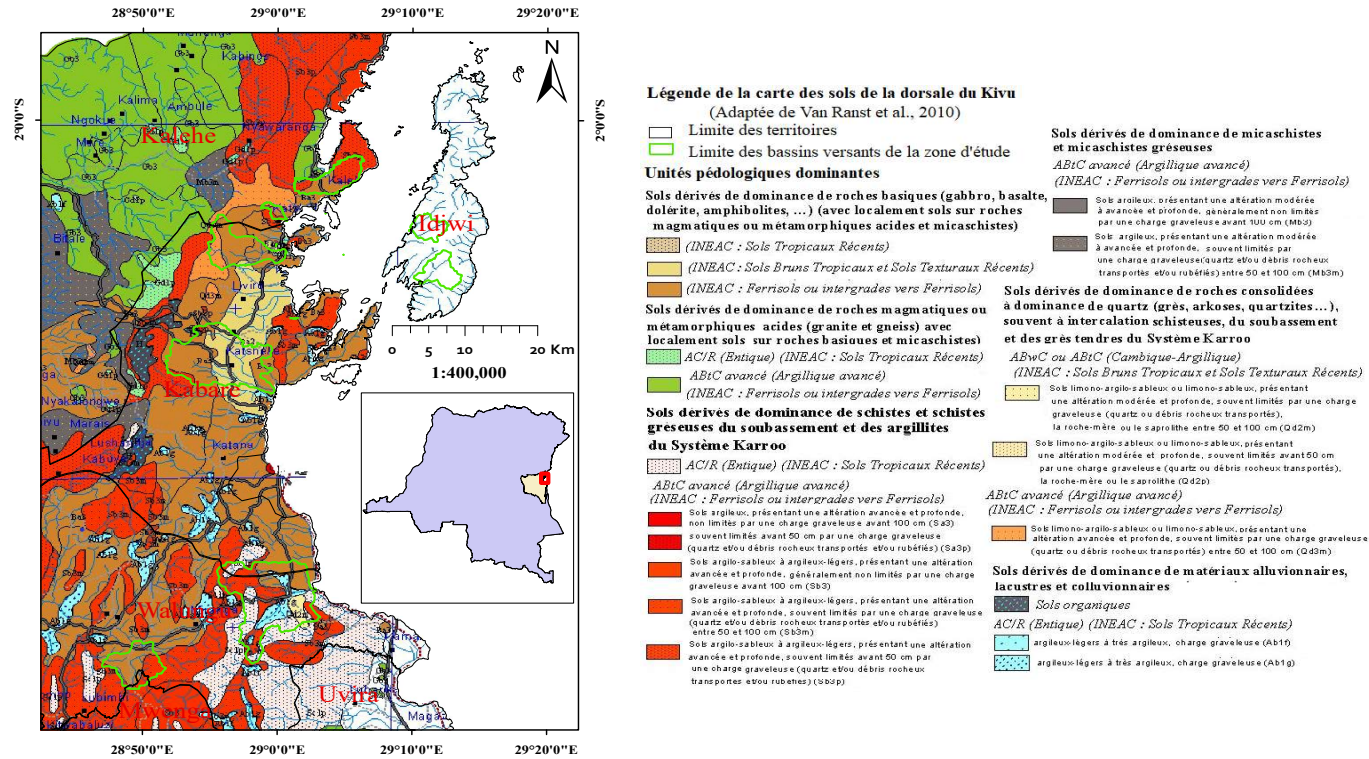


Figure 1.4. Illustration des unités pédologiques de la dorsale du Kivu avec la localisation des huit bassins versants de la zone d'étude. Adaptée sur base de la carte pédologique de la dorsale du Kivu (E=1/500 000) actualisée par Van Ranst et al. (2010).

- **Végétation et zones agroécologiques**

La végétation de la dorsale du Kivu sur la partie occidentale appartient à deux grandes régions phytogéographiques : la région soudano-zambézienne et la région guinéenne. La région soudano-zambézienne est l'aire des forêts de montagne et des savanes anthropiques qui les ont remplacées sur de vastes étendues. Elle occupe toute la zone d'altitude supérieure à 1300 m de tout le versant oriental et d'une bonne partie du versant occidental. Selon la description faite par Pecrot et Léonard (1960), les principaux types de végétation naturelle sont la végétation paludicole à l'intérieur de laquelle on trouve plusieurs groupements dont celui à dominance de *Cyperus papyrus*, de *Typha angustifolia*, de *Miscanithidium violaceum*, de *Phragmites mauritianus* et de *Cyperus latifolius*. Et la végétation constituée des forêts dont les plus importantes sont les forêts de basse altitude et les forêts de montagne dont les ombrophiles de montagne, la formation à *Arundinaria alpina*, la forêt mésophile de montagne et des recrus et forêts secondaires.

Actuellement, la grande majorité de ces formations ont été remplacées par des nouvelles résultant des perturbations anthropiques. Toutefois, quelques formations végétales naturelles subsistent et se répartissent au sein de la dorsale du Kivu en fonction de l'altitude et de la pluviométrie (zones agroécologiques), allant du climat équatorial d'altitude - étage de moyenne altitude (1400 à 1800 m), au climat tropical d'altitude au-delà de 1800 m (Tableau 1.1).

Tableau 1. 1. Principales zones agroécologiques du Sud-Kivu. La dorsale du Kivu est concernée par les zones de moyennes et de hautes altitudes

Zones Agroécologiques	Type de climat	Altitudes (m)	Pluviométrie (mm)	Végétation naturelle	Vocation agricole
Basse altitude	Equatorial de basse altitude	< 1000	> 1600	Forêts de basse altitude; Ombrophile	Palmier à huile, café robusta, riz, maïs, arachide, manioc, banane plantain
	Tropical de basse altitude	< 1000	< 1600	Savanes, Forêts de savanes; Forêts décidues	Canne à sucre, Coton, Riz, Sorgho, Mil, Maïs, Manioc, Taro, Igname
Moyenne altitude	Equatorial d'altitude Etage de transition	1000 - 1400	> 1300	Forêts sub-montagnardes	Riz, Maïs, Sorgho, Mil, Haricot, Banane plantain, Manioc, Patate douce, Palmier à huile
	Equatorial d'altitude Etage de moyenne altitude	1400 - 1800	> 1300	Forêts denses	Théier, Quinquina, Café arabica, Banane plantain, Patate douce, Haricot, Maïs, Soja, Arachide, Sorgho, Banane à bière, fruits
Haute altitude	Equatorial d'altitude Etage de haute altitude	1800 - 2800 et plus	> 1300	Forêts de haute altitude, Bambous, Prairies	Théier, Quinquina, Tabac, Pomme de terre, Petit pois, Pommier, Pêcher, Blé, Poirier
	Tropical d'altitude (moyenne et haute)	1800 - 2800 et plus	< 1600	Prairies d'altitudes Savanes arbustives Forêts semi-décidues	Cultures pluviales des zones équatoriales selon les altitudes Pâturage de saison sèche

Source : Extrait de IPAPEL (2018).

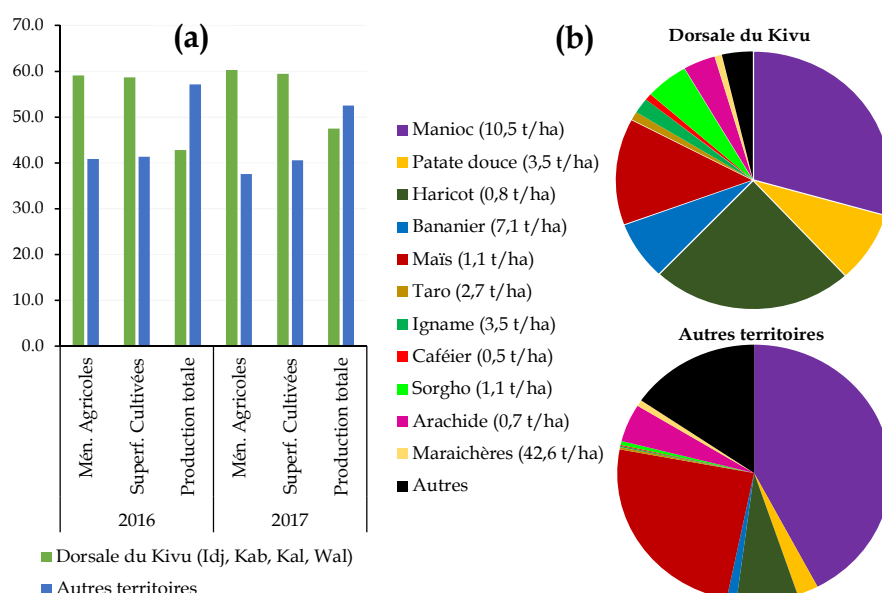
1.2.3. *Caractéristiques socio-économiques et des systèmes de production agricole*

Les quatre territoires de notre zone d'étude ne représentent qu'un peu plus de 14% de la superficie totale de la province, mais la population qui y habite représente un peu plus de 44% du total de toute la province (CAID, 2016). Plusieurs facteurs justifient l'attrait de nombreuses populations vers cette zone, dont les quatre principaux sont la présence d'un réseau routier praticable, l'altitude avec ses effets bénéfiques sur le climat, le sol assez fertile et la végétation. Aussi, la dorsale du Kivu est une zone très importante vu qu'elle intervient pour plus de 70% dans la fourniture d'aliments pour la ville de Bukavu et ses environs (IPAPEL, 2010).

En milieu rural, l'économie est basée essentiellement sur l'agriculture. Le nombre de ménages agricoles au sein des 4 territoires de la dorsale du Kivu représente en moyenne 60% du nombre total des ménages au niveau de toute la province du Sud-Kivu (Figure 1.5a), avec un rapport population totale sur nombre total de ménages agricoles assez élevé (en moyenne 5,6 pour 2016-2017) (IPAPEL, 2018). Par ailleurs, le pourcentage des superficies cultivées au sein de cette zone est en moyenne plus élevé (59%) dans les 4 territoires étudiés, comparé à celui des superficies sous cultures dans les autres territoires de ladite province (41%) (Figure 1.5a). La zone d'étude ne fournit cependant que 45% environ de la production totale de la province. Par ordre d'importance, les principales cultures sont le manioc (*Manihot esculanta* C.), le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), le maïs (*Zea mays* L.), la patate douce (*Ipomea batatas* L.) et le bananier (*Musa* sp). Ces cultures

occupent à elles seules plus des trois quarts des superficies emblavées au sein de cette zone (Figure 1.5b).

Par ailleurs, les différents types de bétail présents au sein des quatre territoires de la dorsale du Kivu sont dominés par le petit bétail dont les caprins, les ovins et les volailles qui représentent à eux seuls les deux tiers, alors que les bovins n'atteignent pas un dixième de toute la population animale.



Notes : Les rendements des cultures montrées ne concernent que la dorsale du Kivu.

Figure 1.5. Comparaison de la dorsale du Kivu avec les autres territoires de la province du Sud-Kivu en ce qui concerne les proportions du nombre de ménages agricoles, des superficies cultivées et de la production agricole totale sur deux années (2016-2017). Adapté selon le rapport biennuel de l'Inspection provinciale de l'agriculture, pêche et élevage pour 2016 – 2017 (IPAPEL, 2018).

1.3. Cadre théorique et description du problème

1.3.1. Définition du cadre théorique

1.3.1.1. Caractérisation des contextes socioéconomiques, biophysiques et de gestion des parcelles agricoles

Les caractéristiques biophysiques des parcelles telles que la qualité des sols, la forme et gradient de la pente, ou la localisation sur la toposéquence jouent un rôle capital dans la manière dont les sols sont utilisés et gérés par les exploitants agricoles (Teshome et al., 2014; Beyene et al., 2006). D'autres études ont aussi montré qu'il existe une influence directe entre la fertilité des sols, la pente des sols et l'état de l'investissement dans des pratiques de gestion de la fertilité ou de conservation des sols en général (ex., Bekele and Drake, 2003; Tittonell et al, 2005).

De même, les facteurs socio-économiques dont la rentabilité de l'activité agricole, la dotation en ressources, les caractéristiques des ménages agricoles et la perception de l'érosion sont parmi les plus importants facteurs qui affectent l'adoption des techniques de gestion et conservation des sols (ex., Sattler and Nagel, 2010; Tefera and Sterk, 2010; Tenge et al., 2004; Amsalu and de Graaf, 2006; Teshome et al., 2014). Aussi, Meijer et al. (2015) soutiennent que des facteurs intrinsèques tels que les connaissances, les perceptions et les attitudes de l'adoptant potentiel à l'égard de l'innovation jouent un rôle clé. Ces facteurs ont été analysés à travers le monde et dans d'autres contrées de hautes altitudes de l'Afrique Subsaharienne, mais au niveau de la dorsale du Kivu, aucune étude n'a déjà abordé ces thématiques.

1.3.1.2. Importance de la perception des producteurs agricoles

La perception des ménages peut être recueillie à travers plusieurs sources dont les plus courantes sont les enquêtes et les réunions de type « focus group ». Les enquêtes de ménages sont fréquemment utilisées en sciences sociales pour capturer les informations générales sur le vécu quotidien des ménages mais aussi pour recueillir les avis et tester le niveau de leur connaissance sur des thématiques diverses (Visser et al., 2003).

Les nombreuses études qui ont utilisé la perception des producteurs ont démontré que les paysans ont leurs propres critères pour estimer les aptitudes de leurs terres. Au Nord-Cameroun par exemple, il a été révélé que quatre groupes de critères étaient utilisés par les paysans pour déterminer le niveau de fertilité de leurs terres, dont les mauvaises herbes présentes; l'état biophysique du sol (macrofaune présente, texture et couleur du sol); la productivité du travail et le rendement par hectare, variable d'une culture à une autre pour une même terre (M'Biandoun et Bassala, 2007). Les recherches environnementales et appliquées en agronomie ont montré, qu'au-delà des avantages qu'offre la prise en compte d'une multiplicité de points de vue, d'intérêts et de savoirs, il est aussi recommandé de restructurer leurs apports pour une meilleure gestion des sols (ex., Jankowski, 2013; Jankowski et Le Marec, 2014).

Par ailleurs, les recherches sur l'adoption de nouvelles technologies, en l'occurrence celles de gestion et conservation des sols contre les dégradations, se sont aussi basées sur la perception des producteurs. La perception qu'ont les agriculteurs de l'érosion des sols est un facteur

social clé qui joue un grand rôle dans leur prise de décision relatives aux pratiques de gestion des terres pour contrôler les pertes de sols. En effet, plusieurs auteurs, dont Birhanu and Meseret (2013); Haghjou et al. (2014); Assefa and Rudolf (2016); Alemu et al. (2019), ont souligné l'importance de prendre en compte les perceptions des agriculteurs car elles affectent le choix et l'utilisation continue des pratiques de conservation des sols. Également, un bon nombre de ces auteurs a confirmé l'interaction entre la mise en œuvre de mesures de conservation des sols et la perception de la dégradation des sols, c'est-à-dire qu'une plus grande prise de conscience de la sévérité de la dégradation des terres et de l'impact des activités agricoles sur la dégradation des terres augmente la probabilité de mettre en œuvre des mesures efficace de lutte.

Bien que les avantages de l'utilisation des connaissances des agriculteurs pour orienter la recherche scientifique soient bien documentés, Van Asten et al. (2009) soulignent que les défis et les pièges potentiels sont nombreux surtout lorsqu'on mène des recherches participatives sur des sujets d'ordre biophysique. Ces auteurs montrent que, dans certains cas, les méthodes utilisées pour collecter les connaissances des agriculteurs sont biaisées, conduisant à la collecte d'informations inexactes ou incomplètes. Ceci conduit potentiellement au développement et à la promotion de technologies non durables, non rentables ou socialement inacceptables. Les exemples qui illustrent les raisons des écarts entre les observations des agriculteurs et des chercheurs sont nombreux et ces auteurs les résument en trois grandes catégories dont : (1) les agriculteurs et les scientifiques peuvent ne pas avoir suffisamment de connaissances sur

la complexité des systèmes, (2) les agriculteurs et les scientifiques utilisent des cadres de référence différents, et (3) des erreurs méthodologiques peuvent conduire les agriculteurs à fournir intentionnellement ou non des informations fausses ou «souhaitées» pour obtenir des avantages (à court terme). Il importe donc d'observer un certain nombre des lignes directrices pour améliorer l'intégration des connaissances des agriculteurs afin de développer des options technologiques appropriées qui sont à la fois respectueuses de l'environnement et adaptables aux conditions locales.

Au sein de la dorsale du Kivu et au Sud-Kivu en général, les agriculteurs ont une bonne connaissance des sols qu'ils exploitent, à qui ils donnent des noms en langues vernaculaires locales, bien que cette connaissance n'implique pas nécessairement une gestion adéquate de leur part (Heri-Kazi et Collinet, 2014). Plusieurs freins ont été identifiés et qui empêchent l'adoption de méthodes de protection des sols contre les dégradations. Pour la lutte antiérosive par exemple, les projets qui ont jadis été implémentés n'ont pas tenu compte des aspirations des producteurs qui sont plus susceptibles d'adopter une technique si celle-ci leur permet d'avoir un surplus en termes de production (Alemu et al., 2019; Ngondjeb et al., 2011). D'autres projets comme ceux de la mission antiérosive au Kivu (MAE) ou la mission forestière crête Zaire-Nil (MFCZN) ont mis en œuvre des approches ou proposé des techniques qui étaient soit exigeantes en termes de main d'œuvre et de superficie, soit plutôt basées sur la réalité de pays comme le Rwanda (Moeyersons, 1994; König, 1993), ce qui n'a pas permis leur réussite.

1.3.1.3. Caractérisation de l'érosion hydrique sur les parcelles agricoles.

L'érosion du sol est un processus naturel qui se produit au cours du temps géologique, et qui est essentiel pour la formation du sol (Roose, 1993). En ce qui concerne la dégradation des sols, la plupart des préoccupations concernant l'érosion sont liées à une érosion accélérée, où le taux naturel a été considérablement augmenté principalement par l'activité humaine.

Les processus d'érosion hydrique du sol impliquent le détachement du matériau par deux processus dont l'impact des gouttes de pluie et la force de friction de l'écoulement. Ce matériau est transporté par écoulement d'eau. Le ruissellement est le principal moteur direct de l'érosion hydrique et, par conséquent, les processus qui influencent le ruissellement jouent un rôle important dans toute analyse de l'intensité de l'érosion du sol (Borrelli et al., 2017). En enlevant la couche superficielle et donc la terre la plus fertile, l'érosion réduit la productivité du sol et, lorsque les sols sont peu profonds, peut entraîner une perte irréversible des terres agricoles naturelles. Même là où la profondeur du sol est bonne, la perte de la couche arable n'est souvent pas visible mais néanmoins potentiellement très dommageable (Panagos et al., 2014).

Plusieurs types d'érosion hydrique existent, dont les plus importants en Afrique sub-saharienne humide sont l'érosion en nappe, en rigole et en ravine (Roose, 1993). L'érosion en nappe étant difficile à déceler; il reste cependant la forme la plus répandue dans les champs cultivés. Sous son effet, les racines des arbres et des plantes se déchaussent progressivement. Toutefois, ce type d'érosion ne rend pas compte des

dégâts actuels de l'érosion, qui fait pourtant l'objet de la présente étude. L'érosion en rigoles ou en griffes (Microchannel ou Rill erosion) est un aspect de l'érosion linéaire. Elle se produit lorsqu'il y a des irrégularités à la surface du sol, souvent dues aux façons culturales. Les eaux se concentrent, coulent suivant les lignes de moindre résistance et le ruissellement acquiert une certaine énergie abrasive qui détache et met en mouvement des particules. Il en résulte des chenaux relativement petits (dont l'importance dépend de l'énergie du ruissellement et de la nature du sol) qui constituent des « griffes » ou « filets » ou encore rigoles. Ces rigoles disparaissent généralement après passage d'outils agricoles. En revanche, l'érosion par ravines (gully erosion) est une forme accentuée de l'érosion par rigoles. Au cours du temps, les eaux se concentrent dans les rigoles et les creusent en profondeur si le substratum est tendre ou superficiellement si le substratum est dur. Ces ravines peuvent fragmenter les terres agricoles. Le sol enlevé par le ruissellement du sol, par exemple lors d'une grosse tempête, a souvent des effets négatifs sur le rendement des cultures et la sédimentation en aval (Wells et al., 2016), dans certains cas graves obstruant les routes ou les canaux de drainage et inondant les bâtiments (Scholten and Seitz, 2019). Le taux d'érosion est très sensible à la fois au climat et à l'utilisation des terres, ainsi qu'aux pratiques agricoles et de conservation au niveau de l'exploitation (Steinhoff-Knopp and Burkhard, 2018).

Dans une période de changements rapides du climat et de l'utilisation des terres dus aux changements globaux, aux politiques agricoles et aux forces changeantes du marché, il est d'une importance vitale de pouvoir évaluer l'état de l'érosion des sols en utilisant une

méthodologie objective. Cette méthodologie doit également permettre de répéter l'évaluation de l'érosion au fur et à mesure que les conditions changent, ou d'explorer les implications des changements potentiels à différentes échelles (ex., Le Bissonnais et al., 2002). Une telle méthodologie est inexistante pour la dorsale du Kivu et pour le Sud-Kivu en général. Et pourtant, les résultats de l'application d'une telle méthodologie pourrait fournir des estimations de quantité de pertes en terre globales attribuables à l'érosion dans les conditions actuelles et modifiées, et ainsi permettre d'identifier objectivement les domaines où une étude plus détaillée est nécessaire et où des mesures correctives sont possibles.

La région de la dorsale du Kivu est particulièrement susceptible à l'érosion car elle est sujette à de fortes rafales de pluie érosive, tombant sur des pentes raides aux sols fragiles. Cela contraste avec les zones de basse altitude, où l'érosion du sol est moindre car la pluie tombe sur des pentes principalement douces. Cependant, même dans ces zones, l'érosion est toujours un problème grave pour la productivité des sols agricoles et est en augmentation (Azanga et al., 2016). Dans certaines parties de la dorsale du Kivu, l'érosion a atteint un stade d'irréversibilité et, à certains endroits, l'érosion a pratiquement cessé car il n'y a plus de sol. Les principales causes de l'érosion des sols restent les pratiques agricoles inappropriées, la déforestation, le surpâturage, les incendies de forêt et les activités de construction (Majaliwa et al., 2012).

Pour répondre à la demande toujours croissante en denrées alimentaires des populations, il convient de maîtriser les facteurs qui

limitent la production agricole, dont la dégradation des terres. Cependant, cette maîtrise sous-entend une bonne compréhension non seulement des phénomènes de dégradation, mais aussi des contextes dans lesquels ils se produisent pour pouvoir proposer des mesures appropriées de gestion de la ressource sol (Bekele and Drake, 2003; Amsalu and de Graaf, 2007). Le gouvernement congolais d'une part, et la province du Sud-Kivu d'autre part reconnaissent, à travers tous les documents de stratégies de réduction de la pauvreté (DSRP), qu'il est prioritaire de mettre en place des réformes dans ce secteur pour sortir le pays en général et la province en particulier, du marasme dans lequel il se trouve (DSRP-1, 2005; DSRP-2, 2011). Sur le plan agricole, le rapport présenté par Hauser et al. (2007) montre que l'érosion du sol est, entre autres, un problème général très sérieux dans la plupart des provinces de la RDC et plus particulièrement au Sud-Kivu. Cependant, sans savoir l'étendue et la sévérité du problème, il est difficile, voire impossible de s'attaquer aux facteurs qui empêchent l'implémentation de mesures efficaces de contrôle d'érosion. Ces facteurs sont probablement dus, entre autres, aux conditions sociales et économiques des producteurs agricoles et doivent impérativement être analysés pour améliorer la protection et la fertilité des sols. Sans aucun doute, la perte de sol par érosion affectera le niveau des ressources naturelles, avec des conséquences évidentes sur la fertilité.

Les approches permettant de faire la caractérisation *in situ* de l'érosion sur les parcelles agricoles sont nombreuses. Les érosions en rigoles et en ravines éphémères ont été depuis longtemps mesurées à l'aide d'une grande variété de techniques (ex., Cerdan et al., 2002; De Stantisteban et al., 2006; Yan et al., 2015; Di Stefano et al., 2017). Elles ont été

quantifiées à l'aide de mesures d'échantillons de surveillance du ruissellement, de collecte de sédiments, de levés de stations totales et par les méthodes de capteurs de détection LiDAR (*Light Detection and Ranging*) et de photogrammétrie. Cependant, les données générées par ces méthodes peuvent différer en termes de résolution spatiale et temporelle des informations collectées, du temps et des équipements nécessaires à la conduite de l'enquête, le niveau de perturbation des activités agricoles et l'expertise requise pour collecter et traiter les informations (Wells et al., 2016).

Ainsi, au vu de toutes les particularités et exigences de ces méthodes, il n'apparaît pas aisé de le répliquer dans tous les environnements, à l'exemple des parcelles de petits exploitants agricoles. Par ailleurs, la méthode de monitoring de l'érosion en rigoles et en ravines éphémères par les transects perpendiculaires à la pente semble être la mieux indiquée sur les parcelles agricoles, comme celles de la dorsale du Kivu. Selon Lombart (1996), les avantages de cette méthode sont nombreux car ils permettent de répondre à plusieurs soucis : pouvoir mesurer ponctuellement n'importe quelle parcelle agricole, à n'importe quel moment, sans installation préalable. Aussi, les mesures se font quel que soit la forme de la parcelle et peuvent se réaliser à moindres frais, comparés à une installation de récupération des matériaux érodés. C'est sur base de tous ces avantages que cette méthodologie a été utilisée dans la présente étude pour la mesure des taux d'érosions sur les parcelles agricoles de la zone d'étude.

1.3.2. Description du problème

1.3.2.1. Absence d'une analyse des contextes biophysiques et socioéconomiques en lien avec la dégradation des terres.

Vu la forte pression démographique, la pluviométrie importante et le relief très prononcé, on observe en de nombreux endroits de la dorsale du Kivu un important problème de dégradation des sols, notamment celle par érosion hydrique dont la pratique de l'agriculture serait l'élément déclencheur (Bitijula and Lal, 1983). Une analyse des contextes socioéconomiques et biophysiques permettrait de faire la caractérisation du milieu pour mieux prendre en compte tous les éléments à la base de la dégradation, ce qui pourrait mener à la réussite de la restauration des terres dégradées (Lal, 1988). Malheureusement, les informations objectives et actualisées sur la dégradation des terres manquent cruellement pour la dorsale du Kivu et pour toute la province du Sud-Kivu en général, en comparaison avec le Rwanda, le Burundi ou l'ouest de l'Ouganda qui font pourtant tous partie de la RGL (ex., Bizoza, 2014; Nijimbere and Lizana, 2019; De Meyer et al., 2011). Cette situation est, entre autres, largement imputable à l'insécurité persistante causée par les guerres à répétition que la province du Sud-Kivu a connues (1997 et 2002) et qui n'a pas épargné le système de recherche qui a encore du mal à s'affranchir du mauvais état dans lequel il était plongé plusieurs années durant (Cox, 2012).

1.3.2.2. Absence d'une implication satisfaisante des agriculteurs dans l'identification et la quantification des problèmes d'érosion au sein des bassins versants

Avec une occupation quasi permanente de certains sols, due à une diminution de l'espace cultivable, conséquence directe d'une forte pression démographique, les dispositifs de lutte contre l'érosion ne

sont pas épargnés (Rishirumuhirwa, 1994). Actuellement, on a notamment constaté la disparition quasi-totale d'éléments structurants du paysage (fosses, haies, talus) hérités de l'époque coloniale ou des projets comme la Mission Antiérosive du Kivu (Moeyersons, 1989, Moeyersons, 2004); ou encore le développement de petites parcelles réparties tout le long des collines où habitations et champs de culture sont mélangés sans systèmes de gestion des écoulements (ruissellements ou infiltration) (ex., Majaliwa et al., 2012; Adidja et al., 2016). Ainsi, tenter de résoudre une problématique aussi complexe que l'érosion sans tenir compte de la perception et des connaissances des producteurs paysans est voué à l'échec. En effet, le fait de faire appel aux connaissances des agriculteurs pour évaluer l'impact de leurs activités agricoles sur l'érosion peut les inciter à prendre conscience de leur rôle dans les changements survenus dans leur paysage, mais aussi servir pour relever les indicateurs qu'ils perçoivent comme pertinents pour l'estimation de l'érosion sur leurs parcelles (ex., Okoba and Sterk, 2005).

1.3.2.3. Manque de données sur l'intensité et l'étendue de l'érosion en lien avec les activités agricoles au niveau des bassins versants.

Afin de connaître le niveau d'intervention qu'il sera souhaitable de mettre en place, il faut définir l'intensité et l'étendue approximatives de l'érosion (Hauser et al., 2007). Cela se fait par des observations sur le terrain. A cause du manque d'approches appropriées pour évaluer la dégradation de sol par érosion hydrique, dans plusieurs pays, les experts en planification d'utilisation des terres adoptent les recommandations provenant de sites expérimentaux ou basées sur des modèles de risque d'érosions qui ne sont pas toujours adaptées aux

conditions locales. Cette manière de procéder engendre des coûts excessifs, voire des graves erreurs (Lal, 1994). Au contraire, évaluer l'intensité et l'étendue de l'érosion en prenant en compte les activités agricoles adoptées par les producteurs devrait fournir des informations beaucoup plus proches de la réalité des producteurs que les mesures sur sites expérimentaux ou des modèles d'érosions qui nécessitent de toute façon la validation par des données de terrain en milieu réel. Cet argument est d'ailleurs soutenu par les études conduites dans d'autres régions à hautes altitudes qui ont montré que les approches conventionnelles sont largement limitées par les différences dues au relief et au climat dans ces zones (ex., Okoba and Sterk, 2004). Ainsi, ces approches n'aboutissent pas à une évaluation fiable de l'état de l'érosion comme le ferait celle qui combine la méthode scientifique et les indicateurs issus des perceptions paysannes (Roose, 2003 et Pla, 2003 cités par Okoba and Sterk, 2004). Malheureusement, c'est la même situation qui s'observe au Sud-Kivu et plus particulièrement au sein de la dorsale du Kivu. Les recommandations de gestion de l'érosion des sols au niveau des parcelles agricoles ne sont pas actualisées et datent soit de l'époque coloniale, soit sont basées sur des études conduites dans les pays voisins (comme la République Rwandaise).

Pour la dorsale du Kivu, les études concernant les facteurs et les processus de l'érosion sur les parcelles agricoles sont soit anciennes, soit quasiment absentes. Il en est de même pour ce qui est de l'étendue et de la sévérité de dégradation par érosion ou de l'évaluation des risques qu'elle engendre. Il apparaît donc qu'au stade actuel, les faits sont connus mais sans pour autant qu'on ne dispose d'informations

(scientifiques) précises sur l'état réel de la situation au niveau de la dorsale du Kivu.

1.3.2.4. Absence d'un système cohérent de gestion des bassins versants.

Le programme de réhabilitation de la recherche agricole et forestière en RDC (Hauser et al., 2007) a entre autres pour grands défis, pour le Sud-Kivu en particulier, de passer impérativement par une approche intégrée de gestion de la petite agriculture paysanne au sein des bassins versants pour parvenir à la rendre économiquement viable et écologiquement durable. Les activités au sein des bassins versants doivent être gérées avec ingéniosité pour réaliser les avantages économiques tout en préservant l'habitat et les fonctions hydrologiques que les bassins versants fournissent et qui sont d'une grande importance à la stabilité de l'environnement à long terme (FAO, 2009). Mais, aussi évident que ceci puisse paraître, une approche intégrée de gestion durable des bassins versants n'existe pas dans la province du Sud-Kivu et encore moins dans les autres provinces de la RDC. La collecte des données qualitatives et quantitatives sur la pratique de l'agriculture et de son impact au sein des bassins versants ainsi que leur analyse en tenant compte de leurs contextes biophysiques et socioéconomiques manquent énormément. Elles sont pourtant très importantes pour comprendre les limites à la gestion des bassins versants dans cette zone et proposer une approche intégrée et durable de gestion des bassins versants au bénéfice de toutes les populations vivant dans ce milieu et celles de toute la province du Sud-Kivu en générale. Aussi, pour la bonne gestion des ressources et de l'écosystème tout entier au sein de cette zone montagneuse, les acteurs de développement et les agriculteurs ont besoin de repères pour les

guider à faire un choix judicieux de technologies appropriées à leurs situations (Majaliwa et al., 2012). De même, pour les chercheurs et les agents de développement concernés par la surveillance des écosystèmes, il est important de pouvoir disposer d'outils permettant de cibler au mieux les zones à risque et/ou d'un outil d'aide à la gestion du terroir (ex., Shimelis et al., 2009; Le Bissonnais et al., 2002).

1.4. Objectifs de l'étude

Cette thèse a comme objectif global de faire une caractérisation de l'érosion hydrique et des mesures de conservation des sols sur les parcelles agricoles du Sud-Kivu, afin de contribuer à long terme à la mise en œuvre d'un outil et d'un système de gestion coordonnée des actions de lutte contre l'érosion des sols.

Trois objectifs spécifiques sont poursuivis par cette étude :

1. Evaluer comment la diversité des conditions environnementales et socioéconomiques rencontrées dans cette région influe sur les choix des cultures et des pratiques culturales et finalement, sur l'état perçu de dégradation des terres (Chapitre 2)
2. Évaluer les connaissances des agriculteurs en matière d'érosion des sols et de mesures de conservation des sols et de leurs contraintes d'adoption (Chapitre 3).
3. Quantifier les taux de pertes en terre réelles dues à l'érosion en rigoles et en ravines dans les champs des petits agriculteurs et relier ces taux d'érosion aux principales caractéristiques des systèmes de culture et des champs (Chapitre 4).

1.5. Méthodologie générale

1.5.1. Approche globale de l'étude

La compréhension des processus de dégradation des terres ne consiste pas simplement à analyser les processus physiques et biochimiques qui entrent en jeu. Ces processus doivent aussi être considérés dans le contexte des facteurs sociaux, culturels et politiques (Beyene et al., 2006). Ainsi, la démarche globale adoptée par cette étude est présentée schématiquement dans l'organigramme à la Figure 1.6.

Pour atteindre les objectifs assignés à cette étude, l'hypothèse de départ était que si la notion d'échelles (dorsale du Kivu, bassin versant et parcelle agricole) est prise en compte dans la caractérisation de l'érosion hydrique, cette approche pourrait contribuer à long-terme à la mise en œuvre d'un outil et un système de gestion coordonnée des actions de lutte contre l'érosion au niveau de toute la sous-région. En effet, dans plusieurs anciens programmes d'intervention ou de recherches menées au sein et/ou autour de cette zone sur la dégradation des terres par l'érosion hydrique notamment, il s'y est observé une difficulté de reproduction d'expériences locales réussies. Ces difficultés techniques d'extrapolation, résultant entre autres du non-respect de la notion d'échelles dans l'analyse de la problématique de dégradation des terres, ont été rapportées dans de nombreux environnements (FAO, 2009). Par conséquent, comme point d'entrée et pour répondre aux questions de recherche, les données ont été collectées au niveau de la parcelle au sein de bassins versants, puis confrontées à des données des contextes socioéconomiques et environnementaux de ces bassins versants pour caractériser l'état de la

gestion des sols au sein dorsale du Kivu. Dans un deuxième temps, les mesures de taux d'érosion en rigoles et en ravines ont été faites sur les parcelles agricoles pour les mettre en relation avec les caractéristiques biophysiques et socioéconomiques des exploitations.

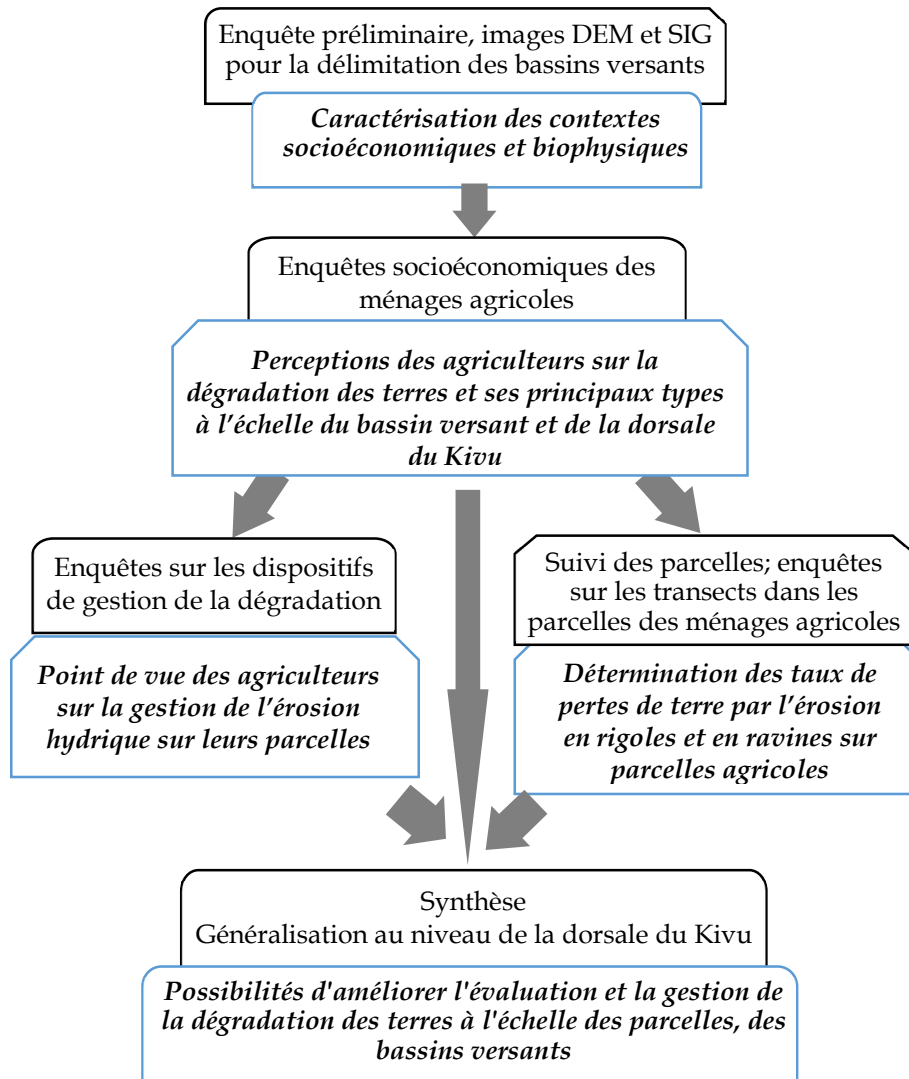


Figure 1.6. Schéma de l'approche globale de l'étude montrant les liens entre les démarches méthodologiques à différentes échelles d'analyse en vue d'améliorer l'évaluation et la gestion de la dégradation des terres au sein de la dorsale du Kivu.

1.5.2. Aperçu général sur la méthodologie

Cette étude a opté pour une démarche articulée en deux volets complémentaires :

1. Un volet d'enquête visant à mettre en relation la perception des producteurs de la sévérité de la dégradation des sols avec d'une part les contextes environnementaux et socioéconomiques et d'autre part les modes de gestion des terres et des pratiques au sein de 8 bassins versants de la dorsale du Kivu;
2. Un volet de monitoring de l'érosion en rigole et en ravine à l'échelle de la parcelle agricole pour un temps assez long (4 saisons agricoles de 2015-2017) au sein de deux bassins versants représentatifs de la dorsale du Kivu.

Ainsi, différentes méthodologies ont été utilisées dans cette étude pour recueillir les données qui ont permis de répondre aux questions de recherche et aider à tester ses hypothèses.

Le travail a débuté au niveau régional en prenant comme unité d'observation la dorsale du Kivu (Fig. 1.2, Tableau 1.1) avec ses 4 territoires. Les données collectées auprès des groupes ciblés (autorités politico-administratives, personnes ressources, responsables des comités locaux de développement...) ont servi comme données secondaires. Ensuite, la cartographie a été utilisée pour la délimitation des bassins versants au sein desquels les enquêtes de ménages ont été conduites et, plus tard, le monitoring des signes d'érosion sur les

parcelles agricoles au sein de deux bassins versants représentatifs de la dorsale du Kivu.

Le choix des bassins versants a été fait en fonction de leur accessibilité en tenant compte de trois principaux axes routiers au sein de la dorsale du Kivu (Figure 1.2; Tableau 1.2). Aussi, ils ont été choisis pour prendre en compte le plus possible la diversité des types des sols répertoriés au sein de cette zone, dont certains sont fortement altérés (Walungu et Idjwi) et, d'autres encore relativement productifs (Kabare et Kalehe). Enfin, ce choix a aussi été fait en fonction des moyens disponibles et compte tenu du temps imparti, étant donné la vaste taille des territoires concernés par cette étude.

Au total 8 bassins versants répartis au sein de 4 territoires de la dorsale du Kivu (Figure 1.2 et 1.4) ont été délimités à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 30 m x 30 m disponible sur le site d'ASTER GDEM2 (NASA and METI, 2011) et identifiées par les coordonnées S02 et S03 (E027, E028 et E029). La délimitation des bassins versants a été faite à l'aide du logiciel Arc Gis 10.4.0. Le module Arc Hydro a été utilisé pour générer les cours d'eau avant la délimitation des bassins versants.

Les données issues d'entretiens avec les autorités locales et les personnes ressources ainsi que des enquêtes au niveau des ménages exploitant les parcelles au sein desdits bassins versants ont été collectées et analysées pour répondre aux deux premiers objectifs de cette étude.

Tableau 1. 2. Principales caractéristiques socioéconomiques et biophysiques des huit bassins au sein de la dorsale du Kivu, RD. Congo - Main socioeconomic and biophysical characteristics of the eight watersheds within the Kivu dorsal, DR. Congo

Caractéristiques	Kalehe		Kabare		Idjwi		Walungu	
	Kal1	Kal2	Kab1	Kab2	Idj1	Idj2	Wal1	Wal2
Principale rivière	Sangano	Nyambasha	Chiranywabwa	Mushuva	Musheke	Mwiri	Mugera	Kadubo
Superficie du bassin (ha) ^a	2975	459	4456	10204	2085	1417	12297	3690
Axe routier	Bukavu-Goma	Bukavu-Goma	Bukavu-Goma	Bukavu-Goma	Lac-Kivu	Lac-Kivu	Bukavu-Uvira	Bukavu-Kindu
Distance (de Bukavu en km)	67 ^s	61 ^s	54 ^s	26 ^s	56 ^p	64 ^p	27 ^s	69 ^s
Densité (hab. /km ²) [‡]	599	228	379	355	1163	2316	93	358
Population par bassin ^b	17 842	10 472	16 902	36 315	24 267	32 826	11 543	13 238
Village enquêté (nombre)	9	4	8	9	2	7	10	6
Dimension des parcelles (ha)	0,5-10	0,5-2	0,5-3	0,5-5	0,5-2,5	0,5-2	0,25-2	0,25-2
Service et personnel pour la vulgarisation agricole	Plusieurs, personnel non formé; ONG locale/ Internationale	1, pour tous les villages (pas du domaine agricole et impayé)	Pas de vulgarisateur; ONG locales/ Internationales	1 vulgarisateur (mobilisateur) pour la collecte de la taxe sur caféier et canne à sucre	Pas de vulgarisateur; Seulement ONG locales	Oui, pas de financement (pas moyens de payer un vulgarisateur)	Service agricole existe mais sans moyens financiers	Pas de vulgarisateur; ONG locale /Internationale
Accès aux marchés urbains	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non
Types des marchés locaux disponibles	5 petits et 1 principal	3 petits et 1 principal	2 petits et 1 principal	Plusieurs petits marchés et 1 principal	Plusieurs petits marchés et 3 principaux	1 marché principal, 5 marchés par	1 principal et 4 petits	1 principal; 6 petits

Caractéristiques	Kalehe		Kabare		Idjwi		Walungu	
	Kal1	Kal2	Kab1	Kab2	Idj1	Idj2	Wal1	Wal2
						produit (bétail, manioc, ...)		
Pressions abiotiques	Sédimentations au littoral; déforestation	Débordement des rivières; déforestation	Déforestation (fabrication du charbon de bois)	Déforestation (fabrication du charbon de bois)	Sédimentations au littoral; déforestation	Sédimentations au littoral; déforestation	Sédimentation dans les marais Déforestation	Déforestation
Altitude moyenne (Ecart-type) [m]	1629 (27,3)	1610 (92,9)	1601(77,0)	1608 (58,6)	1554 (48,9)	1613 (115,3)	1588 (24,4)	1610 (51,2)
Longitude (°)	28,89 à 28,92	28,85 à 28,86	28,84 à 28,86	28,69 à 28,84	29,03 à 29,08	29,02 à 29,04	28,83 à 28,89	28,65 à 28,76
Latitude (°)	-2,08 à -2,10	-2,12 à -2,14	-2,18 à -2,20	-2,34 à -2,38	-2,14 à -2,22	-2,12 à -2,22	-2,65 à -2,69	-2,73 à -2,80
Texture (appréciation tactile selon la méthode ACED (Herweg, 1996))	Argileuse; Argilo-sableuse	Argileuse; Argilo-sableuse	Argileuse	Argileuse	Sableuse et Argileuse	Sablo-Argileuse et Argileux lourd	Argilo-Sableuse et Argileuse	Argileuse
Géomorphologie	Collines; Bas-fonds	Haut-plateaux Collines; Bas-fonds	Collines; Plateaux	Collines; Plateaux; Bas-Fonds	Collines; Bas-fonds	Collines et plateaux	Bas-fonds; plaine; Collines et plateaux	Collines et plateaux

^a Déterminée et calculée sur base de la superficie des bassins à partir du logiciel Arc GIS 10.2.2

^b Données issues des recensements des populations au premier et au dernier trimestre 2015 par les centres de santé se trouvant au sein des entités enquêtées et sur base des données des rapports annuels des territoires (2014 et 2015) et de l'Inspections de Santé (<https://caid.cd/index.php/donnees-par-province-administrative/province-de-sud-kivu>); § Par la route, ¶ par le lac.

(°)Cordonnées géographiques exprimées en degré décimal (DD) * Sur la base des données des recensements de population au premier et dernier trimestre de 2015 par les centres de santé de la zone d'étude. Petit marché= marché local du soir ou de jour; Marché principal= hebdomadaire ou bihebdomadaire et important.

La taille de l'échantillon a été fixé à 90 ménages agricoles au sein de chacun des 8 bassins versants, soit un total de 720 ménages pour les enquêtes et, à 45 parcelles pour le monitoring des signes d'érosion sur quatre saisons pluvieuses consécutives pour deux bassins versants parmi les 8. Ce choix n'a pas tenu compte de différentes tailles des bassins versants étant donné le manque des statistiques fiables sur le nombre de ménages agricoles dans chacun des villages se trouvant à l'intérieur des bassins versants.

Les enquêtes des ménages ont été administrées sous formes d'entretiens semi-structurés à l'aide d'un questionnaire et d'un guide d'entretien. Les questions sous forme de listes non exhaustives ont été conçues pour donner priorité aux propositions de l'enquêté. Aussi des questions ouvertes ont été intégrées et ont permis aux ménages de s'exprimer par rapport aux perspectives des problèmes d'érosion auxquels ils font face. Ainsi, les principaux axes de l'entretien réalisé avec les ménages et dont les détails sont présentés en annexes (Annexes B) étaient : l'historique de la parcelle agricole; le degré d'appréciation du niveau de fertilité de la parcelle; la disponibilité et l'utilisation des facteurs de production; les pratiques agricoles et cultures adoptées par le ménage; la perception du ménage sur les processus d'érosions et leurs impacts dans son champ; les méthodes et techniques de lutte contre les érosions; la perception par rapport aux pratiques, cultures et modes de gestion en lien avec l'érosion observées sur leurs parcelles ainsi que leurs perspectives par rapport à l'avenir de leurs parcelles.

Ensuite, il a été étudié plus en détail la situation de deux bassins versants ayant des caractéristiques représentatives de la situation générale de la zone d'étude pour une période de 2 ans (soit 4 saisons agricoles), pour ce qui concerne le monitoring des parcelles agricoles et de l'érosion en rigoles et ravines. Elle a été faite en deux étapes. La première étape a été consacrée à l'identification des caractéristiques générales de la parcelle agricole à l'aide d'une fiche technique selon le modèle ACED (Herweg, 1996) (en annexes), reprenant les éléments sur le positionnement de la parcelle, l'aspect des propriétés physiques (degré de rugosité, drainage, configuration et gradient de la pente, ...), la localisation de la parcelle sur la toposéquence, le mode de gestion et de conservation du sol, l'estimation du couvert végétal et la détermination de la cohésion du sol.

La seconde étape a été consacrée à la caractérisation des rigoles et ravines par la méthode de mesure sur parcelle des sections transversales des chenaux à l'aide des transects parallèles orientés perpendiculairement à la pente générale de la parcelle (ex., Casali et al., 2006; De Santisteban et al., 2006). En effet, selon ces auteurs, l'évaluation directe est essentielle car elle est très précise et simple, mais aussi moins coûteuse comparée à d'autres méthodes qui nécessitent par ailleurs souvent des méthodes directes pour leur validation. Ainsi, étant donné sa simplicité et sa précision, cette méthode a été utilisée lors des monitorings des parcelles à raison de six visites par saison à partir du début de la saison et à intervalles de 2 semaines (soit 12 semaines au total), période considérée comme la fin de la saison culturale.

Dans cette thèse, les données collectées sur la caractérisation de l'érosion en rigoles et en ravines ont servi dans le quatrième chapitre. Cette caractérisation de l'érosion a concerné les parcelles des ménages ayant indiqué des problèmes d'érosion hydrique et qui se trouvent au sein de deux bassins versants représentatifs de la dorsale du Kivu (types des sols, occupation des sols par les pratiques agricoles et les cultures). Plusieurs tests statiques dont le test de Khi-deux, l'analyse des variances, les corrélations et le modèle général de régressions linéaires (GLM) ont été utilisés pour analyser ces données. Aussi, les données pluviométriques, les caractéristiques physico-chimiques des sols (grâce aux échantillons de sol prélevés et analysés au laboratoire) et de l'occupation du sol par les cultures, considérées comme paramètres explicatifs de l'érosion hydrique ont été utilisées dans les analyses statistiques pour tenter d'établir des liens entre l'étendue de l'érosion et ses variables explicatives les plus pertinentes dans la zone d'étude.

Enfin, les résultats de cette étude ont été confrontés à ceux d'autres chercheurs qui ont travaillé sur la problématique de l'érosion hydrique dans le contexte de hautes altitudes en régions tropicales ou ailleurs ainsi que ceux qui ont utilisé la modélisation sur la problématique des érosions en général. À la fin, une analyse critique des méthodes utilisées a été abordée pour permettre de tirer des conclusions ainsi que des recommandations et des perspectives.

Toutes les analyses statistiques sont faites à l'aide d'une part, de statistiques descriptives et de l'analyse en composantes principales et

d'autre part, à l'aide des tests d'indépendance de Khi-deux, l'analyse en composante multiple et l'analyse factorielle des correspondances. Aussi, les analyses de variances ainsi que la régression simple et logistique et l'analyse des corrélations et du modèle mixte de régressions linéaires multiples ont été faites.

1.6. Structure de la thèse

Cette thèse contient cinq chapitres. **Le chapitre 1** présente le contexte de l'étude, l'énoncé du problème, des questions de recherche, un cadre conceptuel et un aperçu général sur les méthodologies utilisées. Les objectifs de recherche formulés à la section 1.4 sont abordés dans trois chapitres de recherche interdépendants et complémentaires (chapitres 2 à 4), suivis de la synthèse générale (Chapitre 5).

Le chapitre 2 examine les caractéristiques des exploitations agricoles et la perception des agriculteurs afin de déterminer comment la diversité des contextes biophysiques et socioéconomiques au Sud Kivu en R.D. Congo affecte les choix de cultures et de pratiques culturales et in fine, l'état de dégradation des terres tel que perçu par les agriculteurs sur les hautes terres de la dorsale du Kivu.

Le chapitre 3 analyse en profondeur la perception de la dégradation par l'érosion hydrique pour la mettre en lien avec l'impact perçu de l'occupation des sols par les cultures et pratiques agricoles adoptées au sein de la dorsale du Kivu. Il fournit également des informations sur les types de mesures de lutte contre l'érosion hydrique ainsi que les contraintes d'adoption de ces technologies. Des analyses statiques ont

été faites sur les indexes de sévérité de l'érosion issus des résultats du chapitre 2 pour d'une part, analyser leurs relations avec les cultures et les techniques de gestion et conservation des sols présentes dans leurs parcelles et d'autre part, analyser leurs relations avec les indexes d'efficacité de ces mesures de lutte.

Le chapitre 4 présente une analyse comparative entre les caractéristiques des parcelles agricoles et le taux de perte de terre par érosion en rigoles et en ravines. Cette analyse est faite pour caractériser non seulement les relations entre les taux d'érosions et les variables provenant des analyses des sols mais aussi d'autre part, pour déterminer les facteurs de variabilité de ces pertes de terre ainsi que pour les mettre en relation avec les facteurs biophysiques du milieu.

Le chapitre 5 synthétise et analyse les principaux résultats de l'étude et leurs implications pour les interventions de gestion des terres, et apporte des réponses aux questions de recherche formulées dans cette thèse. Il présente également des recommandations en matière de politique, de vulgarisation et de recherche.

Chapitre 2

*Dégradation des terres cultivées au Sud Kivu, R.D. Congo: perceptions paysannes et caractéristiques des exploitations agricoles**

“Cropland degradation in South Kivu, D.R. Congo: farmers’ perceptions and farm characteristics”

* Ce chapitre est publié comme :

Aimé B. Heri-Kazi & Charles L. Bielders, «Dégradation des terres cultivées au Sud-Kivu, R.D. Congo : perceptions paysannes et caractéristiques des exploitations agricoles», BASE [En ligne], Volume 24 (2020), Numéro 2, 99-116 URL : <https://popups.uliege.be:443/1780-4507/index.php?id=18544>.

Résumé

La dégradation des terres est régulièrement citée comme un problème majeur dans la dorsale du Kivu (Sud-Kivu, Est de la RDC) en raison des précipitations importantes, du relief marqué et de la forte pression démographique sur les terres. Il existe cependant un manque criant d'informations actualisées sur la dégradation des sols dans cette zone comparé aux pays environnants de la Région des Grands Lacs. Cette étude vise donc à évaluer l'état de dégradation des sols tel que perçu par les agriculteurs et à le mettre en lien d'une part, avec les contextes biophysiques et socioéconomiques de la zone et d'autre part, avec les choix de cultures et des pratiques agricoles opérés. Pour cela, des enquêtes concernant le niveau et les formes de dégradation des parcelles, les cultures et les pratiques culturales ont été conduites auprès de 720 petits exploitants agricoles dans 8 bassins versants répartis au sein de 4 territoires de la dorsale du Kivu. Les données issues d'enquêtes ont permis de faire une classification des exploitations. Le calcul de statistiques descriptives, le test d'indépendance de Khi-deux et les analyses de la variance d'indices de dégradation ont été utilisés pour établir des liens entre tous les facteurs identifiés et la perception des producteurs de l'état de dégradation de leurs parcelles. Les exploitations enquêtées se caractérisent par leur petite taille et leur pauvreté. Globalement, l'état de dégradation est perçu comme moyen, mais il est sévère à très sévère pour un tiers des producteurs. L'érosion ainsi que les pertes d'éléments nutritifs et de matière organique sont les principaux types de dégradation. La pression démographique explique en partie les différences observées entre bassins versants. Les ménages les plus pauvres présentent en moyenne le niveau de dégradation le plus élevé. Certaines pratiques (billonnage) ou cultures (manioc, café, cultures maraichères) semblent préférentiellement associées à certains états de dégradation, sans que des liens de cause à effet ne puissent être établis en raison de la prédominance des associations culturales dans les champs. L'enquête a mis en évidence une situation interpellante, affectant particulièrement les ménages les plus pauvres et les bassins avec les plus fortes densités de population, qui doit inciter à plus d'investissement en matière de conservation des sols.

Mots-clés. R.D. Congo, dorsale du Kivu, dégradation des terres, pratiques agricoles, pauvreté, pression démographique.

2.1. Introduction

La petite agriculture paysanne joue un rôle important pour satisfaire les besoins alimentaires des ménages agricoles pauvres vivant en Afrique subsaharienne (Ellis, 2005). Cependant, ce type de système de production agricole est de plus en plus caractérisé par une surexploitation des ressources naturelles, base de son fonctionnement, suite à la rapide croissance de la population rurale (Diao et al., 2010). A court et à moyen termes, cette surexploitation mène à des phénomènes de dégradation des sols qui conduisent à une diminution de la productivité des sols, compromettant la durabilité des systèmes de production agricole (Lal, 1988). Ainsi, l’Afrique sub-saharienne est la seule région au monde où, depuis des décennies, la production alimentaire par habitant continue de baisser (Muchena et al., 2005; Jayne et al., 2010).

Au sein de l’Afrique sub-saharienne, les zones montagneuses de la Région des Grands Lacs africains (RGLA) de l’Afrique de l’Est sont particulièrement exposées à la dégradation des terres par érosion hydrique et épuisement des sols et aux conséquences qui en découlent. Une étude conduite au Rwanda, au Burundi et à l’Est de la R.D. Congo avait rapporté, il y a plus de 3 décennies, des pertes de terres sur sol nu de l’ordre de 35.5 t/ha en six mois (Lunze 1992, cité par Rishirumuhirwa, 1994). En effet, la RGLA présente un ensemble de facteurs biophysiques et socio-économiques qui favorisent la surexploitation des sols agricoles et leur dégradation : très haute densité démographique (Cazenave-Pierrot, 2009), pluviométrie abondante toute l’année et topographie marquée par des plateaux et

collines à très fortes pentes. La pression anthropique est perçue comme une force motrice majeure de ces processus de dégradation suite à la déforestation, à la réduction ou l'absence de périodes de jachère, à la mise en cultures de terres parfois marginales et à pentes très fortes jadis réservées au pâturage et au boisement, et à l'absence ou aux faibles apports en amendements pour l'entretien et la restauration de la fertilité des sols (Okoba and de Graaff., 2005; Nabahungu et al., 2011).

La province du Sud-Kivu en République démocratique du Congo, et particulièrement la dorsale du Kivu, se trouve au cœur de la RGLA et est caractérisée par un contexte similaire à celui décrit ci-dessus. Différents rapports y font état d'un niveau élevé de dégradation des sols (DSRP, 2005; Hauser et al., 2007; DSRP-2, 2011; Karamage et al., 2016a). La dégradation des sols n'y affecterait pas seulement la production agricole et la sécurité alimentaire des populations, mais également les ressources halieutiques du lac Kivu et les cours qui alimentent les centres urbains en eau potable (envasement et pollution par les pesticides dans les milieux où sont pratiqués le maraîchage) (Zirirane et al., 2015). La problématique n'est pas récente, car déjà vers le milieu du siècle passé, avant les indépendances, l'État colonial belge s'inquiétait du recul de la forêt dans la dorsale du Kivu suite au défrichement agricole (CNKI, 1948). Une enquête pédologique avait permis d'estimer à plus de 10.000 ha les terres anciennement cultivées devenues improductives par l'effet de l'érosion au Kivu (Tondeur, 1954). Selon un rapport de projet du début des années 1980, plus de 78% des producteurs de la zone avaient déjà affirmé que la culture

continue, l'érosion accélérée du sol et la distribution perturbée des précipitations étaient les causes majeures de la dégradation des sols dans le Kivu (Bitijula and Lal, 1983).

Cependant, il convient de constater un manque d'informations actualisées sur la dégradation des sols au sein de la dorsale du Kivu, en comparaison avec des pays avoisinants comme le Rwanda, le Burundi et l'ouest de l'Ouganda (Bizoza, 2014; Karamage et al., 2016b). Cela semble s'expliquer en grande partie par l'insécurité persistante dans cette province, qui a mis à mal le système de recherche national, les collaborations internationales et le fonctionnement des services étatiques (Cox, 2012). Une telle actualisation serait cependant essentielle en vue de guider les politiques publiques et les actions de développement agricole dans la dorsale du Kivu. La présente étude a donc pour objectif premier de caractériser l'étendue et la sévérité de la dégradation des sols au Sud-Kivu. Le second objectif est d'évaluer comment la diversité des contextes biophysiques et socioéconomiques au Sud Kivu affecte les choix des cultures et des pratiques culturales et in fine, l'état de dégradation des terres.

2.2. Matériels et méthodes

2.2.1. Sélection des sites

L'étude a été conduite dans 8 bassins versants de la dorsale du Kivu répartis entre sein de 4 territoires (= subdivisions administratives; Kalehe, Kabare, Idjwi et Walungu) de la province du Sud-Kivu à l'Est de la RD Congo (Figure 1.1). Cet ensemble géographique abrite 44% de

la population totale de la province et intervient pour plus de 70% dans la fourniture d'aliments pour la ville de Bukavu et ses environs (IPAPEL, 2010). Les sols de la dorsale du Kivu sont très diversifiés. La zone d'étude peut être subdivisée en deux zones. La première zone comprend le territoire de Kalehe et le nord du territoire de Kabare et est constituée de terres considérées comme ayant encore un grand potentiel agricole à cause de leur localisation sur des sols issus d'un volcanisme récent (environ 2000 ans) (Andosols molliques, Nitisols dystriques, Nitisols humiques et Cambisols eutriques). En revanche, la deuxième zone comprend les territoires de Walungu et Idjwi et de la partie sud du territoire de Kabare. On y trouve des sols anciens (Pléistocène supérieur ou Gamblien) (Cahen et al., 1946), en majorité issus de roches d'origine basaltique et fortement altérés (Cambisols orthiques, Nitisols dystriques et Nitisols humiques) (FAO, 1998).

Au niveau des séries de sols, cinq unités pédologiques dominantes sont observées (Figure 1.4). Au Sud-est, où sont localisés les huit bassins versant de la zone d'étude, les sols les plus représentatifs sont ceux dérivés de dominance de roches basiques (gabbro, basalte, dolérite, amphibolites), avec localement les sols dérivés de roches magmatiques ou métamorphiques acides et micaschistes et secondairement, par ceux dérivés de dominance de schistes et schiste-gréseux du soubassement et des argilites du système de Karroo (Cahen et al., 1946).

L'étude a été réalisée au sein de 2 bassins versants par territoire, soit 8 bassins au total. Le choix des bassins versants a été fait en fonction de

leur accessibilité en tenant compte de trois principaux axes routiers ou lacustres au sein de la dorsale du Kivu. Il a aussi été dicté par le souci de représenter la diversité des types de sols au sein de la dorsale du Kivu (Tableau 1.2; Figure 1.4). Les exutoires des bassins étaient localisés sur le lac Kivu ou sur des grandes rivières se trouvant dans chaque contrée, ce qui explique les tailles assez variables des bassins retenus.

Compte tenu des contraintes d'accessibilité et de sécurité sur l'ensemble des huit bassins versants, des villages (55 au total) ont été sélectionnés au sein de chaque bassin afin de couvrir au mieux les parties cultivées de chaque bassin versant. L'identification de ces villages au sein des bassins versants a été rendue possible grâce aux listes des villages disponibles au sein de chaque groupement, fournies par les chefs locaux au sein de chacun des quatre territoires.

2.2.2. Méthodologie

Des enquêtes de ménages agricoles ont été conduites de septembre à octobre 2015. Elles ont été complétées par des entretiens avec les chefs de groupements, le personnel des services étatiques et des personnes ressources responsables d'associations locales de développement.

Le choix de la taille d'échantillon des ménages à enquêter n'a pas tenu compte de la taille des bassins versants, ni de la population totale vivant au sein de chacun d'eux étant donné le manque de statistiques fiables sur le nombre des ménages agricoles au niveau des villages où ils ont été choisis. Au final, dans chaque bassin versant, un total de 90

ménages choisis aléatoirement ont été interviewés en langue vernaculaire locale.

Le questionnaire utilisé était de type semi-ouvert et a été testé au préalable dans 2 villages du territoire de Kabare. Il comportait trois grandes parties. (1) Les caractéristiques des ménages dont : (a) les activités importantes des ménages, évaluées en fonction du temps qui leurs est consacré et des revenus qu'elles leur procurent; (b) la disponibilité des moyens de production, en se focalisant sur les terres et les types de main d'œuvre; et (c) les types de bétail possédés par les ménages. (2) Les principales cultures adoptées et leurs finalités (autoconsommation et/ou vente-rente) et les différentes pratiques agricoles adoptées sur la parcelle principale de l'exploitation (pratiques d'amendements, types de travail du sol, gestion des résidus de cultures, association et/ou rotation des cultures). (3) La perception des producteurs sur l'état de dégradation de leurs parcelles. Cette perception résulte premièrement d'une appréciation qualitative de l'état général de dégradation de la parcelle principale du ménage, sur base d'une échelle graduelle à cinq niveaux (très faible, faible, moyenne, sévère et très sévère) et deuxièmement, d'une évaluation des principaux types de dégradation des sols rencontrés sur la parcelle.

La parcelle principale du ménage agricole correspond à celle qui fournit l'essentiel de ce dont le ménage a besoin pour sa survie. Elle bénéficie pour ce faire de toute l'attention du ménage en termes des pratiques de gestion et de conservation, à la hauteur des dotations au sein du ménage (ex., Tittone et al., 2005). Elle rend donc mieux compte

des efforts du ménage agricole à assurer sa survie. La localisation de la parcelle principale, bien qu'elle soit dans la majorité de cas proche de la case du ménage, n'était pas un critère de choix.

Les différents types de dégradation évalués sont liés à des processus physiques (l'érosion hydrique accélérée et la compaction du sol), des processus chimiques (l'épuisement du sol) et enfin, des processus biologiques (la perte de la matière organique du sol) (Lal, 2009). Cette évaluation s'appuie sur les propres critères des producteurs qui comprennent, entre autres, des indicateurs physiques des sols (couleur, texture et structure), la productivité des cultures et l'état de surface dans son sens le plus large (résidus de cultures en surface, érosion) (M'Biandoun & Bassala, 2007). Ces quatre principaux types de dégradation ont aussi été évalués par les producteurs enquêtés en se basant sur une échelle graduelle à cinq niveaux (très faible, faible, moyenne, sévère et très sévère) pour en définir la sévérité.

2.2.3. *Traitement et analyse des données*

Douze variables socioéconomiques, dont 7 variables quantitatives (nombre de parcelles; superficie totale; main d'œuvre familiale; nombre total de cultures; nombres de cultures à orientation autoconsommation, à orientation vente et à orientation mixte) et 5 variables qualitatives supplémentaires (agriculture comme source principale de revenus; autres sources de revenus; 3 types d'élevage), ont été utilisées dans une analyse en composantes principales (ACP) précédée d'un test de corrélation pour identifier les variables non

corrélées en vue d'une catégorisation des ménages (Tiftonnell et al., 2010; Senthikumar et al., 2009).

La typologie des ménages (catégorisation) a été faite grâce à une classification ascendante hiérarchique (CAH) en se basant sur les variables issues de l'ACP pour distinguer les différents types d'exploitations agricoles au sein de la zone étudiée. Par ailleurs, des enquêtes conduites précédemment dans la même zone d'étude par Louvain Développement (2008) ont permis d'identifier des indicateurs de richesse. Ces indicateurs ont été utilisés en vue de répartir les ménages en trois classes de richesse (Tableau 2.1). La répartition des ménages dans les classes de richesse a été faite au travers d'une classification par nuées dynamiques (k-moyennes) sur base des cinq variables utilisées comme indicateurs de richesse. L'avantage de cette méthode est qu'un objet classé peut être affecté à une classe au cours d'une itération puis changer de classe à l'itération suivante (McQueen, 1967), ce qui n'est pas possible avec d'autres types de classification comme la classification ascendante hiérarchique (CAH) pour laquelle une affectation à une classe est irréversible. Ceci permet d'obtenir in fine une plus grande similarité entre les individus d'une même classe.

Tableau 2. 1. Variables utilisées comme indicateurs de richesse pour la catégorisation des ménages enquêtés au sein de la dorsale du Kivu, RD. Congo - Variables used as wealth indicators for the categorization of surveyed households within the Kivu dorsal, DR. Congo (Louvain Développement, 2008)

#	Variables	Indicateur de classification (classe 1 : très pauvre; classe 2 : pauvre et classe 3 : riche).
1	Superficie totale des parcelles	Classe 1 : < =1ha; Classe 2 : 1-2ha; Classe 3 : > 2ha.
2	Type d'élevage pratiqué	Classe 1 : Petit élevage (chèvre, mouton, volaille, cobaye...); Classe 2 : Porc et petit élevage; Classe 3 : vache et petit élevage/porc.
3	Sources des revenus du ménage	Classe 1 : Agriculture; Classe 2 : Agriculture et autres, mais pas travail salarié; Classe 3 : Agriculture, travail salarié et autres
4	Mode de propriété des parcelles exploitées	Classe 1 : Location et gardiennage; Classe 2 : Propriétaire de 1 à 2 parcelles; Classe 3 : Propriétaire > 2 parcelles
5	Niveau d'étude du responsable du ménage	Classe 1 : Aucun/Primaire; Classe 2 : Secondaire; Classe 3 : Universitaire.

La comparaison entre bassins en termes de perceptions sur l'état de dégradation des sols, de caractéristiques socioéconomiques ainsi que de modes d'occupation des sols par les cultures, et de pratiques agricoles a été effectuée à travers le calcul de statistiques descriptives, dont le calcul des fréquences. Le test d'indépendance de Khi-deux (X^2) a été utilisé pour la détermination des degrés de significations statistiques des différents attributs. Enfin, la perception sur l'état de dégradation des bassins a été comparée à certains paramètres pertinents pour analyser une éventuelle relation entre ces derniers et l'indice moyen de dégradation. L'indice moyen de dégradation a été obtenu en faisant la moyenne des scores identifiés par exploitation sur l'échelle graduelle de 1 à 5 (1 étant le plus faible niveau de dégradation

et 5, le plus élevé). Le logiciel XLSTAT version 2016.02 a été utilisé pour le traitement et l'analyse des données.

2.3. Résultats

2.3.1. Caractéristiques des exploitations agricoles au sein des bassins versants

2.3.1.1. Caractéristiques socioéconomiques des ménages

Sur l'ensemble des bassins, environ deux tiers des ménages agricoles enquêtés cultivent moins d'un hectare mais la distribution des superficies diffère très significativement entre les huit bassins (Figure 2.1a). Les bassins de Kalehe, Kabare et Walungu présentent en moyenne 30% d'exploitations de superficie < 0,5 ha alors qu'à Idjwi près de 52% disposent de moins de 0,5 ha. En moyenne sur la zone d'étude, les ménages agricoles de la zone d'étude exploitent généralement deux parcelles ou plus, mais 40% ne peuvent compter que sur une seule parcelle (Figure 2.1b). Les ménages sont propriétaires de leurs parcelles agricoles à plus de 85% (Figure 2.1c).

Tous bassins confondus, la majorité des parcelles agricoles (88%) sont exploitées depuis plus de 50 ans (Figure 2.1d). Elles sont exploitées en culture continue sans jachère, étant donné la forte densité de population de cette zone d'étude (Tableau 1.2). L'expérience des ménages varie très significativement entre bassins (Figure 2.1e). A Walungu, 42% des ménages exploitent leurs parcelles depuis plus de 25 ans, alors qu'à Idjwi ces derniers ne représentent que 21%. Environ

deux personnes adultes et 0,5 à 1 enfant par ménage travaillent comme main d'œuvre familiale dans la majorité des bassins (Figure 2.1f).

L'élevage des caprins est le plus fréquent des élevages et concerne 58% des ménages en moyenne (Tableau 2.2a). L'élevage de porcs et de vaches concerne en moyenne 9% et 10% des ménages, respectivement. En moyenne pour tous les bassins, les principaux objectifs de l'élevage sont l'épargne (61%), l'obtention du fumier (53%) et l'autoconsommation (46%) (Tableau 2.2b).

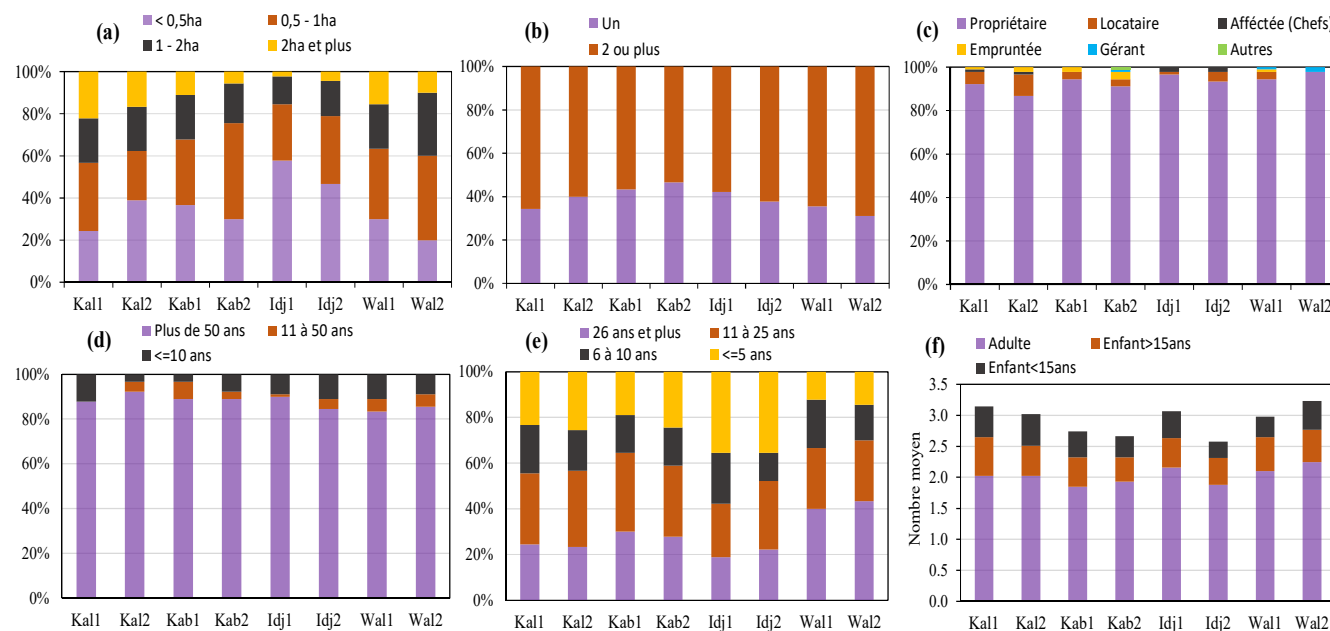


Figure 2.1. Répartition des moyens de production et durée d'exploitation des parcelles par les ménages (n=90; N=720) : (a) superficie totale de l'exploitation, (b) nombre de parcelles par ménage, (c) droit de propriété des parcelles, (d) durée de la mise en culture, (e) durée d'exploitation par le ménage, (f) quantité et type de main d'œuvre familiale – Distribution of resources available for production and duration of exploitation by households (n = 90, N = 720): (a) total farm area, (b) number of plots per household, (c) plot tenure right, (d) duration of cultivation, (e) duration of exploitation by the household, (f) quantity and type of family labor.

Tableau 2. 2. Types et objectifs de l'élevage pratiqué par les ménages au sein des bassins enquêtés et résultats du test de khi-deux - Types and objectives of animal rearing in the surveyed watersheds and chi-square test results (n=90; N=720)

Types/Objectifs	Localisation								Khi²	p-value
	Kal1	Kal2	Kab1	Kab2	Idj1	Idj2	Wal1	Wal2		
(a) Types (% des répondants)										
Caprin	61,1	60,0	51,1	60,0	56,7	58,9	66,7	46,7	10,0	0,1908
Lapin	44,4	32,2	17,8	34,4	30,0	33,3	31,1	31,1	15,4	0,0316
Cobaye	53,3	43,3	37,8	56,7	46,7	43,3	37,8	32,2	17,2	0,0159
Volaille	51,1	36,7	33,3	54,4	27,8	50,0	54,4	46,7	27,1	0,0003
Porc	21,1	27,8	6,7	5,6	2,2	0,0	10,0	1,1	75,3	< 0,0001
Vache	30,0	20,0	7,8	3,3	8,9	1,1	5,6	0,0	77,7	< 0,0001
(b) Objectifs (% des répondants)										
Vente	1,1	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	4,0	0,777
Epargne d'argent	66,7	68,9	56,7	66,7	55,6	57,8	68,9	50,0	13,9	0,052
Obtention du fumier	50,0	53,3	53,3	60,0	56,7	55,6	62,2	35,6	16,9	0,018
Autoconsommation	50,0	50,0	41,1	43,3	51,1	50,0	47,8	36,7	7,1	0,423
Social	28,9	13,3	12,2	30,0	21,1	24,4	40,0	30,0	29,0	0,0001
Traction animal	0,0	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,538
Autres	3,3	4,4	1,1	1,1	1,1	1,1	0,0	0,0	10,2	0,175

Notes : La somme des fréquences pour chaque bassin versant est supérieure à 100, car un l'agriculteur pouvait avoir plusieurs types de bétail ou pouvait fournir plusieurs réponses en termes d'objectifs. Kal = Kalehe; Kab = Kabare, Idj = Idjwi, Wal = Walungu.

2.3.1.2. Cultures et pratiques présentes sur la parcelle principale

Tous bassins confondus, les parcelles principales des ménages sont réparties sur cinq positions topographiques (Figure 2.2) mais, dans leur grande majorité, elles sont localisées sur la position «flanc de collines» (80% en moyenne) (Figure 2.3). Ceci peut résulter du fait que cette position topographique domine dans le paysage, mais également que, dans la zone d'étude, de grands propriétaires terriens qui ne font pas parties de cette étude, exploitent les sommets de collines et bas-fonds aux caractéristiques plus favorables.

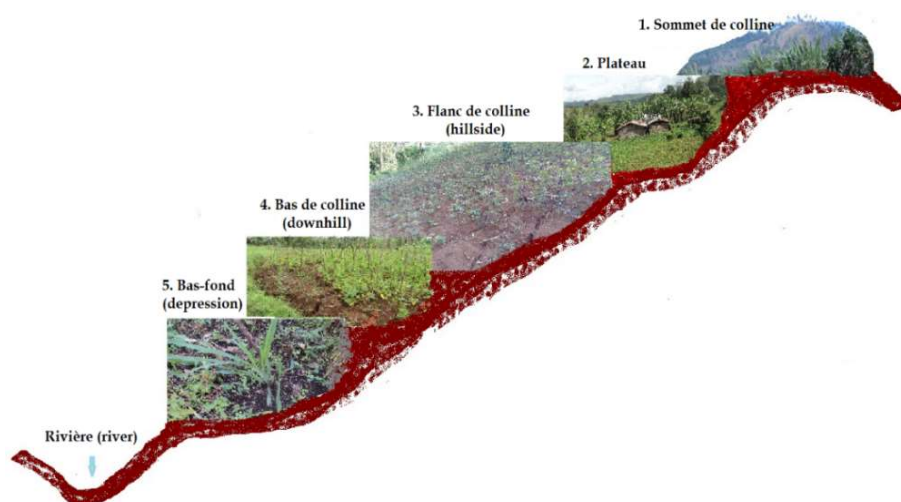


Figure 2.2. Représentation schématique des différentes positions topographiques au sein de la zone d'étude (1 = Sommet de colline; 2= Plateau; 3= Flanc de colline; 4= Bas de colline; 5 = Bas fond. - Schematic representation of different topographic positions within the study area (1=hilltop; 2=Plateau; 3=Hillside; 4=Downhill; 5=Depression).

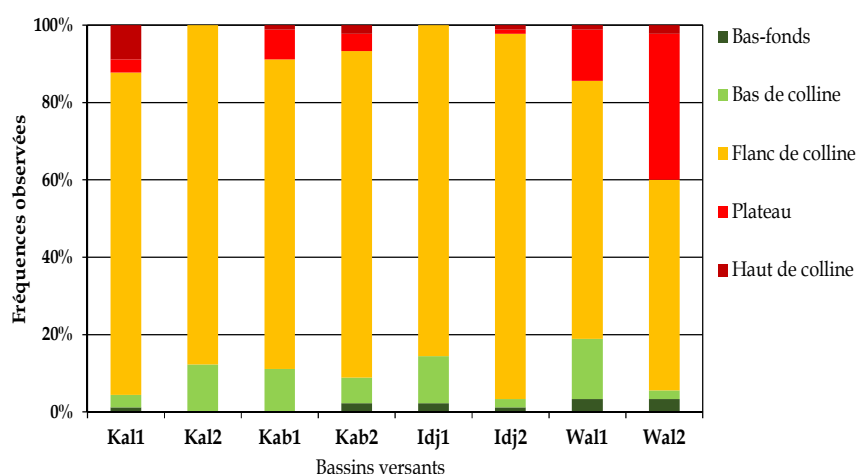


Figure 2.3. Répartition des parcelles selon les positions topographiques par bassin versant – Distribution of plots according to their topographic positions by watershed (n=90; N=720).

Douze cultures principales ont été identifiées sur l'ensemble des bassins, avec cependant des fréquences de présence significativement différentes entre bassins (Tableau 2.3). Pour le manioc, le maïs et le haricot, cultivés sur plus de 85% des exploitations en moyenne, les fréquences de présence sont statistiquement différentes même si les variations entre bassins restent généralement faibles (80-100% selon les cultures et les bassins). Viennent ensuite la patate douce (64%), le bananier (56%) et le taro (35%). La culture présentant la plus forte variation entre bassins est le bananier, trouvé dans plus de 90% des exploitations de Walungu mais dans moins de 30% à Idjwi à cause des attaques du Wilt bactérien (*Xanthomonas sp*) présent depuis plus d'une décennie dans les zones riveraines du lac Kivu (Ntamwira et al., 2019).

La fréquence de la patate douce est également très variable. En moyenne, elle n'est présente que dans environ 3 exploitations sur 10 à

Kabare mais dans plus de 8 sur 10 à Walungu. Le taro est particulièrement cultivé à Kalehe où il est présent dans environ une exploitation sur deux. Certaines autres cultures ne sont présentes que dans certains bassins et de façon très variable : le soja (0-48%) et le café (0-46%) en lien avec les opportunités de marché, le tournesol (0-46%) et l'arachide (0-54%) en lien avec la disponibilité de la semence et des habitudes alimentaires locales. Enfin, les cultures maraichères sont présentes dans près d'une exploitation sur cinq à Walungu à cause de la proximité avec les marchés d'écoulement dans la ville de Bukavu, alors qu'elles sont quasi absentes à Idjwi et Kalehe (<5%), plus éloignées (Tableau 1.2).

Tableau 2. 3. Répartition des fréquences des principales cultures cultivées par les ménages au sein des huit bassins de la dorsale du Kivu et résultats du test de khi-deux - Frequency distribution of main crops grown by farmers in the eight watersheds of the Kivu dorsal and chi-square test results (n=90; N=720).

Principales cultures (%)	Localisation								Khi ²	p-value
	Kal1	Kal2	Kab1	Kab2	Idj1	Idj2	Wal1	Wal2		
Bananier (<i>Musa sp</i>)	52,2	51,1	52,2	62,2	16,7	27,8	93,3	90,0	181,8	< 0,0001
Manioc (<i>Manihot esculanta</i> C.)	96,7	97,8	90,0	94,4	95,6	81,1	96,7	94,4	30,4	< 0,0001
Patate douce (<i>Ipomea batatas</i> L.)	75,6	40,0	33,3	33,3	85,6	66,7	78,9	94,4	163,4	< 0,0001
Taro (<i>Colocasia esculenta</i> L.)	58,9	46,7	28,9	31,1	27,8	15,6	33,3	38,9	47,7	< 0,0001
Igname (<i>Dioscorea sp</i>)	33,3	12,2	23,3	34,4	11,1	7,8	16,7	13,3	42,9	< 0,0001
Maïs (<i>Zea mays</i> L.)	93,3	92,2	87,8	93,3	83,3	81,1	82,2	71,1	30,2	< 0,0001
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	98,9	95,6	97,8	95,6	96,7	82,2	95,6	94,4	33,2	< 0,0001
Soja (<i>Glycine max</i> L.)	14,4	0,0	7,8	5,6	28,9	47,8	0,0	5,6	146,9	< 0,0001
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	34,4	10,0	54,4	10,0	22,2	28,9	0,0	4,4	127,8	< 0,0001
Tournesol (<i>Helianthus annuus</i>)	45,6	4,4	0,0	4,4	27,8	14,4	0,0	0,0	163,3	< 0,0001
Caféier (<i>Coffea arabica</i> L.)	28,9	15,6	45,6	8,9	13,3	8,9	0,0	0,0	115,9	< 0,0001
Maraichères (<i>plusieurs espèces</i>)	3,3	1,1	8,9	14,4	4,4	2,2	22,2	22,2	54,1	< 0,0001

Notes : La somme des fréquences pour chaque bassin versant est supérieure à 100, car l'agriculteur cultive généralement plusieurs cultures sur sa parcelle.

Dans la majorité des bassins et pour la grande majorité des ménages, certaines cultures comme le maïs, le haricot, le tournesol, la patate douce, le taro et l'igname ont pour finalité principale l'autoconsommation. Au contraire, le manioc et le bananier sont cultivés principalement pour la vente et secondairement pour l'autoconsommation. En revanche, le caféier est exclusivement une culture de rente dans les bassins où il est cultivé.

Sur l'ensemble des bassins, les amendements organiques sont principalement les déchets ménagers (non compostés) (78% en moyenne), les résidus de culture (64%), le compost (61%; mélange en proportion variable de déjections animales, déchets ménagers et résidus de culture compostés) et, dans une moindre mesure, le fumier (28%) et le paillage (24%; principalement graminées, mais aussi feuilles de bananiers). Le recours à ces amendements varie cependant significativement d'un bassin à l'autre. Ainsi, le compost est apporté par 3 à 8 ménages sur dix selon les bassins, et l'application du fumier est pratiquée par 1 à 5 ménages sur dix. La pratique du paillage est quasi absente à Idjwi mais concerne près de 5 ménages sur 10 à Kab1. L'utilisation des engrais minéraux est marginale, quel que soit le bassin (<12%) (Figure 2.4a).

La pratique de l'association de plusieurs cultures varie significativement d'un bassin à l'autre mais, dans tous les cas, cela concerne plus de 3/4 des exploitations (Figure 2.4b). L'association de multiples cultures (généralement plus de 3 cultures associées entre elles) est la pratique la plus courante dans toute la zone. Par ailleurs, le concept de la rotation des cultures n'est pas connu en tant que tel au

sein de cette zone étudiée. Toutefois, les ménages adoptent différentes pratiques qui s'y apparentent. En effet, ils font succéder à chaque saison, aux cultures annuelles ou pluriannuelles déjà présentes sur leurs parcelles, d'autres cultures qu'ils jugent adaptées à leurs besoins. Un exemple de succession de cultures courante est le remplacement d'une légumineuse dans l'association par une autre légumineuse et/ou par une céréale ou encore par un tubercule (Par exemple, l'association manioc-haricot-maïs en saison A devient manioc-soja-sorgho-patate douce-maïs en saison B).

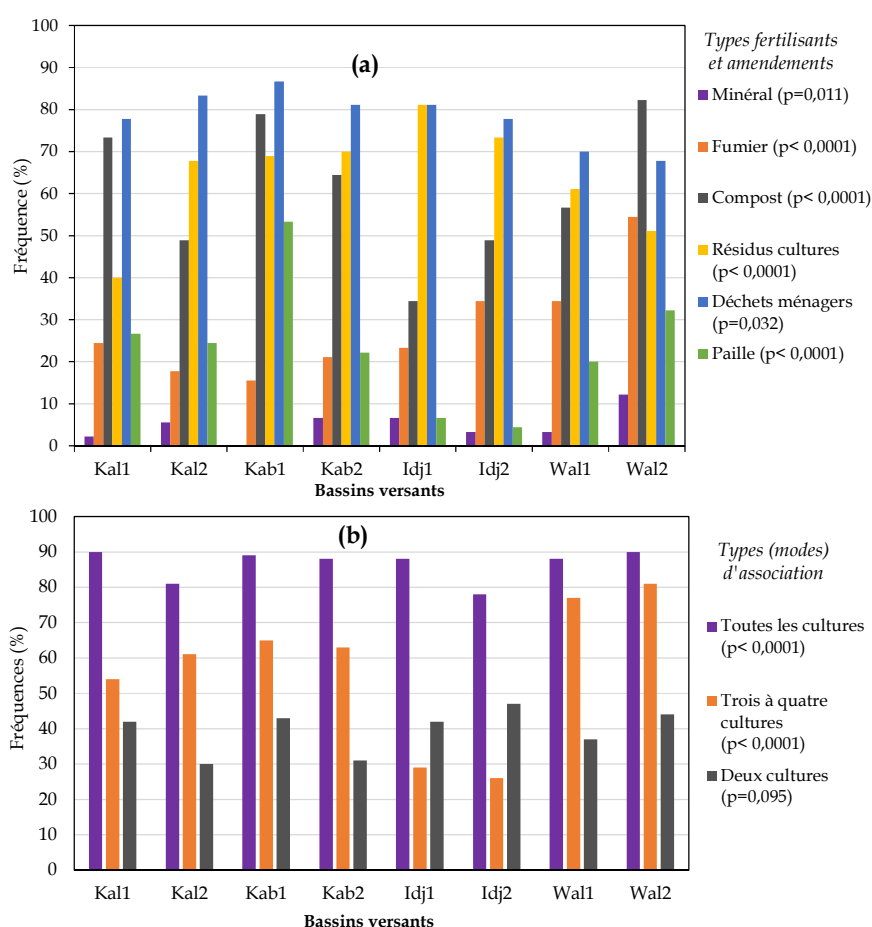


Figure 2.4. Fréquences (%) d'adoption des pratiques agricoles par les ménages par bassin : (a) types d'amendements; (b) types d'association des cultures - Frequencies (%) of adoption of farming practices by households within watersheds : (a) types of amendments; (b) types of crop association.

2.3.1.3. Typologie des ménages enquêtés

Pour faire la typologie de ménages agricoles de la zone d'étude, les douze variables socioéconomiques ont été introduites dans l'ACP, précédé d'un test de multi colinéarité pour éliminer les variables auto-corrélées. A la suite de cela, seules 4 variables (superficie totale; main

d'œuvre familiale; nombre de cultures à orientation vente; agriculture comme source principale de revenu) ont été retenues comme facteurs principaux. Elles ont ensuite été introduites dans une CAH pour différencier les types d'exploitation agricole au sein de la zone d'étude. Cela a permis d'identifier 4 types de fermes agricoles qui ont été projetés sur le profil de l'ACP comme variables secondaires (Figure 2.8).

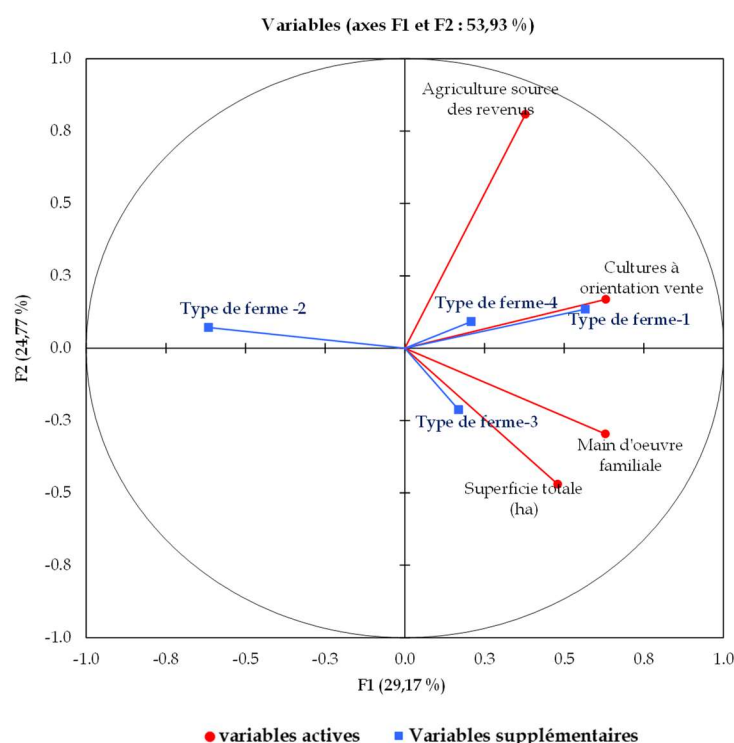


Figure 2.5. Résultats de l'ACP sur base des quatre variables socio-économiques retenues pour la typologie des exploitations agricoles. Les informations fournies par l'analyse sont résumées sur les axes F1 et F2. La longueur et la direction des lignes indiquent l'influence de chaque variable au sein de chacun des quatre types de ferme agricole - PCA results based on four socio-economic variables selected for farm typology. The information provided by the analysis is summarized on the F1 and F2 axes. The length and direction of the lines indicate the influence of each variable within each of the four farm types (p -value = 0,025; DDL=6). Factor loadings are provided in supplementary materials (Annex Table A.4).

Selon ce profil présenté par l'ACP, on remarque que le type de ferme 2 est opposé aux trois autres en ce qui concerne la très faible quantité de main d'œuvre familiale (<2) et dans une moindre mesure par la variable « nombre de cultures à orientation vente » (qui est également très faible pour le type 3; Figure 2.8). Le type 3 possède la plus grande moyenne en termes de quantité de main d'œuvre familiale ($5\pm2,2$; Tableau 2.4). En ce qui concerne la superficie totale, le type de ferme 4 se démarque des trois autres types (mieux observé sur les autres axes de l'ACP; Annexe Tableau A.4) avec la moyenne la plus faible ($0,51\pm0,58$ ha), alors qu'elle est comprise entre 1 et 1,3 ha pour les types 1, 2 et 4 (Tableau 2.4). Cependant, en ce qui concerne le nombre de cultures à orientation vente, le type de ferme 4 obtient la plus grande moyenne ($2,6\pm0,8$), suivi par le type 1 ($1,2\pm0,4$) (Tableau 2.4). Ainsi, on remarque que les types de ferme 1 et 4 ont beaucoup de ressemblances en termes de nombre de main d'œuvre familiale et secondairement du nombre de cultures à orientation vente, mais que les autres caractéristiques les mettent fondamentalement en opposition (Annexe Tableau A.3).

Tableau 2. 4. Contribution des 4 principales variables pour la typologie des ménages (N= 720) à la formation de deux axes de l'ACP - Contribution of 4 main variables for the farm typology (N = 720) to the formation of the two axes from the PCA

#	Variables	Statistiques	Types de ferme agricole			
			1	2	3	4
1	Superficie totale (ha)	% Contrib.	13,55	39,22	25,65	5,68
		Moyenne	1,29	1,01	0,98	0,51
		Ecart-type	1,59	1,35	1,02	0,58
2	Main d'œuvre familiale (n)	% Contrib.	12,45	21,33	46,57	12,50
		Moyenne	3,40	1,57	5,09	3,29
		Ecart-type	2,70	0,72	2,19	2,67
3	Nombre de cultures à orientation vente (n)	% Contrib.	62,41	0,60	0,71	70,83
		Moyenne	1,23	0,01	0,01	2,62
		Ecart-type	0,42	0,07	0,12	0,80
4	Agriculture comme source principale de revenu (%)	% Contrib.	11,59	38,85	27,07	10,98
		% des ménages	91,9	83,8	88,0	81,0

Notes : % Contrib. = % de contribution; Le « % des ménages » pour la variable « agriculture source principale de revenu » a été déterminé sur base de l'effectif total pour chaque type de ferme agricole pour mieux évaluer les différentes valeurs du % de contributions de la variable à la formation de deux axes de l'ACP.

Les types de ferme agricole 2 et 3 sont les plus représentés au sein des huit bassins versants de la zone d'étude, sauf dans un des deux bassins versants de Kabare (Kab1) où le type de ferme agricole 1 (36,7%) vient en deuxième position, comparé au type de ferme 3 (17,8%), faiblement représenté. Au sein de deux bassins versants de Walungu, les types de ferme 2 et 3 représentent une large majorité (99% au total, respectivement), alors qu'ils représentent 72% à 90% au sein des autres bassins versants (Tableau 2.5a). Après catégorisation des ménages sur base des indicateurs de richesse, en moyenne 55% des ménages sont très pauvres, 35% sont pauvres et 10% sont riches. Wal1 et surtout Wal2 se démarquent des autres par une proportion élevée de ménages riches (12% et 38%, respectivement), justifiée peut-être à cause de

l'importance du maraichage et l'existence plusieurs autres sources de revenu que l'agriculture (Tableau 2.5b).

Tableau 2. 5. Répartition des 720 ménages par différents types de ferme agricole et au sein des classes de richesse dans les 8 bassins versants - Distribution of the 720 households within the different farm types and within the wealth classes in the eight watersheds

Bassin versant	Répartition des ménages agricoles (%)			
a) Par type de ferme	Type de ferme -1	Type de ferme -2	Type de ferme -3	Type de ferme -4
Kal1	25,6	43,3	28,9	2,2
Kal2	13,3	60,0	23,3	3,3
Kab1	36,7	41,1	17,8	4,4
Kab2	7,8	57,8	32,2	2,2
Idj1	14,4	53,3	27,8	4,4
Idj2	10,0	56,7	26,7	6,7
Wal1	1,1	63,3	35,6	0,0
Wal2	1,1	50,0	48,9	0,0
Moyenne bassins versants	13,8	53,2	30,1	2,9
b) Par classe de richesse	Très pauvre (%)	Pauvre (%)	Riche (%)	
Kal1	46,7	46,7	6,7	
Kal2	56,7	40,0	3,3	
Kab1	60,0	36,7	3,3	
Kab2	64,4	27,8	7,8	
Idj1	66,7	32,2	1,1	
Idj2	57,8	37,8	4,4	
Wal1	50,0	37,8	12,2	
Wal2	40,0	22,2	37,8	
Moyenne bassins versants	55,3	35,2	9,6	

La distribution des niveaux de richesse n'est pas significativement différente entre les 4 types d'exploitation (Tableau 2.6). Néanmoins, le type de ferme agricole 3 est le groupe présentant la plus grande fréquence de ménages riches (13%), alors que le type 4 est le groupe le plus défavorable, avec la plus grande fréquence de ménages très pauvres (67%).

Tableau 2. 6. Résultats du test de khi-deux entre la répartition des 720 ménages au sein des différents types de ferme agricole - Chi-square test between the distribution of 720 households within the four agricultural farm types.

Distribution (%)	Type de ferme - 1	Type de ferme - 2	Type de ferme -3	Type de ferme - 4
Bassins versants vs Types de ferme (p -valeur < 0,0001; DDL= 21)				
Classes de richesse vs Types de ferme (p -valeur = 0,217; DDL=6)				
Très pauvres	56,6	56,9	50,7	66,7
Pauvres	38,4	34,2	35,9	28,6
Riches	5,1	8,9	13,4	4,8

2.3.2. Caractérisation de l'état de dégradation

2.3.2.1. Perception de l'état de dégradation des sols

Tous bassins confondus, l'état de dégradation des parcelles est très faible, faible, moyen, sévère et très sévère pour 0,8%, 32,4%, 35,4%, 23,6% et 7,8% des producteurs (Figure 2.6a). A l'exception de Kal2 où le niveau moyen de dégradation est sévère, le niveau moyen de dégradation tel que perçu par les exploitants agricoles est assez similaire dans tous les bassins et compris entre 2,6 et 3,1 (= moyen), avec néanmoins des différences significatives entre bassins versants (Figure 2.6b). On observe en particulier un contraste important entre les deux bassins versants de Kalehe, Kal1 étant le moins dégradé et Kal2 étant le plus dégradé parmi les 8 bassins enquêtés.

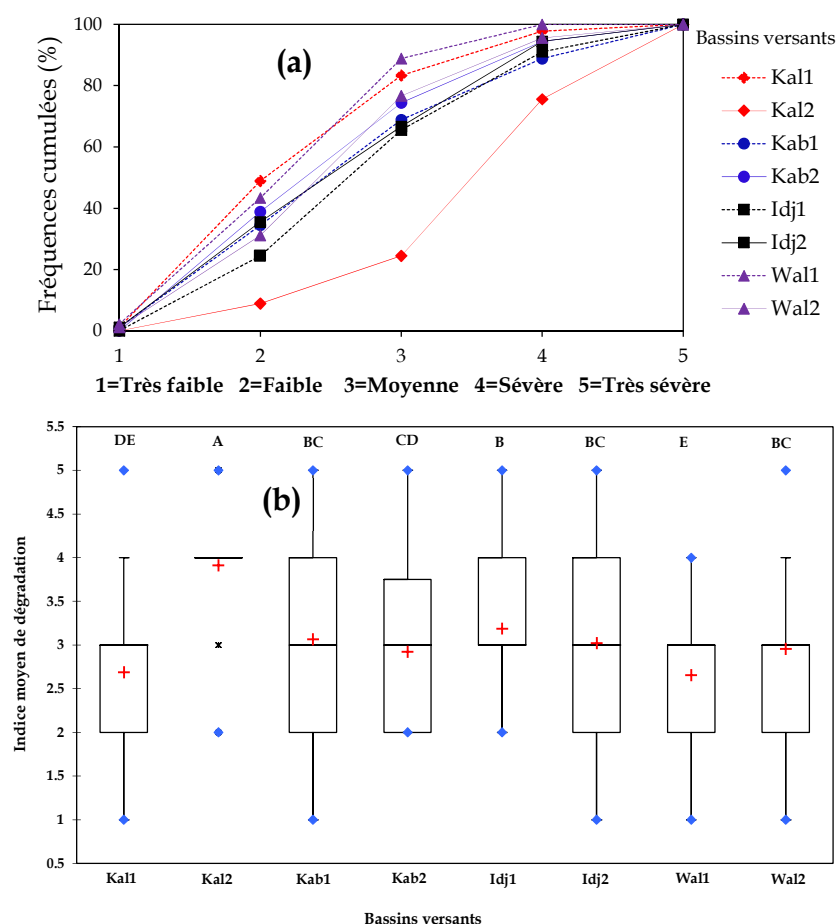


Figure 2.6. Indices de l'état de dégradation général des sols selon la perception des producteurs par bassin versant: (a) courbes de fréquences cumulées des niveaux de dégradation générale, (b) box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) des indices de dégradation avec les lettres de comparaison des moyennes. Les bassins qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différents – Index of soil degradation status according to the farmers' perception per watershed : (a) cumulative frequency curves of general status of degradation, (b) box plots (average, extreme values, minimum/ maximum) of degradation indexes with mean comparison letters.

En analysant la répartition des états de dégradation en fonction de la position topographique tous bassins confondus, on observe que la fréquence des états de dégradation sévères et très sévères est la plus

élevée sur la position flanc de collines (36%) (Figure 2.7a). A l'opposé, dans les bas-fonds, l'état de dégradation faible concerne près de 70% des parcelles. La part des différentes positions topographiques variant sensiblement d'un bassin à l'autre (Figure 2.3), on peut se demander si l'indice moyen de dégradation de chaque bassin (Figure 2.6b) n'est pas, au moins partiellement, le reflet de différences dans la localisation topographique des parcelles entre bassins. Cependant, l'analyse de la variance de l'indice moyen de dégradation des parcelles montre que les différences observées entre les bassins à la Figure 2.6b persistent même lorsqu'on se limite à la position « flanc de colline » ($p < 0,0001$; Figure 2.7b).

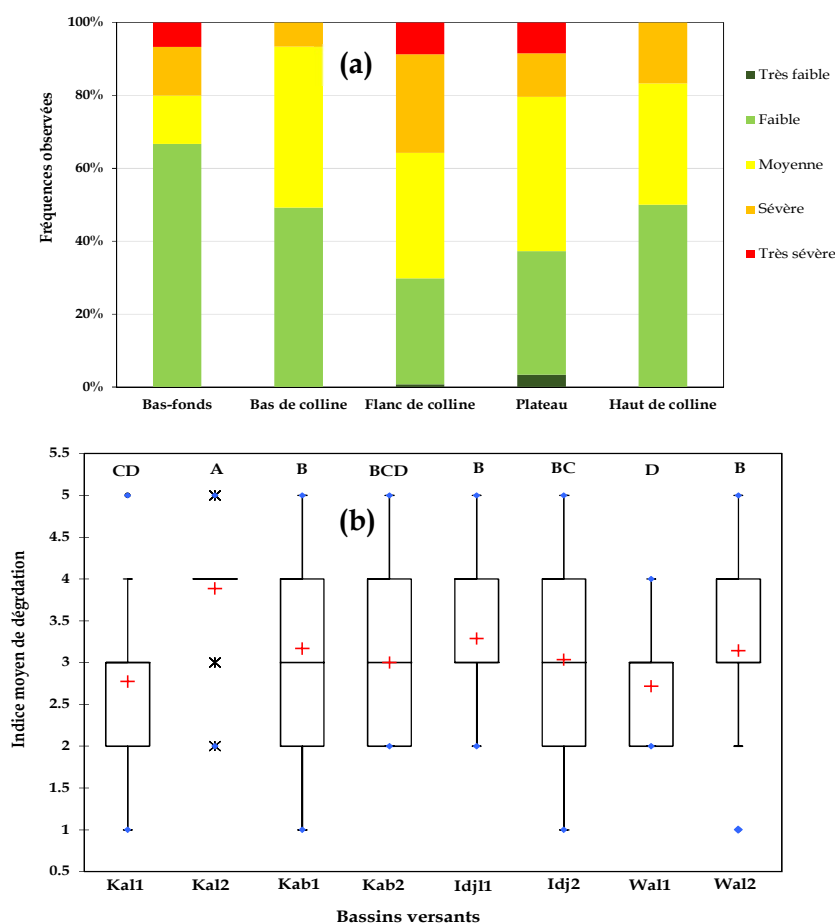


Figure 2.7. (a) Répartition des états de dégradation en fonction de la position topographique pour l'ensemble des bassins versants, **(b)** Box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) de l'indice moyen de dégradation par bassin versant pour la position flanc de colline avec les lettres de comparaison des moyennes – (a) Distribution of degradation states for each topographical position across all watersheds (b) Box plots (average, extreme values, minimum / maximum) of the degradation indexes per watershed for the hillside position with mean comparison letters (LSD).

2.3.2.2. Principaux types de dégradation

Sur l'ensemble des bassins, l'érosion hydrique est la forme de dégradation ayant l'indice de sévérité le plus élevé (Figure 2.8). Il est suivi par l'épuisement du sol, la perte de matière organique et la compaction.

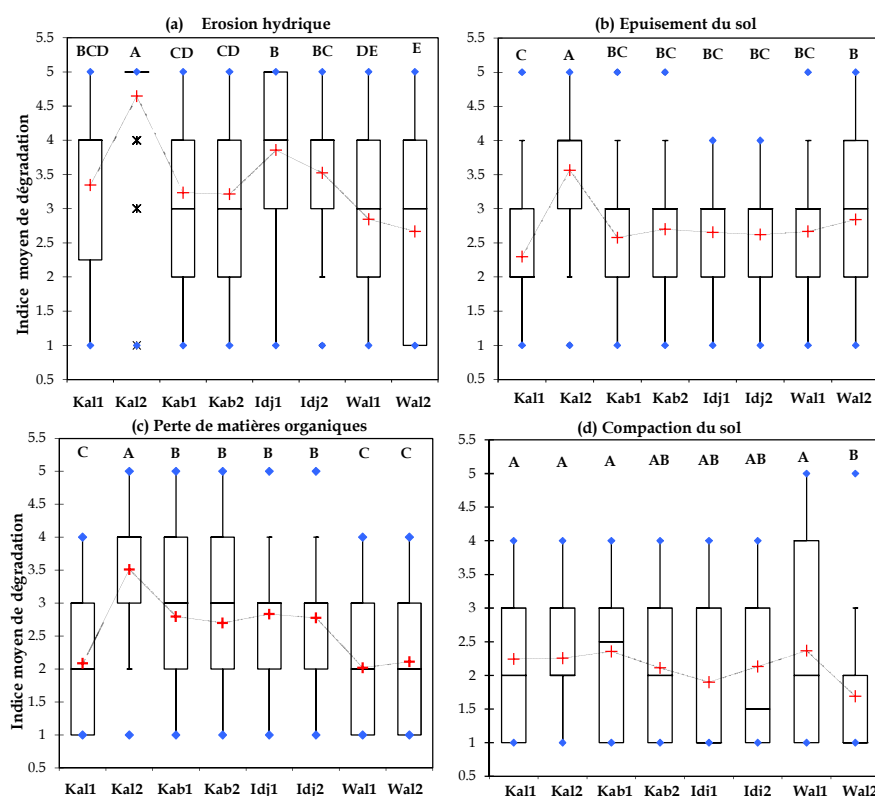


Figure 2.8. Box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) d'indice de sévérité pour les différents types de dégradation selon la perception des ménages au sein des huit bassins avec les lettres de comparaison des moyennes - Box plots (average, extreme values, minimum/maximum) of severity index for the different types of degradation according to the farmers' perception in the eight watersheds with mean comparison letters (LSD): (a) water erosion, (b) soil nutrient depletion, (c) loss of organic matter and (d) soil compaction.

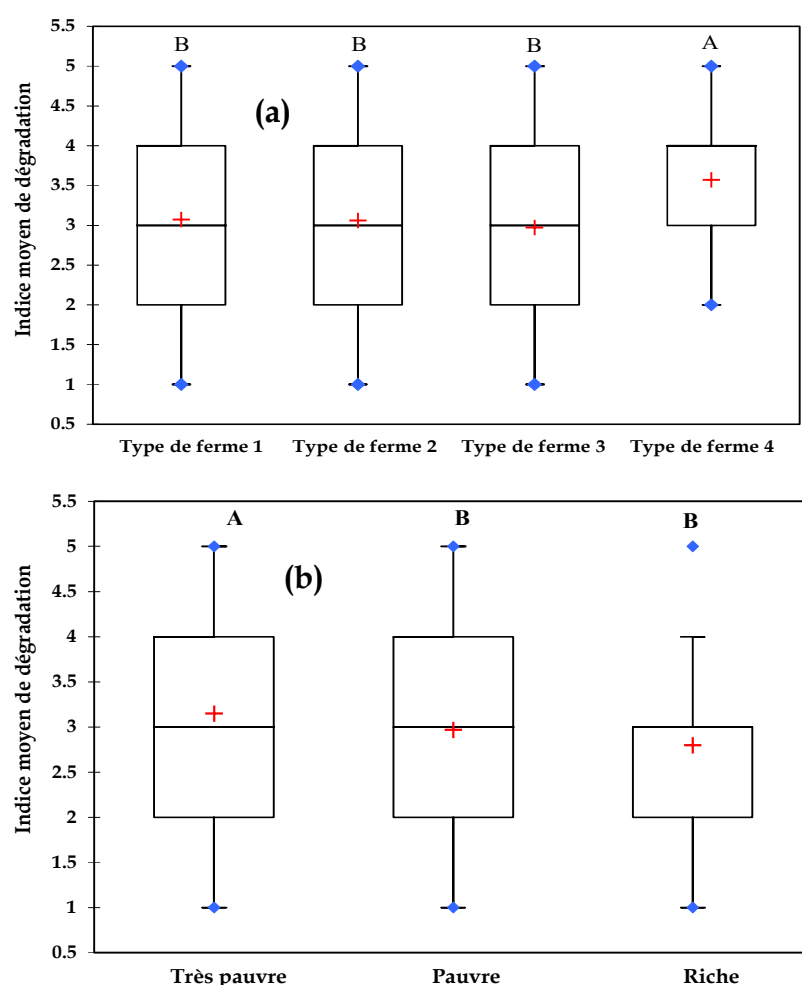
Il existe cependant des différences significatives entre bassins pour ces quatre indicateurs. L'érosion apparaît comme la plus sévère à Kal2 et la moins sévère à Walungu. Une tendance similaire s'observe pour la perte de matière organique. En ce qui concerne l'épuisement des sols, Kal2 est à nouveau le bassin le plus affecté, mais il y a peu de différences entre les sept autres bassins étudiés. Enfin, pour la compaction, les différences sont globalement peu marquées mais les indices les plus élevés sont observés dans les bassins Wal1 et Kab1 et les plus faibles à Wal2.

2.3.3. Analyse des facteurs de dégradation des terres pour l'ensemble des bassins étudiés

2.3.3.1. Liens entre la perception de la dégradation et les types de ferme agricole

L'analyse de la variance montre qu'il existe une différence significative de l'indice moyen de dégradation entre les quatre types de ferme agricole au sein de la zone d'étude ($p=0,048$). Plus précisément, l'indice de dégradation du type de ferme agricole 4 est significativement plus élevé que celui des trois autres types de ferme agricole (Figure 2.9a).

De même, l'analyse de l'indice moyen de dégradation calculé par classe de richesse montre qu'il existe une différence hautement significative entre les trois classes ($p=0,004$), le niveau moyen de dégradation des parcelles pour les ménages très pauvres étant significativement plus élevé que celui des parcelles des ménages pauvres et riches (Figure 2.9b).



Notes : Pour le Type 4, le premier quartile a la même valeur que la médiane.
Pour les ménages riches, le troisième quartile a la même valeur que la médiane

Figure 2.9. Box plots (moyenne, valeurs extrêmes, minimum/maximum) de l'indice moyen de dégradation pour (a) les différents types de ferme agricole et (b) en fonction des classes de richesse, pour les huit bassins versants enquêtés avec les lettres de comparaison des moyennes.
- Box plots (average, extreme values, minimum/maximum) of the degradation index for (a) different types of farms and (b) different wealth classes, across the eight watersheds with mean comparison letters (LSD).

2.3.3.2. Liens entre la perception de la dégradation et les cultures et pratiques agricoles

En vue de mettre en évidence une éventuelle relation entre les types de cultures, les pratiques agricoles et l'état de dégradation, seules les parcelles en position topographique « flanc de colline » ont été considérées afin de ne pas introduire un possible biais lié à la position topographique. En considérant les fréquences des cultures par niveau de dégradation sur cette position, on remarque que les cultures maraichères et la patate douce se retrouvent plus souvent que les autres sur des parcelles avec des indices de dégradation faible, voire très faible, le bananier étant plus souvent présent sur les parcelles à indices de dégradation moyenne alors que le manioc est un peu plus souvent associé à des parcelles avec des indices sévère et très sévère (Figure 2.10a).

On observe également que le caféier tend à se retrouver plus souvent sur des parcelles sévèrement dégradées, alors que les producteurs semblent éviter de mettre du tournesol sur ces mêmes parcelles. De même, les fréquences de certaines pratiques ont un lien avec l'état de dégradation (Figure 2.10b). On remarque en particulier que l'apport de résidus de culture et de déchets est associé aux parcelles (très) sévèrement dégradées, alors que le billonnage et le labour localisé sont plus couramment observés sur les parcelles faiblement à moyennement dégradées.

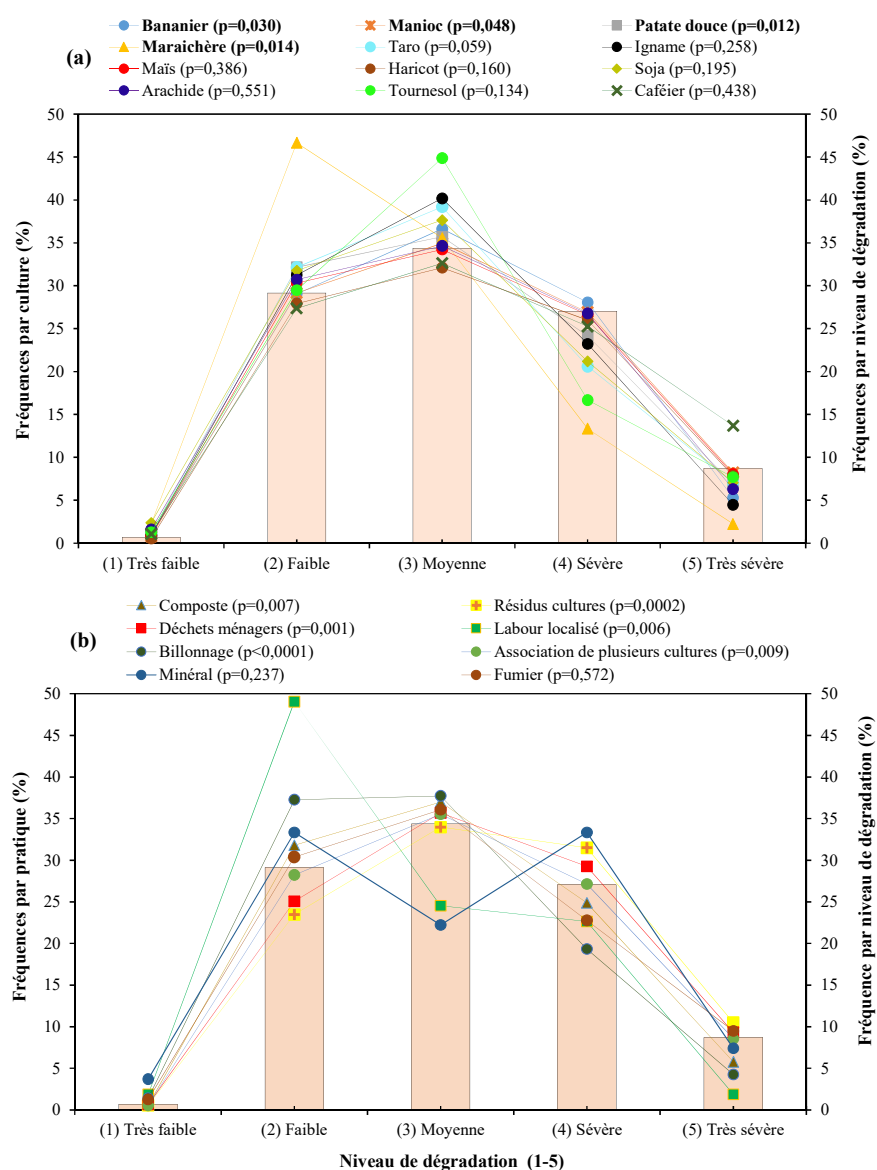


Figure 2.10. Distribution (a) des cultures et (b) des pratiques culturales en fonction des niveaux de dégradation des parcelles pour la position flanc de collines pour l'ensemble des huit bassins et la p-value du test de χ^2 indépendant - Distribution of (a) crops and (b) cropping practices across degradation levels for the hillside position for all eight watersheds and the p-value of the independent χ^2 test.

2.3.3.3. Liens entre l'état général de dégradation et quelques variables régionales

Les résultats de la Figure 2.11 font ressortir l'existence d'une relation linéaire croissante entre l'indice moyen de dégradation des bassins versants et la densité démographique (Figure 2.11a; $r=0,64$), l'adoption de l'agriculture comme activité principale génératrice de revenus (Figure 2.11b; $r=0,48$), mais également avec l'altitude pour laquelle la corrélation est significative (Figure 2.11c; $r=0,72$; $p=0,046$). Aucune relation significative n'a pu être établie entre l'état de dégradation général et la fréquence d'adoption de cultures ou de pratiques agricoles prises isolément, vraisemblablement à cause du fait que la pratique courante dans la zone d'étude est l'association de plusieurs cultures sur une même parcelle.

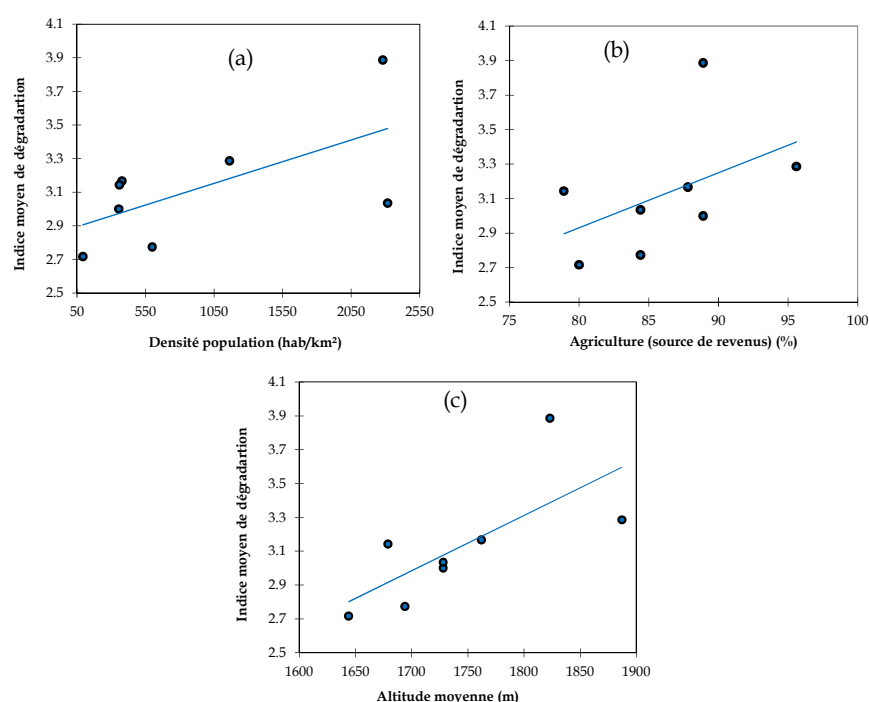


Figure 2.11. Droites de régression entre l'indice moyen de dégradation et quelques variables à l'échelle régionale: (a) la densité de population au niveau des bassins versants ($p = 0,091$); (b) le pourcentage de producteurs pour qui l'agriculture est la principale activité génératrice de revenus ($p = 0,235$) et (c) l'altitude moyenne des bassins versants ($p = 0,046$) - Regression lines between the average degradation index and some variables at the macro scale : (a) population density at the watershed level; (b) the percentage of producers for whom agriculture is the main income generating activity and (c) the average altitude of watersheds.

2.4. Discussion générale

2.4.1. Caractéristiques générales des exploitations

En raison d'une densité démographique en milieu rural très élevée (Tableau 1.2), également observée dans les pays avoisinants (Rwanda, Burundi; Nabahungu et al., 2011; Schut et al., 2016), les exploitations agricoles de la zone d'étude se caractérisent par une faible superficie totale, <1ha pour deux tiers des producteurs (Figure 2.1a). Les

superficies sont particulièrement faibles là où la densité démographique est la plus élevée, comme par exemple à Idjwi. Une large part des cultures est produite pour l'autoconsommation, système axé sur l'autosubsistance. Les exploitations sont caractérisées par la pratique de l'association de nombreuses cultures (Figure 2.6d), qui permet de sécuriser la production alimentaire en évitant les risques et en maximisant l'utilisation des terres et de la main d'œuvre (ex., van Asten et al., 2013; Mucheru-Muna et al., 2010). Ainsi, la majorité des exploitants cultivent le maïs, le manioc et les haricots qui forment la base de l'alimentation. Certaines cultures sont néanmoins destinées en grande partie (banane, manioc) ou exclusivement (café) à la vente. Les influences régionales (arachide, tournesol), l'accès aux marchés régionaux (café) ou aux usines de transformation modernes (soja), l'existence de pressions biotiques (banane), les habitudes alimentaires (féculents en majorité), ou la disponibilité de semences conditionnent par ailleurs la présence plus ou moins abondante de certaines cultures dans l'un ou l'autre bassin versant. Les cultures maraîchères dominent particulièrement à Walungu. Celles-ci sont cultivées en majorité dans les bas-fonds et sur les plateaux où sont localisés les cases d'habitations et c'est aussi à Walungu qu'on retrouve le nombre le plus élevé d'exploitations sur ces deux positions topographiques (3% et 25%) (Figure 2.3).

En raison de la forte densité de population et de la faible taille des exploitations ne permettant pas de produire un fourrage abondant, l'élevage est surtout axé sur des petits animaux (Tableau 2.2) comme

observé également dans les pays limitrophes (Rwanda, Burundi; van Asten et al., 2013).

Quatre types d'exploitations ont pu être mis en évidence à partir de 4 critères socio-économiques, à savoir la superficie de l'exploitation, la disponibilité de la main d'œuvre familiale, la proportion des cultures produites pour la vente et l'agriculture comme source principale de revenus de l'exploitant (Figure 2.8). Ces différences de types d'exploitations ne se traduisent cependant pas en des différences significatives en termes de richesse selon les critères utilisés, 90% des ménages étant classés comme pauvres ou très pauvres sur l'ensemble des bassins étudiés (Tableau 2.6). Néanmoins, c'est dans le type 4 que l'on trouve la plus grande proportion de ménages très pauvres. La richesse étant définie par la possession d'une exploitation de grande taille et de gros bétail (vache, et porc dans une moindre mesure) et par l'accès à d'autres sources de revenus (Louvain Développement, 2008; Maass et al., 2010), il en résulte qu'il y a peu de différences entre producteurs dans cette zone dans la mesure où seule une petite portion des ménages remplit ces critères. Cette pauvreté généralisée s'explique par la précarité des conditions de vie en milieu rural à l'est de la RDC suite notamment à l'insécurité alimentaire, aux guerres à répétition, et au manque de routes de desserte agricole (Louvain Développement, 2008; Bisimwa et Mambo, 2009; Ulimwengu et al., 2009). Aussi, la faible différenciation des exploitations en termes de richesse peut s'expliquer par le fait que les ménages sont très dynamiques en milieu rural et peuvent poursuivre plusieurs stratégies de survie

simultanément (Barrett et al., 2006, cités par Tiftonnell et al., 2010). Un ménage agricole peut avoir comme sources de revenu sa parcelle agricole, son élevage, un petit commerce et/ou un travail salarié (travail dans les champs des autres et/ou d'animateur rural.). Par conséquent, il est rare qu'une catégorie donnée de ménages détienne des caractéristiques propres à elle seule à cause de cette multiplicité de stratégies poursuivie par chaque ménage (Chikowo et al., 2014). Néanmoins, une compréhension plus fine des ménages, basées sur des critères socio-économiques, présentera un intérêt lorsqu'il s'agira de mettre en œuvre des politiques de développement agricole. En effet, des indicateurs tels que ceux utilisés dans la présente étude influenceront directement d'une part, l'intérêt qu'un ménage pourrait avoir à investir dans l'agriculture (en fonction, par exemple, de ce que l'agriculture est la principale source de revenu ou non) et d'autre part, sa capacité à investir (en fonction, par exemple, de sa facilité d'accès à des crédits agricoles ou en fonction de la main d'œuvre disponible).

2.4.2. Perception des producteurs sur l'état de dégradation

Comprendre comment les producteurs locaux perçoivent leurs milieux de vie et en particulier, la dégradation de leurs sols en lien avec leurs contextes respectifs permet d'appréhender les vraies limites aux processus de production agricole et peut aussi être un atout pour étudier la mise en place de mécanismes de lutte adaptés (Abdulai and Huffman, 2014; de Graaff et al., 2008; Amsalu and de Graaff, 2006; Okoba et de Graaff, 2005). Cependant, bien que le recours à la perception des producteurs soit reconnu aujourd'hui comme l'un des

moyens pour obtenir rapidement des données dans des contextes où peu de données fiables sont disponibles (Mashi et al., 2014; Beyene et al., 2006), comme c'est le cas pour la dorsale du Kivu, une attention particulière doit tout de même être observée étant donné l'écart qui existe entre le langage des agriculteurs et celui des scientifiques (van Asten et al., 2009). Par ailleurs, les résultats d'enquête doivent plutôt être perçus comme un classement relatif des parcelles plutôt que comme un classement absolu. En effet, le référentiel utilisé par le producteur pour évaluer le niveau de dégradation de sa parcelle sera non seulement fonction de l'évolution de la productivité et des processus qu'il y observe mais aussi de la connaissance qu'il a de la productivité et de l'intensité de ces mêmes processus sur des parcelles voisines dans son terroir, voire dans des terroirs environnants.

Sur base de l'évaluation des différents types de dégradation (Figure 2.5), on aurait pu s'attendre à un niveau beaucoup plus élevé de dégradation générale que celui qui ressort de la perception des ménages enquêtés. Cette possible sous-estimation de la sévérité réelle de la dégradation pourrait résulter du fait que les parcelles de faible productivité sont la norme plutôt que l'exception dans la zone d'étude. L'état général de dégradation d'une parcelle donnée serait perçu comme moins grave que ce qu'il n'est réellement, par comparaison aux parcelles voisines. L'absence d'encadrement des producteurs par des vulgarisateurs et techniciens agronomes locaux – une réalité pour la quasi-majorité des sites étudiés (Tableau 1.2) – pourrait aussi expliquer cette possible sous-estimation de l'état de dégradation réel des

parcelles. En effet, cela freine l'accès à une information qui pourrait aider l'ensemble des producteurs à mieux faire une analyse critique de leurs milieux.

2.4.3. Etat de dégradation à l'échelle des ménages

Parmi les quatre types d'exploitations identifiés, le type de ferme 4 se démarque significativement des trois autres types en termes de niveau de dégradation plus avancé, selon la perception des exploitants (Figure 2.9a). Parallèlement, on observe que le niveau de dégradation va de pair avec le niveau de pauvreté, les exploitations très pauvres se caractérisant par des états de dégradation significativement plus sévères (Figure 2.9b). Les ménages riches disposent d'exploitations de plus grandes tailles et/ou ont la possibilité d'accéder à d'autres sources de revenus qui leur permettraient d'investir dans la conservation de leurs terres (apport du fumier de ferme; structures antiérosives, ...), comme cela a été observé dans les plateaux et collines du Rwanda (König, 1993).

A l'opposé, les ménages pauvres exploitent les terres en continu et implantent le plus souvent les mêmes cultures (Mufungizi, 2016), mais avec peu de possibilités d'entretien du sol étant donné le faible accès aux crédits agricoles et aux amendements (Schut et al., 2016). Dans ces conditions, la majorité des ménages va assister de manière impuissante à une baisse de productivité soit par l'épuisement des sols, soit par l'augmentation de la compétition pour les ressources limitées en sols et en eau (McMichael et al., 2007, cités par Lal, 2009). Ceci va conforter

leur situation d'insécurité alimentaire, qui à son tour aura un impact sur la dégradation des sols et ainsi de suite (Lal, 2009).

Au-delà de cette variabilité de l'état de dégradation en lien avec le niveau de richesse, il existerait aussi une variabilité en lien avec d'autres facteurs socioéconomiques qu'il faudrait analyser, dont l'accès à l'éducation. En effet, dans plusieurs études, il a été démontré le rôle de l'accès à l'information ou à des connaissances en général, dans l'évaluation du niveau de dégradation des sols ainsi que dans les décisions d'adoption des mesures de lutte appropriées par les ménages (Alemu et al., 2019; Bewket, 2007; Amsalu and de Graaff, 2006).

Ainsi, l'accès à l'éducation des exploitants et, plus généralement, l'accès à des connaissances, vont être une source majeure de différences d'état de dégradation des terres entre les ménages pauvres et riches. En effet, les riches ont la possibilité d'accéder à des connaissances via les nombreuses opportunités qu'ils peuvent avoir, dont la participation à des formations en dehors de leurs milieux, l'observation dans les régions voisines ou encore à travers le paiement des études pour les membres de leurs familles. En revanche, les ménages pauvres ne peuvent que compter sur la présence des conseillers à travers la vulgarisation agricole, service qui est quasi inexistant à travers toute la RDC. En effet, les résultats trouvés par Ragasa et al. (2015) montrent qu'en dépit d'avoir l'un des ratios d'agent de vulgarisation/agriculteur les plus élevés en Afrique (avec 1.85 agents/1000 producteurs, juste derrière l'Ethiopie avec 2.08) et d'un

système de vulgarisation pluraliste, la RDC ne parvient pas à fournir des connaissances et des technologies aux zones rurales en raison d'un manque de coordination, d'une absence de politique et de mandat unifiés et clairs, du vieillissement et des faibles compétences des agents, et du manque de mobilité et d'interactions des agents avec les acteurs clés.

2.4.4. Etat de dégradation entre bassins versants et au niveau de la zone dans sa globalité

Globalement, selon la perception des producteurs, la zone d'étude se caractérise par un état de dégradation moyen, mais environ un tiers des parcelles présente un état de dégradation sévère à très sévère (Figure 2.5). Cet état général de dégradation peut être relié à la surexploitation des terres avec peu d'apports d'intrants externes et un manque de systèmes techniques permettant un recyclage efficace des ressources organiques disponibles localement (Pypers et al., 2010; Lunze, 2000). Les résultats concordent avec ceux d'une étude menée par l'UNFPA (1995) au niveau global qui montre que les principaux facteurs de dégradation des sols sont la perte de la couche arable (70%) et la perte des nutriments (7%) alors que la compaction ne représentait que 3,5%, malgré son rôle néfaste dans la dégradation physique des sols. En effet, là où la compaction du sol est présente, les dégâts liés à l'érosion ont tendance à être encore accentués (Lal, 2009). L'état de dégradation est le plus sévère sur les flancs de colline où se trouve la quasi-majorité des parcelles avec des pentes fortes (>20%) (Tableau A2). Il est plus faible dans les bas-fonds et haut de colline (Figure 2.6a).

Ce lien fort avec la position topographique semble indiquer le rôle central de l'érosion hydrique (et de processus associés comme la perte en éléments nutritifs et en matières organiques) dans l'état de dégradation. Ceci est cohérent avec l'importance accordée par les producteurs à l'érosion hydrique (Figure 2.7). Par ailleurs, les études menées par Moeyersons (1989), Roose et al. (1992), König (1993) avaient également fait état de niveaux de dégradation des sols très sévère sur les terrains en pentes au Rwanda en raison de la minéralisation accélérée de la matière organique ainsi que la perte d'éléments nutritifs et de matière organique par ruissellement et érosion hydrique.

Bien que l'état de dégradation soit assez comparable en moyenne entre bassins versants, on observe quelques différences entre eux (Figure 2.6b). Cependant, à l'échelle régionale, peu de facteurs explicatifs ont pu être identifiés pour expliquer ces différences mis-à-part l'altitude (probable reflet du relief général et en particulier de la pente), et la densité de la population (qui traduirait la pression sur les ressources disponibles) (Figure 2.11). On observe également que les bassins moins dépendant de l'agriculture pour leurs revenus présentent un état de dégradation moindre, ce qui pourrait s'expliquer par une moindre pression sur les sols ou une plus grande capacité à investir dans l'agriculture en général, et dans les méthodes de conservations en particulier.

2.4.5. Etat de dégradation et occupation des sols

Les bassins se caractérisent par une certaine diversité dans les choix de cultures, à l'exception des cultures principales que sont le maïs, le haricot et le manioc (Tableau 2.5). Ces trois spéculations sont cultivées soit en association maïs-haricot-manioc, soit haricot-manioc, mais rarement seules (Pypers et al., 2010). Seul le manioc peut être trouvé en monoculture dans une partie de champs, mais cela s'observe uniquement à des endroits où les autres cultures ont du mal à se développer (p.ex., sols très dégradés; CIALCA, 2010). La diversité des cultures s'accompagne d'une certaine diversité de pratiques agricoles (Figure 2.10), certaines pratiques étant spécifiques à certains types de cultures. Ainsi, le billonnage ou buttage sont pratiqués préférentiellement sur la patate douce, le manioc, le taro et l'igname (non montré). Cependant, cette relation entre pratique et culture n'est pas toujours facile à mettre en évidence compte tenu du fait que l'association de plusieurs cultures est le système de culture majoritairement adopté dans la zone étudiée (Figure 2.4b). Une pratique adoptée sur une culture quelconque (p. ex., amendement du manioc) est donc susceptible de bénéficier aux autres cultures mises en association (p.ex. maïs, haricot sous manioc, etc...).

A l'échelle parcellaire, bien que la prédominance des associations de cultures n'ait pas permis de mettre en évidence un lien univoque entre culture et état de dégradation, certaines tendances ont été observées. Par exemple, la culture du bananier est plutôt observée sur des parcelles faiblement à moyennement dégradées, ce qui corrobore les

résultats trouvés par Bekunda et al. (2003). Le caféier et le manioc sont plutôt situés sur des sols dégradés, ce qui reflète la capacité de ces cultures à produire même faiblement sur des sols dégradés (manioc) ou le caractère non prioritaire de la culture en termes d'entretien (café). En effet, contrairement aux pays avoisinants (Rwanda, Burundi, Ouganda), il n'y a pas de politique forte en matière d'appui à la filière café au Sud-Kivu. Il en est de même des cultures comme le maïs et haricot observées sur des sols moyennement à sévèrement dégradés comparées aux cultures comme la patate douce, et dans une moindre mesure le taro et l'igname, qui sont majoritairement observées sur les parcelles faiblement à moyennement dégradées (Figure 2.10a). Il est cependant difficile de déterminer si cela relève d'une stratégie d'allocation des cultures ou au contraire de l'impact des cultures sur le sol. Dans le cas des cultures maraichères par exemple, on peut y voir le résultat de leur allocation préférentielle sur des parcelles productives. Mais, il se peut aussi que ces cultures bénéficient préférentiellement des amendements organiques ou même du paillage en raison de la proximité avec les habitations (Tittonell et al., 2010), des faibles superficies cultivées en maraichage et de leur valeur financière. Dans le cas des plantes à racines et tubercules, la pratique du billonnage et/ou du buttage dont elles bénéficient pourrait réduire sensiblement la perte en terre, grâce au fait qu'ils peuvent réduire la vitesse de ruissellement. On note aussi que certaines pratiques comme le paillage, l'application de déchets ménagers, des résidus de cultures ou du compost visent préférentiellement les sols plus dégradés, en général plus éloignés des cases.

2.5. Conclusion

En se basant sur la perception des producteurs, cette étude montre un état de dégradation des sols globalement inquiétant puisque jugé moyen à sévère dans les 8 bassins versants enquêtés. Cette situation semble découler des conditions topographiques défavorables, de la forte pression sur les terres en lien avec la démographie, mais aussi de la capacité limitée des producteurs à investir dans l'entretien de leurs terres, les exploitations les plus pauvres ayant les niveaux de dégradation les plus élevés.

L'érosion hydrique apparaît comme une cause importante de la dégradation des terres, tout comme l'épuisement des sols et la perte en matière organique. Des liens ont pu être établis entre l'état de dégradation et certaines cultures et pratiques agricoles, même si une telle analyse est rendue très complexe compte tenu de la quasi-généralisation des associations de cultures. L'association des cultures et le billonnage/butage sont des pratiques de gestion qui sont déjà présentes dans le milieu et peuvent être davantage renforcées au vu de certains liens positifs avec la diminution de la dégradation observée. Néanmoins, afin d'objectiver les résultats, il serait utile de compléter ces données d'enquête avec des mesures quantitatives de la sévérité des différentes formes de dégradation, et en particulier de l'érosion hydrique.

Les résultats de cette étude indiquent qu'il est urgent d'intervenir auprès des producteurs de la dorsale du Kivu pour les aider à inverser le cercle vicieux de la dégradation des sols et de la pauvreté. La

méthodologie développée et les résultats obtenus, bien que basés sur la perception des ménages, devraient permettre d'accompagner des interventions futures grâce à une meilleure connaissance du milieu. En effet, cela permet de prioriser les exploitations ou les bassins versants en fonction de l'urgence perçue du problème. Cela peut ainsi servir de support à des stratégies d'interventions dans le milieu (protection des versants à l'échelle du bassin versant tout entier). A cet effet, le fait que les exploitants soient majoritairement propriétaires de leur parcelle facilitera la mise en œuvre de toute action de lutte contre les différentes formes de dégradation. Par ailleurs, le fait que la majorité des ménages enquêtés ont observés que les pluies tendent à devenir de plus en plus fortes et irrégulières, que l'exploitation des terres tend à devenir continue (absence de jachère), qu'ils doivent faire face à de nouvelles maladies dans leurs cultures ou que la fréquence des catastrophes naturelles tend à augmenter sont des atouts pour leur permettre d'être réceptifs à tout message allant dans le sens de chercher à apporter des solutions à ces changements.

Chapter 3

Erosion and Soil And Water Conservation in South-Kivu (Eastern D.R. CONGO): The Farmers' view [†]

[†] This paper is under review as:

Heri-Kazi B.A. and C.L. Biielders, 2019. EROSION and SOIL AND WATER CONSERVATION IN SOUTH-KIVU (EASTERN D.R. CONGO): THE FARMERS' VIEW. Submitted to Land Degradation and Development.

Abstract

Despite being one of the hotspots of soil erosion in the world, little is known regarding farmer's knowledge of soil erosion in the highlands of South-Kivu in the Democratic Republic of Congo. A proper understanding of farmers' knowledge regarding soil erosion and conservation measures is a prerequisite for implementing resilient erosion control measures. The objective of this study was therefore to assess farmers' knowledge of soil erosion, document existing soil and water conservation (SWC) measures and identify their adoption constraints in the highlands of South-Kivu. Data were collected using interviews with a semi-structured questionnaire involving 720 respondents from 8 watersheds in 4 territories. Farmers reported 8 main erosion indicators. As opposed to gullies (80% of farmers), rills were perceived as important erosion indicators by only 50% of farmers, despite their common occurrence. Farmers were largely unaware of the potential impact of their crops and cropping practices on erosion. Farmers knew about only a limited range of SWC measures, which were perceived as little to moderately efficient. Furthermore, the average level of adoption was very low (21%). Adoption constraints varied widely depending on the SWC measure. Thus, future interventions need to place much greater emphasis on awareness regarding soil erosion and SWC measures, strengthening farmers' capacity for experimentation and adaptation to new technologies and finally, to create a policy and institutional environment that stimulates widespread adoption of SWC techniques.

Keywords: Cropping practices, eastern DR Congo, farmers' perceptions, soil erosion, SWC measures, South Kivu, watershed.

3.1. Introduction

Soil erosion by water is one of the greatest causes of land degradation in the world, with numerous environmental but also social and economic impacts (Eswaran et al., 2001; Labrière et al., 2015). From an agricultural point of view, topsoil removal reduces the productive capacity of the soil through the loss of nutrients and organic matter, exposure of deep horizons of lesser quality and, in extreme cases, significant reduction in the volume of soil that can be explored by roots (Oldeman, 1992; Scherr, 2003; Crosson, 2003). Soil erosion may also cause direct damage to crops through root exposure, uprooting of seedlings or plants, or crop burial in deposited sediment (Prasuhn, 2011). In case of gullying, soil erosion may also result in the permanent loss of cropland when the size of the gully is beyond what can be remediated through locally available means (Poesen et al., 2003; Amaury et al., 2013). In developing countries, the loss of arable land through soil erosion has been shown to enhance poverty, underdevelopment and food insecurity, which will further lead to increased pressure on land and accentuate soil degradation, creating a vicious cycle (Lal, 2009). It has been argued that this vicious cycle weakens the resilience of smallholder farmers (Scopel et al., 2013) and will also restrict the availability of resources and knowledge to generate adequate income and opportunities to overcome the degradation process (Bationo et al., 2006).

In response to this issue, major investments have been made across the world to promote soil and water conservation (SWC) technologies. However, their dissemination has encountered difficulties, and

erosion continues to be a widespread issue, in particular in developing countries (Tenge et al., 2004; Wildemeersch et al., 2013). As a result, factors affecting farmer's adoption of SWC measures have been widely studied in order to identify possible bottlenecks. Such studies have most frequently focused on farming household characteristics and resource availability as a means to explain adoption constraints (Giller et al., 2009; Kassie et al., 2010; Wildemeersch et al., 2013). However, this has led to sometimes contradictory results because farmers across borders and regions live in different environmental, cultural and socioeconomic conditions. In addition, even though certain household characteristics may be necessary to ensure investment in SWC technologies (e.g., landowner, sufficient labour or financial resources), these conditions are generally not sufficient to explain farmer behaviour.

More recently, the importance of taking into account farmer's perceptions has been emphasized as a key to a better understanding of farmer's acceptance and implementation of SWC measures (e.g., Wauters et al., 2010; Birhanu and Meseret, 2013; Haghjou et al., 2014; Assefa and Rudolf, 2016). In particular, Meijer et al. (2015) and Assefa & Rudolf (2016) confirmed the interplay between the implementation of soil conservation measures and the perception of soil degradation, i.e., a greater awareness of the extent of land degradation and of the impact of on-farm activities on land degradation increases the likelihood of implementing SWC measures. In addition, the implementation of specific conservation measures will also be affected

by the farmer's knowledge or perception regarding the advantages or disadvantages of a given SWC technology (Wauters et al., 2010). Studying such perceptions is therefore crucial, not only for understanding the ways in which farmers react to the menace of soil erosion and plan their interventions in their respective environments, but also because it helps identify key leverage points on which to act in order to induce greater adoption (e.g., raising awareness, increased knowledge). In addition, a better understanding of farmer perceptions may help direct specific actions to specific farmer groups. For greater relevance, collecting such information is best performed using farmers' own criteria. Indeed, assessing the impact of agricultural activities on erosion using indigenous knowledge favours farmers' awareness regarding their responsibility in the changes observed in their landscape (Okoba & Sterk, 2006).

The East-African (EA) Highlands, with an altitude generally above 1500 m, spread across Ethiopia, Kenya, Tanzania, eastern D.R. Congo, Rwanda, Burundi, and Uganda (Hurni, 1990). This region is endowed with rather favourable soil and climatic conditions, making it one of the most suitable regions for agricultural activities in Africa. As a result, the EA Highlands are also one of the most densely populated areas of Africa, with average population densities ranging between 158 (Ethiopia) and 410 (Rwanda) inhabitants per km² (Himeidan and Kweka, 2012). Nevertheless, high rainfall erosivity and steep slopes create favourable conditions for the occurrence of soil erosion, a process that has been strongly enhanced by poor resource-use

practices and dramatic changes in land cover/land use during the last decades - a direct consequence of the high population pressure. This has in turn impacted food security and social livelihoods and contributed to the high overall poverty and agricultural crisis in the EA highlands (Place et al., 2006; Wickama et al., 2014; Assefa and Rudolf, 2016).

Whereas soil erosion by water has been well documented in many countries of the EA Highlands (Ethiopia, Kenya, Tanzania, Uganda, Burundi and Rwanda (Bagoora, 1988; El-Hassanin et al., 1993; Tenge et al., 2004; Okoba & Sterk, 2006; Bizoza, 2014), little is known to this date regarding the extent and severity of soil erosion and the level of implementation of conservation measures along the mountainous region of the South Kivu province in eastern D.R. Congo (Kivu dorsal), which is part of the EA Highlands. In this area, 80% of the populations live in the rural areas and more than 90% of them practice subsistence agriculture under rainfed conditions (Moumami, 2010), making this region especially susceptible to the consequences of land degradation by soil erosion. Land degradation also directly affects the urban population, since 70% of the food supply of cities in South Kivu comes from surrounding rural areas (IPAPEL, 2010). Strategic documents for the reduction of poverty recognize land degradation as a major threat to agricultural production and a source of poverty in all DRC provinces (DSRP, 2005; DSRP, 2011) and emphasize that solutions should imperatively move through an integrated approach to managing smallholder agriculture in watersheds in order to make it production

economically viable and environmentally sustainable (Hauser et al., 2007). Nevertheless, and unlike in neighbouring countries, there is a general lack of scientific investigations in South-Kivu regarding soil erosion and indigenous soil and water conservation measures, despite it being identified as one of the hotspots of soil erosion in Africa (Van Oost et al., 2007). This situation can be largely attributed to the weak presence of government agencies, weak financing of national research institutions as well as the high level of insecurity that has lasted for several decades in the region.

During colonial times, from the 1940's till the 1960's, projects such as "Mission anti-érosive au Kivu" widely implemented linear landscape elements such as ditches, grass strips, and bench terraces, but these have largely disappeared nowadays (Moeyersons, 1989; Moeyersons, 2004). According to Lunze (1990), adoption of SWC measures in the 1980's remained low despite the presence of various NGO's involved in extension and dissemination of SWC technologies in the Kivu dorsal. Little is known as to how the situation has evolved since then, but it is unlikely to have improved given the rapidly growing population, high poverty levels and persistent insecurity. Since it is nowadays well accepted that, for farmers to adopt SWC technologies, they need to be aware of the erosion issue and its effects, perceive it as serious enough, and must be able to undertake action against it, this study aimed at assessing farmers' knowledge of (i) soil erosion and the perceived causes and impacts of erosion on their cropping systems, and (ii) soil and water conservation measures and their adoption

constraints. Such information may then serve to guide future intervention strategies in South Kivu.

3.2. Materials and methods

3.2.1. Study area

A survey was conducted in 55 villages across four territories (Walungu, Idjwi, Kabare, and Kalehe) of the south Kivu dorsal (Figure 1.1). Two watersheds per territory were selected taking into account the watershed's representativity in terms of soil type and smallholder farming systems, but also their accessibility (Figure 1.2). As a matter of fact, bad road conditions and insecurity (presence of some armed groups) are major constraints to access some areas (Ulimwengu et al., 2009). Watershed and village selection were described in Chapter 1 (§ 1.5.2). Soil and climatic characteristics of the area were provided in Chapter 1 as well (§ 1.2.2).

3.2.2. Data Collection

In order to have a comprehensive understanding of farmers' opinion on soil erosion and SWC practices, we collected information through individual semi-structured questionnaire interviews with 720 randomly selected farmers in total, 90 per watershed. For a more detailed description of the household selection procedure, see Chapter 2 (§ 2.1.2). The survey aimed at assessing (i) the severity of land degradation by soil erosion and the soil fertility status, (ii) farmer's knowledge regarding erosion and in particular indigenous indicators used by farmers to assess the occurrence of erosion, (iii) causes of soil

erosion with special emphasis on farmer's perception regarding the impact of their crops and cropping practices on soil erosion, and (iv) farmer's knowledge about SWC techniques and perceived constraints or reasons for non-adoption.

For this survey, respondents were heads of farming households (males or females) or, in case of absence, their partners or grown-up children. The surveys were conducted in local languages. The survey was done either at the farmer's home or in his field. Additional details were provided in Chapter 2 (§ 2.1.2).

All erosion and soil conservation effectiveness data were derived from farmer interviews and researcher observations. Based on the survey results, an erosion severity index was calculated as follows. First, farmers were asked to list all erosion indicators observed in their fields. For each sign listed, farmers rated the severity for their own field on a scale from 1 (weak) to 4 (very high). Because farmers were not asked to rank the relative importance of each indicator, a weight was calculated for each observed sign by dividing its obtained frequency by the total frequency of all signs observed, i.e., more weight is given to signs commonly reported by all surveyed farmers. Then, the erosion severity index of a given field was obtained by adding the weighted severity indexes of all signs observed in that field (Table 3.1).

Table 3.1. *Weighing factors used for calculating erosion severity*

Erosion Indicator (a)	Average frequency (%)	Weight
Presence of gully	80.4	0.14
Root exposure	76.3	0.13
Decrease of topsoil depth	74.3	0.13
Loss of organic matter	73.9	0.13
Loss of soil fertility	68.2	0.12
Burial of crops	66.3	0.11
Hampered tillage	58.5	0.10
Presence of rills	50.6	0.09
Stoniness/rock outcrops	31.1	0.05

Likewise, farmers were asked to list the main causes of water erosion in their fields and to rank the importance of each cause on a scale from 1 to 4. Whether or not crops or farming practices were cited as causes of erosion, farmers were requested to express their opinion regarding the possible impact of these two factors on erosion (promote, neutral, restrict).

Farmers were also asked about the SWC measures implemented in their fields and to rank the effectiveness of each SWC measure on a scale from 1 (low) to 4 (very high). Based on these ratings, an average effectiveness index was calculated for each technique. Finally, all farmers were asked to provide the reasons why they did not implement a range of conservation measures.

3.2.3. Data analysis

Data was processed and analysed with XLSTAT (version 2016.02.2). Analyses involved descriptive statistics, including frequencies

distributions and graphs. Chi-squared tests were used to test for differences across watersheds. Simple logistic regression was performed to analyse the relationship between the erosion severity index and the presence/absence of SWC techniques. Relationships were also sought between some characteristics (e.g., topography, cropland use and adopted SWC measures) and the farmers' perception of these erosion indicators and causes using chi-test methods.

3.3. Results

3.3.1. Erosion indicators

3.3.1.1. Type and extent of erosion indicators

Nine main erosion indicators were reported by the farmers, of which eight were listed by more than 50% of the respondents (Table 3.2). Two indicators relate to forms of erosion (rills and gullies) while the remainder refer to the impacts. Impact indicators relate mostly to the consequences of erosion or sedimentation on soils or crops, though one indicator also relates to the impact on labour. Whereas the presence of gullies was reported as a sign of erosion by 80% of farmers on average across all watersheds, rills were only mentioned by 50% of farmers. The frequency of observation of erosion indicators varied significantly across watersheds ($p < 0.0001$).

Table 3.2. Frequencies of observed signs of erosion within the eight watersheds and Chi-square test (χ^2) results (% farmers; $n = 90$ for each watershed).

Signs of erosion	Avg.	Kal1	Kal2	Kab1	Kab2	Idj1	Idj2	Wal1	Wal2	Chi ²	p-value
Presence of gully	80.4	76.7	97.8	78.9	84.4	91.1	84.4	70.0	60.0	56.6	< 0.0001
Root exposure	76.3	74.4	98.9	75.6	75.6	93.3	81.1	54.4	56.7	84.0	< 0.0001
Decrease of topsoil depth	74.3	76.7	97.8	76.7	73.3	93.3	82.2	57.8	36.7	126.2	< 0.0001
Loss of organic matter	73.9	61.1	96.7	80.0	81.1	84.4	83.3	53.3	51.1	89.3	< 0.0001
Loss of soil fertility	68.2	65.6	93.3	72.2	73.3	85.6	85.6	38.9	31.1	146.0	< 0.0001
Burial of crops	66.3	70.0	97.8	63.3	60.0	74.4	68.9	51.1	45.6	72.1	< 0.0001
Hampered tillage	58.5	63.3	93.3	52.2	55.6	90.0	77.8	31.1	4.4	234.3	< 0.0001
Presence of rills	50.6	46.7	87.8	64.4	45.6	71.1	56.7	13.3	18.9	160.8	< 0.0001
Stoniness/rock outcrops	31.1	20.0	94.4	16.7	10.0	64.4	28.9	13.3	1.1	299.0	< 0.0001
Others	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	1.1	0.0	16.1	0.024

Notes : The sum of frequencies for each watershed is greater than 100 as farmer could provide more than one response. Kal = Kalehe; Kab = Kabare, Idj = Idjwi, Wal = Walungu.

On average over all nine indicators (excluding 'others'), erosion signs were more frequently reported in Kal2 and Idj1 (> 80% of farmers on average) and least in Wal1 and Wal2 (< 45% of farmers on average). Although gullies were commonly cited in all watersheds (>60% of farmers), some other indicators were extremely variable. This was for instance the case for 'hampering of tillage' (4-93%) and 'stoniness/rock outcrop' (1-94%) but also for 'rills' (13-88%).

3.3.1.2. Relationship between erosion indicators and topographic positions

Based on the chi-square test, the perceived erosion indicators varied widely depending on the topographic positions (Table 3.3). Apart from gullying which affects all the positions more or less equally, the other perceived erosion indicators varied highly and significantly across the positions. Frequencies of perceived erosion indicators were generally highest for downhill and hillside positions compared to the other positions. Crop burial and tillage difficulties also strongly affected plots in depressions.

Table 3.3. Frequencies of erosion factors as a function of the location on topographic positions, and summary results of chi-square test (Chi²)

<i>Erosion indicators (a)</i>	Frequency on the topographic positions					Chi²	p-value
	<i>Depression</i>	<i>Downhill</i>	<i>Hillside</i>	<i>Plateau</i>	<i>Hilltop</i>		
Presence of gully	85.7	85.4	92.7	89.3	81.8	5.2	0.26
Root exposure	85.7	83.3	88.8	64.3	72.7	16.9	0.002
Decrease of topsoil depth	57.1	81.3	86.8	64.3	72.7	16.6	0.002
Loss of organic matter	57.1	87.5	85.7	71.4	54.5	15.9	0.003
Loss of soil fertility	28.6	77.1	80.6	50.0	45.5	31.5	< 0.0001
Burial of crops	85.7	70.8	77.8	53.6	45.5	15.3	0.004
Hampered tillage	71.4	60.4	69.8	32.1	27.3	26.1	< 0.0001
Presence of rills	57.1	62.5	59.6	25.0	27.3	17.7	0.001
Stoniness/rock outcrops	14.3	39.6	37.2	10.7	9.1	13.3	0.01

Not all farmers reported all erosion signs (Figure 3.1). Nevertheless, the overall severity of the signs was, on average, perceived by 21% of the respondents that mentioned a certain erosion sign as high to very high. The severity was highest for root exposure (high to very high for 38% of respondents), and lowest for rills (high to very high for 9% of respondents).

Based on the severity of the observed erosion signs, a severity index was calculated for each farmer's field. Across the watersheds, erosion severity was 2.3 ± 1.1 (mean $\pm$ SD), i.e. between moderate and high (Figure 3.2). On average, 30% of fields are subject to severe to very severe erosion (index ≥ 3).

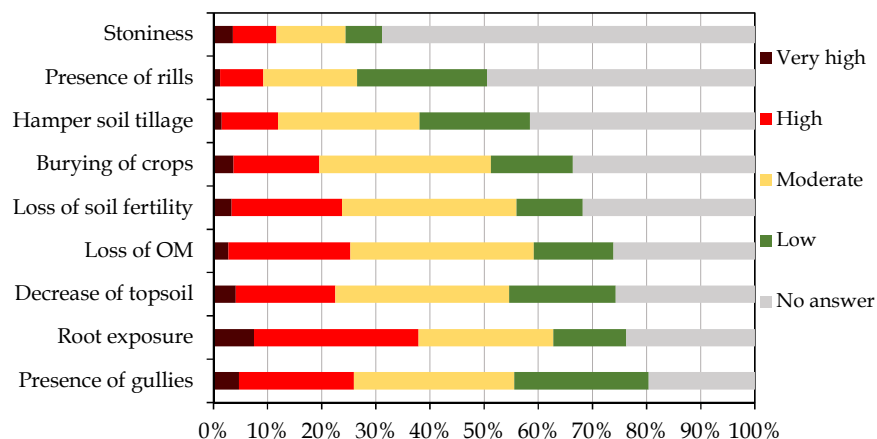


Figure 3.1. Frequency distribution of perceived severity of observed signs of erosion (% farmers, n= 720). No answer refers to the farmers that did not observe the sign in their field.

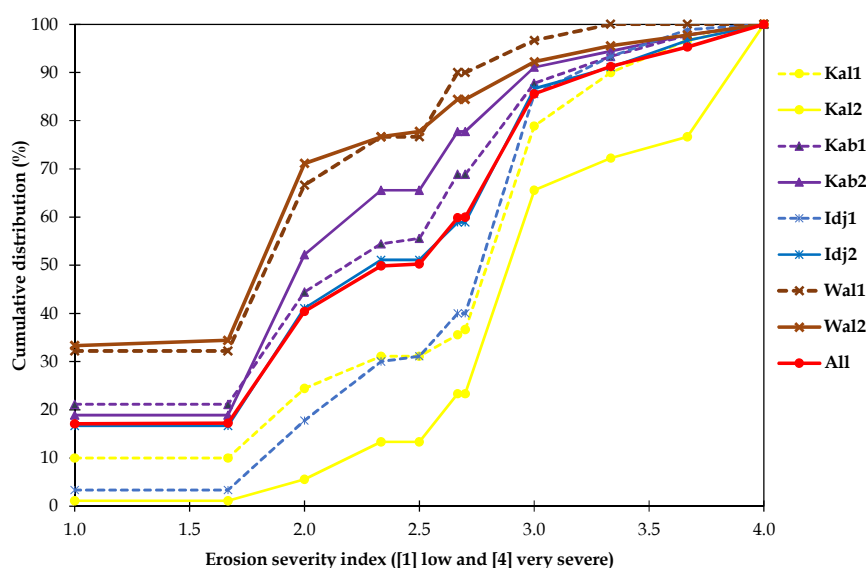


Figure 3.2. Cumulative distribution of erosion severity index in the eight watersheds of Kivu dorsal (N = 90 in each watershed). Kal = Kalehe; Kab = Kabare; Idj = Idjwi; Wal = Walungu; All= the total of 8 watersheds.

3.3.2. Causes of water erosion

The most commonly quoted causes of soil erosion (>50% respondents) in all the eight watersheds were high rainfall, steep slopes, occurrence of runoff and nature of the soil (Table 3.4). Overall, less than 20% of farmers associated erosion to their choice of crops and farming practices. Nevertheless, the perception of the causes of soil erosion varied significantly across watersheds (Table 3.4). Across all causes, awareness was again highest in Kal2 and Idj1 (>70% awareness on average), and lowest for both Walungu watersheds (<40% awareness) where the perceived erosion severity was also low (Figure 3.2). High rainfall was perceived as a cause of erosion in all watersheds (>69% of respondents). Slope was also viewed as a cause by a majority (>70%) of farmers in all watersheds except in Wal2 where only 50% of farmers

mentioned this factor. Regarding crops and farming practices, their contribution to erosion was nearly fully ignored in Kal1, Wal1 and Wal2 (<5%) compared to the other watersheds where 21 to 36% of the farmers considered that these factors contribute to erosion. On average across all watersheds, less than one fifth consider that crops or farming practices contributed to soil erosion.

The contribution of rainfall, slope steepness, runoff and soil properties to soil erosion was perceived as being of moderate to very high importance by 86%, 61%, 51%, and 33%, respectively, of those farmers who identified the causal factor (Figure 3.3). In addition to the fact that few producers identified cropping practices and crops as causal factors (Table 3.4), more than half of those who listed these two factors considered them to be of low importance (Figure 3.3).

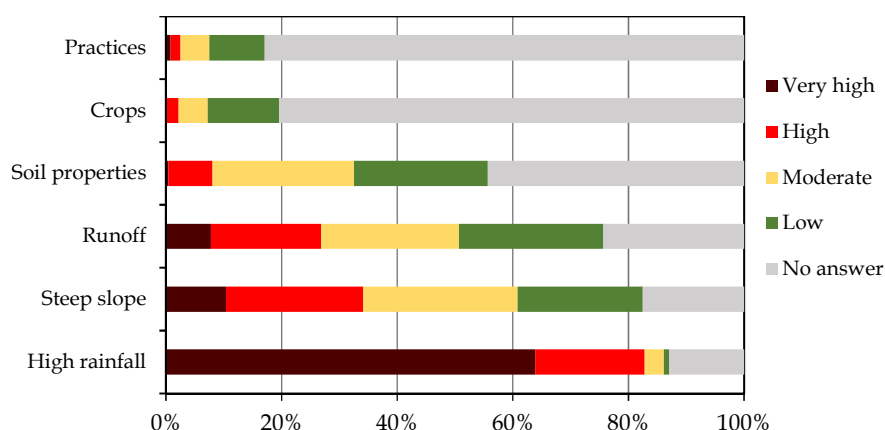


Figure 3.3. Frequency distribution of perceived importance of the soil erosion causal factors listed in Table 3.4 (% farmers, N = 720). No answer refers to the farmers that did not report the causal factor.

Among the perceived erosion causes, high rainfall, runoff and soil type concerned all the topographic positions, while crop and agricultural practice were more often mentioned as a cause of erosion on downhill and hillside positions. Slope was more often cited in relation to downslope, hillside and plateau positions (Table 3.5).

Table 3.4. Frequencies of perceived causes of soil erosion within the eight studied watersheds and Chi-square test (χ^2) results (% farmers, $n = 90$ for each watershed)

Main cause	Avg.	Kal1	Kal2	Kab1	Kab2	Idj1	Idj2	Wal1	Wal2	χ^2	p-value
High rainfall	87.1	88.9	98.9	84.4	88.9	96.7	90.0	80.0	68.9	50.8	< 0.0001
Steep slope	82.5	85.6	98.9	81.1	87.8	96.7	90.0	70.0	50.0	110.8	< 0.0001
Runoff	75.7	75.6	98.9	78.9	73.3	97.8	87.8	53.3	40.0	144.9	< 0.0001
Soil properties	55.7	60.0	64.4	57.8	53.3	81.1	61.1	34.4	33.3	63.2	< 0.0001
Crop choice	19.6	4.4	35.6	30.0	31.1	31.1	21.1	1.1	2.2	85.9	< 0.0001
Practices	17.1	1.1	30.0	25.6	24.4	30.0	22.2	0.0	3.3	77.6	< 0.0001
Other	0.1	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.428

Notes : The sum of frequencies for each watershed is greater than 100% as farmer could provide more than one response. Kal = Kalehe; Kab = Kabare, Idj = Idjwi, Wal = Walungu. χ^2 = Chi-square

Table 3.5. Frequencies of perceived causes of erosion and location on topographic positions, and the summary results of chi-square test (χ^2)

Main cause of erosion	Frequency on the topographic positions					χ^2	p-value
	Depression	Downhill	Hillside	Plateau	Hilltop		
High rainfall	100.0	97.9	99.8	96.4	100.0	9.4	0.05
Steep slope	0.0	91.5	97.0	57.1	27.3	221.2	< 0.0001
Runoff	85.7	83.0	88.6	57.1	72.7	25.1	< 0.0001
Soil properties	42.9	53.2	65.7	50.0	54.5	7.2	0.13
Crops	0.0	25.5	23.7	3.6	9.1	9.6	0.05
Practices	0.0	23.4	20.3	3.6	18.2	6.9	0.14

3.3.2.1. *Effect of crops on erosion*

Table 3.6a lists the 12 most important crops grown in the study area. Beans, cassava and maize are staple crops and are grown by more than 85% of farmers. Sweet potato, banana and taro are cultivated by 35 to 64% of the farmers. The remaining crops are grown by approximatively 10-20% of the farmers. Most crops were perceived by farmers as being neutral with respect to erosion (Table 3.6a). Regarding coffee and banana, 57% and 55% considered these crops as having an anti-erosion effect because of their perennial nature. Consistent with the above-mentioned results (Table 3.4), very few farmers considered that crops could promote erosion. In this respect, beans appeared as the least favourable crop, though only by 8% of the respondents.

3.3.2.2. *Effect of farming practices on erosion*

Eleven main agricultural practices were reported. Weeding, manual tillage (with hand-hoe, machete...) and intercropping as well as household waste, crop residue or compost application were performed by more than 75% of the farmers (Table 3.6b). Most farming practices were perceived as neutral with respect to soil erosion, except for hilling and ridging which were perceived to limit erosion by 83% and 42% of adopters because they slow down runoff water flow. Hilling and ridging are, however, restricted to specific crops such as yam and sweet potato. An anti-erosive effect was also attributed to farmyard manure (27%) and intercropping (10%), although the majority of respondents view these two techniques as neutral. Ploughing and weeding were generally perceived as neutral but 15% of the respondents considered that these practices favour erosion.

Based on an analysis of the perceived erosion indicators as a function of crop types, it emerges that the presence/absence of all erosion signs is significantly affected by crop type. Market gardens and banana plots were the least frequently affected by most erosion signs (Table 3.7). On the other hand, coffee tree, sunflower and soybean plots were most frequently affected by various signs, mainly by gully, root exposure, topsoil depth, loss of soil fertility, hamper tillage and rill.

Table 3.6. Frequency distribution for perceived effect of crops and common farming practices on soil erosion (promote, limit or no effect) (% farmers, N = 720). Adopters correspond to the farmers cultivating a given crop or applying a given farming practice. Respondents correspond to the fraction of adopters that evaluated the crop / farming practice impact on erosion.

farming practice impact on erosion.						
Crops (a)	Adopters (%)	Respondents (% of adopters)	Promote (%)	No effect (%)	Limit (%)	
Banana	56.4	83.0	0.0	45.1	54.9	
Bean	94.7	85.3	8.2	91.4	0.3	
Cassava	93.2	85.1	1.6	89.1	9.3	
Coffee tree	16.4	81.4	0.0	42.7	57.3	
Gardens	10.0	62.5	0.0	86.7	13.3	
Groundnut	21.4	76.6	5.1	94.9	0.0	
Maize	85.4	82.8	3.3	95.5	1.2	
Soy	13.9	89.1	4.4	95.6	0.0	
Sunflower	12.6	44.0	2.5	87.5	10.0	
Sweet potato	63.5	81.8	0.5	86.9	12.6	
Taro	35.3	68.9	1.1	91.4	7.4	
Yam	19.4	62.9	0.0	86.4	13.6	
Common farming practices (b)	Acronyms					
Weeding	WEED	100	46.8	13.9	84.6	1.5
Ploughing/Tillage	TILL	99.3	62.1	15.8	79.1	5.2
Intercropping	INTERC	83.1	73.5	0.2	89.6	10.2
Household waste application	WASTE	73.6	41.3	0	97.2	2.8
Crop residue application	RESIDUE	79.2	61.0	0.6	95.4	4
Compost application	COMPOST	12.5	70.5	0.8	94.2	5
Hilling	HILL	48.5	22.1	0	16.9	83.1
Farmyard manure application	FYM	34.8	52.6	0.8	72.7	26.5
Mulching	MULCH	23.8	58.3	0	96.7	3.3
Crop succession/rotation	ROTATION	21.8	81.7	0	95.7	4.3
Ridging	RIDGE	5.1	100.0	1	57.3	41.7

Notes: Percentage does not add up to 100 because of multiple responses.

Table 3.7. Summary results of chi-square test (χ^2) to link crop types in the eight surveyed watersheds with the perceived soil erosion indicators (DDL=11).

Indicators / Crops	Presence of gully	Root exposure	Decrease of Topsoil	Loss of OM	Loss of soil fertility	Burying of crops	Hamper soil tillage	Presence of rills	Stoniness / rock outcrop
Banana	78.1	70.2	67.2	67.2	59.4	59.4	45.1	44.1	23.2
Bean	80.9	76.8	74.3	73.7	67.9	67.1	58.8	50.6	30.9
Cassava	81.2	76.9	74.5	74.2	68.4	67.4	58.9	50.5	31.4
Coffee	88.8	84.5	87.1	80.2	80.2	75.0	69.8	75.9	38.8
Gardens	66.2	59.2	60.6	66.2	53.5	56.3	38.0	31.0	18.3
Groundnut	82.5	79.9	78.6	79.2	77.3	68.8	68.2	59.7	30.5
Maize	80.6	76.2	74.9	73.2	69.5	66.6	60.2	50.7	31.6
Sunflower	85.4	82.0	80.9	78.7	78.7	74.2	76.4	59.6	43.8
Sweet potato	79.6	75.7	72.4	71.3	65.9	65.9	56.2	45.7	29.3
Taro	78.0	75.6	74.4	74.0	67.3	70.9	59.1	49.2	33.1
Yam	81.9	80.4	79.7	78.3	72.5	73.2	69.6	49.3	32.6
Soy	88.0	82.0	83.0	82.0	82.0	75.0	74.0	61.0	36.0
Chi²	22.96	30.28	38.09	23.24	51.45	27.40	84.91	64.34	29.83
p-value	0.02	0.001	< 0.0001	0.02	< 0.0001	0.004	< 0.0001	< 0.0001	0.002

3.3.3. SWC measures and adoption constraints

Besides the cropping practices, farmers reported seven specific soil erosion control measures (Table 3.8). Drainage ditches and agroforestry systems were applied by 69% and 42% of farmers, respectively. Additionally, 15% and 13% of farmers, respectively, knew about these techniques for erosion control but did not implement them. Planting a hedge along the contour was a known anti-erosive measure for 39% of farmers, but only half of them declared planting such hedges. On the contrary, all farmers who knew about anti-erosive bunds for erosion control also implemented them (15%). Only very few farmers (<4%) declared knowing or maintaining a permanent vegetation cover, ploughing along the contour or placing brushwood fences. Overall, the average adoption rate of erosion control techniques was very low (21%), and varied widely depending on the watershed, even for the four techniques (DITCH, AGROF, CBUND, PCOVER) which were fairly present throughout this study area.

As mentioned, common cropping practices such as mulch or compost application, tillage or intercropping, were seldom perceived as beneficial for erosion control (Table 3.6b). Consistently with this, their average effectiveness was perceived as low on average (1.1-1.4 on a scale from 1 to 4; not shown). Drainage ditches and permanent vegetation cover were deemed most effective for erosion control, closely followed by contour hedges and contour bunds (Table 3.9). The effectiveness of all four measures was rated 2.3 to 2.6, i.e., between moderate and high. Agroforestry was deemed moderately effective. Brushwood fences were reported as being of low effectiveness, but

only 7 farmers had practical experience with this technique, and among those, only 4 reported on the effectiveness. The rating of contour plowing, and permanent vegetation cover may similarly be questioned given the low number of evaluators.

The main reasons formulated by farmers (Table 3.10) when asked why they did not adopt certain SWC measures were small farm size, labour requirements, availability of suitable equipment, insufficient money and labour, and perceived inefficiency of some techniques. In addition, some producers did not consider soil erosion as a big problem in their fields, so that there was no need for them to adopt SWC measures.

Table 3.8. Frequency of SWC measures adopted within the eight watersheds and Chi-square test (Chi²) results (% farmers; n = 90 for each watershed).

SWC measure	Acronyms	Avg.	Kal1	Kal2	Kab1	Kab2	Idj1	Idj2	Wal1	Wal2	Chi ²	p-value
Hedge along contour	HEDGE	2.8	5.6	0.0	2.2	0.0	4.4	0.0	6.7	3.3	16.5	0.02
Drainage ditches	DITCH	68.9	77.8	72.2	77.8	72.2	66.7	63.3	70.0	51.1	22.4	0.002
Agroforestry	AGROF	41.5	43.3	43.3	34.4	43.3	54.4	46.7	40.0	26.7	17.7	0.01
Earthen bunds along contour	CBUND	12.5	42.2	1.1	6.7	1.1	37.8	4.4	4.4	2.2	168.8	< 0.0001
Permanent vegetation cover	PCOVER	20.0	32.2	13.3	31.1	20.0	15.6	12.2	15.6	20.0	23.5	0.001
Contour ploughing	PLOUGH	1.7	4.4	2.2	2.2	2.2	2.2	0.0	0.0	0.0	11.6	0.11
Brushwood fence	BFENCE	1.0	1.1	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	14.9	0.04

Table 3.9. Reported SWC measures: percentage farmers aware of the anti-erosive function, percentage adopters, and frequency distribution regarding the perceived effectiveness for erosion control (N = 720). ¶ On a scale from 1 to 4.

SWC measures (Acronyms)	Aware	Adopt	Effectiveness					Avg. effectiveness¶
			Very high	High	Moderate	Low	No answer	
			(4)	(3)	(2)	(1)		
	%	%	%	%	%	%	%	
DITCH	84	69	15	41	30	14	0.4	2.6
PCOVER	20	20	0	60	30	5	5	2.5
HEDGE	39	2.8	3	45	43	8	1.4	2.4
CBUND	15	12.5	8	26	59	4	3	2.3
PLOUGH	1.7	1.7	0	33	33	33	0	2.0
AGROF	54	42	2	25	41	29	3	1.9
BFENCE	1.5	1	0	14	29	14	43	1.1

Table 3.10. Reported constraints/reasons for non-adoption of each SWC measures (n=567)

Acronyms	Constraints	Number of respondents	% of farmers
FSIZE	Small farm size	107	19
WORK	Requires a lot of work	95	17
MOTIV	Motivation (Laziness or neglect of farmers; neighbours do not get involved)	64	11
NO-EROS	Erosion is not a big problem in my plot	60	11
EQUIPMENT	Suitable equipment not available	49	9
COST	Requires a lot of money	46	8
LABOUR	Insufficient labour availability	44	8
EFFECT	Not interesting/ ineffective method (technique)	38	7
TENURE	Technique not allowed in the rental plots	16	3
DIST	Large distance from the house to the plot	11	2
COMPOST	Domestic waste and mulches are usually composted	11	2
NOTFAM	Not familiar with the technic	10	2
PEST	Mulch and hedge hide pests within plots	7	1
COMPET	Trees in the plot bother the crops	5	1
LIVEST	No livestock within the household	4	1
Total		567	100

The main constraint for hedges and agroforestry systems was the small size of farms. Adoption of hedges also faces from the work requirement and cost (Table 3.11). In addition, farmers justify its non-adoption by its low perceived effectiveness and the fact that erosion on their plots is not such a big problem. This is also apparent in the high number of farmers that declare little motivation to implement hedges. Besides farm size, adoption of agroforestry systems suffers from cost and equipment availability. Although labour requirement is less of a problem than for hedges, farmer motivation appears as a serious constraint. Both techniques are restricted on rented plots.

Drainage ditches are mostly constrained by perceived lack of erosion, labour requirements, perceived effectiveness and motivation but only little by farm size. Motivation and perceived lack of erosion also constrain the adoption of contour bunds. The use of organic amendments such as household waste and compost is constrained by the amount of work required for composting, and in the case of household waste, transportation to the fields. Availability of material is also an issue for mulches and compost, including the availability of manure to be added to the compost (Table 3.11).

Based on logistic regression, a significant positive relationship between adoption and erosion severity was found for 4 practices (Table 3.12). The likelihood of adoption of drainage ditches, agroforestry, permanent cover and application of household waste increases as the severity of erosion increases. This appears to indicate that these practices are implemented, at least in part, in response to erosion.

Table 3.11. Number of respondents for each constraint identified in the adoption of each SWC measure (n is variable for each constraint).

SWC/ Constraints	HEDGE	DITCH	AGROF	CBUND	PCOVER	PLOUGH	BFENCE	COMPOST	MULCH	WASTE
FSIZE	24	6	28	2	3	2	0	6	4	3
WORK	14	24	5	0	0	1	1	38	10	1
MOTIV	20	16	13	2	2	0	0	6	4	0
NO-EROS	21	30	1	7	0	0	0	0	0	0
EQUIPMENT	8	7	13	0	0	0	0	16	5	0
COST	13	8	11	0	2	1	0	6	1	1
LABOUR	10	9	6	1	2	1	0	7	5	2
EFFECT	13	10	1	3	0	0	0	2	1	1
TENURE	5	2	8	0	0	0	0	0	0	0
DIST	0	0	0	0	0	0	0	2	0	9
COMPOST	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6
NOTFAM	1	2	0	0	0	0	1	2	1	0
PEST	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
COMPET	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
LIVEST	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
Total of respondents	136	114	91	15	9	5	2	89	36	23

Table 3.12. Summary results of logistic regression analysis between erosion severity index and each significant adopting SWC measures/techniques in the study area (variables and model parameters).

Variables (Practices)	Source	Value	Standard error	Wald Chi-Square	Pr > Chi²	Odds ratio (OR)
WASTE	Intercept	0,126	0,146	0,741	0,389	
	Erosion index	0,712	0,103	48,229	< 0,0001	2,038
DITCH	Intercept	0,081	0,142	0,326	0,568	
	Erosion index	0,542	0,094	33,551	< 0,0001	1,720
AGROF	Intercept	-0,727	0,142	26,203	< 0,0001	
	Erosion index	0,271	0,083	10,575	0,001	1,311
PCOVER	Intercept	-1,825	0,184	98,282	< 0,0001	
	Erosion index	0,297	0,102	8,445	0,004	1,345

Based on the chi-square test results, it appears that the presence / absence of most erosion signs varies significantly depending on the adopted agricultural practices or SWC measures (Table 3.13). Because of counts lower than 5 for some adopted SWC measures, the HEDGE, PLOUGH and BFENCE techniques were not included in the Chi-square test analysis (the theoretical counts should not be lower than 5 for chi-square approximation) (Table 3.13).

Regarding the agricultural practices (Table 3.13a), RIDGE plots (59% on average) were generally least affected by the various erosion signs, closely followed by FYM (64%) and ROT (64%). On the other extreme, HILL plots were generally most strongly affected by the various erosion signs (79% on average). The presence / absence of gullies was independent of the agricultural practices.

For SWC measures (Table 3.13b), neither gullies nor rills were affected by the type of SWC measure. On average, the presence of erosion signs was lowest in MULCH (60% on average) and COMPOST (64%) plots. For the other techniques, erosion signs were present on average in 69-74% of the plots.

Table 3.13. Summary results of chi-square test (χ^2) to link (a) agricultural practices and (b) adopted SWC measures in the eight surveyed watersheds with the perceived soil erosion indicators

Indicators / Variables	Presence of gully	Root exposure	Decrease of topsoil depth	Loss of OM	Loss of soil fertility	Burying of crops	Hamper soil tillage	Presence of rills	Stoniness /root outcrops
(a) Adopted agricultural practice (DDL=7)									
WEED	92.0	85.2	82.8	78.6	73.3	69.1	62.0	65.0	32.6
TILL	90.1	85.4	82.9	80.9	73.0	70.7	61.9	57.9	30.9
INTERC	90.3	84.7	81.7	80.3	73.4	71.4	60.8	54.6	31.5
RESI	89.5	82.2	79.6	80.6	70.7	70.7	54.1	55.7	27.4
HILL	92.3	94.9	89.7	88.5	87.2	89.7	79.5	46.2	41.0
FYM	93.9	79.5	77.3	66.7	60.6	59.8	53.8	58.3	26.5
ROT	92.7	83.5	77.4	75.0	69.5	64.6	50.6	43.9	18.9
RIDGE	90.8	74.5	69.4	72.4	54.1	63.3	43.9	42.9	13.3
Chi-square	4.08	17.41	17.19	22.23	33.88	26.02	35.64	31.92	30.54
p-value	0.77	0.01	0.02	0.002	< 0.0001	0.001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
(b) Adopted SWC measure (DDL= 6)									
DITCH	89.3	86.0	81.8	80.4	74.7	74.7	63.4	56.5	31.6
AGROF	89.3	85.2	83.2	81.4	79.0	77.3	67.4	59.8	36.4
CBUND	92.0	90.8	82.8	75.9	75.9	78.2	71.3	62.1	39.1
PCOVER	86.1	87.5	85.4	83.3	79.9	77.8	68.8	55.6	34.0
COMPOST	85.6	80.2	73.4	72.4	65.9	67.5	52.8	50.1	24.9
MULCH	84.9	78.0	70.4	71.1	59.1	59.1	46.5	49.7	25.2
WASTE	88.6	82.4	79.7	77.5	71.8	72.0	62.9	56.6	33.3
Chi²	6.62	14.91	23.84	17.29	34.11	26.80	38.63	10.60	17.08
p-value	0.36	0.02	0.001	0.01	< 0.0001	0.0002	< 0.0001	0.10	0.01

3.4. Discussion

3.4.1. Awareness of soil erosion problems and causes

A range of impact indicators were reported by farmers, indicating a broad understanding of the impacts of erosion both on soils (reduced depth, loss of SOM and fertility, stoniness where applicable) and crops (root exposure, burial of crops). Given the steep slopes and heavy rainfall, gullies are very common in Kivu dorsal in areas impacted by human activities, and they are fully recognized by farmers as a sign of erosion (Photos 3.1a; 3.1b). Rills were generally among the least cited indicators, despite their common occurrence in the majority of fields and watersheds (personal observations; Photo 3.1c) and the severity of rilling was mostly ranked as medium to low. The rate of reporting of rilling varied greatly across watershed, from 88% in Kal2 to 13% Wal1. Similarly, variable results regarding the use of rilling as an indicator of soil erosion have been reported across studies (e.g., Takele et al., 2015; Okoba & De Graaff, 2005). In the Kivu dorsal area, it is the ephemeral nature of rills that appears to explain the low rating as an indicator. Indeed, rills form only after significant rainfall events and are easily erased by routine land management activities (tillage or weeding). Thus, farmers do not perceive the high quantities of sediments that can be lost by this form of erosion, and the overall severity of erosion may be largely underestimated.



Photo 3.1. Pictures of surveyed farmers' fields: A; B. permanent gullies, and C. a farmer field with rills in the Kivu dorsal.

Similarly to other studies in the east African highlands (e.g., Okoba & De Graaff, 2005 in Kenya; Mashi et al., 2014 in Nigeria; Rutebuka et al., 2019 in Rwanda), farmers believe that high rainfall, steep slopes and runoff are the main causes of erosion in the study area (Table 3.4). Soils play a lesser role, while less than 20% of farmers on average link erosion to their crops and cropping practices (e.g., Bitijula and Lal, 1983). With the exception of banana plants and coffee trees which have a dense rooting system (soil stabilization), offer a permanent vegetation cover (reduced surface crusting) and are therefore perceived as beneficial for soil conservation, most crops are perceived

as neutral with respect to soil erosion. Farmers explained this neutrality by the fact that other external factors such as rainfall and slope steepness are so overwhelming that most crops have little impact on erosion. Besides, farmers do not perceive that growing crops causes erosion because cropping is a necessity, engrained in their livelihoods, and there is no alternative to this practice. Similarly, most cropping practices are perceived as neutral, even though some farmers recognized practices that favour the mechanical destruction of soil (e.g., weeding), promote runoff and erosion. Regarding the neutral role of most farming practices, producers again stated that the negative impact of heavy rainfall and steep slopes is so overwhelming that the effect of farming practices becomes negligible, e.g., the positive effects of good farming practices on erosion are not perceived.

However, when analysing links between perceived erosion indicators and crop types, one can observe that the frequency for some indicators is significantly linked to crop types (banana and market gardens associated to low frequencies of several erosion indicators; coffee tree, sunflower and soybean associated to high frequencies of erosions indicators) (Table 3.7). This is consistent with the results of Rishirumuhirwa (1994) who reported lower values of the USLE C-factor for banana than for other crops such as sweet potato or maize-bean associations, as well as lower erosion rates in traditional sweet potato (114.3 t/ha) compared to 262 t/ha for maize – beans. However, the widespread occurrence of multiple crop associations restricts the

possibility of explaining the finding links or more differences cross crop types for a given erosion indicator.

Similarly, some agricultural practices or SWC measures significantly influenced perceived erosion indicators and were linked to their high or low frequency (Tables 3.13a & 3.13b). In that respect, MULCH and COMPOST appear to be most effective at reducing the erosion signs. However, the frequencies of SWC measures may be partly confounded by the fact that they may have been implemented in response to severe erosion problems and that the techniques have not (yet) had the expected effects. As reported by Rutebuka et al. (2017), despite Rwandan government support, installation of some SWC technology by farmers seemed to be only partly effective in the highlands where erosion continues to impact the entire landscape. Even so, raising awareness about the role of crops and cropping practices on soil erosion would be an important step in order to convince farmers to adapt their practices and adopt conservation measures.

3.4.2. Adopted control measures and their effect on soil erosion

Whereas beneficial cropping practices such as composting or spreading of waste are widespread but deemed ineffective for erosion control, specific soil conservation measures were often judged fairly effective by farmers, yet their adoption is rather limited, with exception of drainage ditches and agroforestry (Table 3.8). Adoption levels are substantially lower than what has been reported in other regions (Wildemeersch et al., 2013; Assefa and Rudolf, 2016). This is to some extent surprising given the widespread awareness of farmer of the

occurrence of erosion in their fields. Indeed, de Graaff et al. (2008) showed that the first step in adoption of SWC technology is the knowledge or perception of the erosion problem. This was also supported by Tenge et al. (2004) and Haghjou et al. (2014) who stated that a good perception of erosion is the most decisive factor in the adoption of SWC technologies. It thus appears that other criteria, no less important, are to be considered in the adoption process or in the continuation to adopt SWC technologies (Wildemeersch et al., 2013; Assefa and Rudolf, 2016). This was observed also in the Central Rift Valley of Ethiopia where, despite farmers' awareness of both water erosion and soil fertility decline as a problem, no significant investments in land management practices were made (Adimassu et al., 2013).

Our results show that both the perception of erosion indicators and their causes are linked to the topographic positions (Table 3.10), which confirms their strong association in the farmers' evaluation of soil erosion problems in general. The fact that farmers often did not mention crops and cropping practices as possible causes of erosion may reflect the perception that the problem is largely outside their control, given the overriding importance of rainfall and topography in the process. This is further confirmed by the fact that erosion indicators or the causes of erosion are more strongly related to abiotic factors such as topographic position (Tables 3.3 & 3.5) than to crop type and farming practices (Table 3.11)

Nevertheless, our results indicate also that much could be gained by simply raising the level of awareness regarding existing technologies since, for many technologies, the level of awareness is not vastly different from the level of adoption (Table 3.6). In addition, farmers identified a range of constraints for each of the technologies that will have to be considered when promoting them. Several of these constraints relate to farmer motivation, perception of efficiency or perception that erosion is not severe enough to justify investment in these technologies. Training farmers to better assess signs of erosion, and especially rilling, and at the same time enhancing their knowledge regarding proper ways to implement SWC technologies to enhance their effectiveness may thus help with the adoption process. Furthermore, positive relationships were observed between the adoption of some SWC techniques and perceived erosion severity (Table 3.12). This may seem counter-intuitive because one could expect adoption of SWC measures to be correlated to lower erosion severity (e.g., Adimassu et al., 2013). The above-mentioned result, however, supports the perceived seriousness of the erosion phenomena by concerned farmers and may indicate that they may be more likely to invest more in practices for water erosion control when perceived erosion is high. Unfortunately, it appears that the adoption of SWC techniques is done independently of the observed erosion indicators (Table 3.13b), which seems to indicate the need for training on the implementation of adequate techniques to combat soil erosion. Indeed, the effectiveness of a SWC practice will, in practice, depend very much on the form of erosion and how the SWC techniques are implemented

(for example too great spacing between hedges ...), or even by the approach adopted (issue of design versus environment, issue of management: at hillslope scale or watershed scale). It seems that adoption rates refer more to farmers' own initiative compared to what has been observed in many other regions (with higher reported adoption rates) where what gets often reported not an individual adoption rate, but one in a context of multiple institutional programs (e.g., Assefa and Hans-Rudolf, 2016; Rutebuka et al., 2019). This also explains the absence of dedicated measures such as bench and progressive terraces that farmers would find too costly without support.

Additional major constraints for specific SWC measures are cash and labour requirements as well as farm size and ownership. These constraints have been frequently been mentioned in other studies which addressed adoption issues of SWC technologies (e.g., Tenge *et al.*, 2004; Birhanu & Meseret, 2013; Wildemeersch *et al.*, 2013; Haghjou *et al.*, 2014). Because of the small size of most farms (about 0.3 to 0.4 ha on average (van Asten *et al.*, 2013)), farm size is seen as a constraint for technologies that compete for space with food crops (e.g., hedges and agroforestry systems). However, this does not necessarily have to be the case, as agroforestry systems and hedges, may very well contribute to household food security and income if properly designed. The fact that farm size is mentioned in relation to these technologies seems to indicate that current practices are not optimally designed. Nevertheless, the issue of farm size is likely to be exacerbated in the

future because families are large (7 to 8 children) and access to land happens essentially through inheritance, leading to further fragmentation (e.g., van Asten et al., 2013). Farmland ownership is a significant constraint for all technologies that involve long term investments such as agroforestry, hedges and, to a lesser extent, drainage ditches, as has been reported elsewhere (Tenge et al., 2004). Besides the fact that such investments require approval by the landowner, there is the additional risk that, once the land has been improved, the owner will claim the parcel for his own use (Lunze, 2000).

Adoption of dedicated SWC techniques by smallholder farmers is frequently limited by the lack of immediate returns on investment (Adimassu et al., 2017). However, in Kivu dorsal, because of the severity of the erosion process (Heri-Kazi et Biielders, 2019 *submitted*) and low inherent fertility of soils in major sites (Bitijula and Lal, 1983), this constraint may be less than in other environments. Indeed, it is expected that stopping erosion will more quickly lead to increased crop productivity, especially if fertility enhancing techniques are promoted alongside the SWC measures.

While dedicated SWC measures (e.g., drainage ditches, contour bunds, hedges), may be most effective at reducing soil erosion, the range of constraints associated with these techniques implies that their adoption will always be limited to certain categories of farmers (more motivated, owning larger farms, with external sources of income or

having access to more labour, etc...). Hence efforts should not neglect existing practices whose main purpose is often not to control erosion but which, given proper advice, may significantly contribute to erosion control (e.g., organic amendments, surface mulching, intercropping). Such technologies are already widely adopted (83% for intercropping, 79% for crop residues application, 74% for spreading of household waste (Table 3.4)). In fact, Roose (1993) among others alleged that farmer techniques could be just as effective as new technologies, provided that they are conducted efficiently. Nevertheless, reinforcing these practices also faces constraints, in particular in terms of availability of raw material for compost or mulching, or in terms of transportation for household waste. Hence, in addition to government support in implementing SWC techniques, as is the case in Rwanda (Rutebuka et al., 2019), and depending on the farmer's resources and motivation, different solutions combining conventional techniques with dedicated erosion control measures may have to be proposed to farmer, the so-called 'basket of best-bet technologies' as also proposed for soil fertility management (Giller et al., 2011).

The last finding of this study is that bench or progressive terraces were not reported or observed, even though they have been promoted by soil conservation projects in the region in the past two decades but also during the colonial period (Moeyersons, 1989). If well maintained, this technique can be very effective at controlling erosion and improving productivity (Rutebuka et al., 2019; Bizoza & de Graaff, 2012). Besides the very heavy financial and labour constraints associated to this

technique, the principal reason for their absence may be the lack of institutional support. Such institutional support is largely responsible for their widespread occurrence in neighbouring Rwanda, for instance (Bizoza, 2014).

3.5. Conclusions

This study provides the first large scale overview of farmers' perception of erosion and SWC measures in South Kivu. It demonstrates the widespread occurrence of erosion in this region, and that farmers seem well aware of the occurrence of erosion in their fields. Nevertheless, many farmers appear not to appreciate erosion to its proper extent given that the role of rilling in the erosion process is hardly recognized. Farmers similarly appear to underestimate the impact of cropping and cropping practices on erosion. As part of future extension efforts, it will therefore be essential to further raise awareness regarding erosion and the impact of human activities on soil loss.

This study also highlights that some dedicated SWC measures are currently being implemented by farmers, although adoption levels are rather low. Farmers generally consider these practices to be fairly effective, but a wide range of constraints restrict their adoption. These constraints will not be equally applicable to all farmers, such that extension efforts will have to be tailored to farmers' characteristics, including their motivation towards SWC. This may also include a wider range of technologies, such as bench terraces, grass strips or

trash lines that seem to be largely ignored by farmers of South Kivu yet have been promoted in the past and are still actively being promoted in neighbouring countries.

Thus, the findings of this study suggest that particular attention has to be given to the recognition of the roles that farmers play in the problem of soil degradation by erosion. New projects and extension services must therefore place much greater emphasis on strengthening farmers' capacity for experimentation and adaptation to new technologies. This will require institutional support, to enhance the security needed for large scale extension efforts and reduce the constraints that result from the increasing land fragmentation.

Chapter 4

Extent of soil loss by rill and gully erosion in smallholder farms in the Kivu dorsal, D.R. Congo[‡]

[‡] To be submitted as :

Heri-Kazi B.A. and C.L. Biielders, 2020. Cropland characteristics and extent of soil loss by rill and gully erosion in smallholder farms in the Kivu dorsal, Eastern D.R. Congo.

Abstract

In the Kivu dorsal in South-Kivu, eastern D.R. Congo soil erosion is a widespread phenomenon threatening the sustainability of agricultural production as is the case in other cultivated areas of the African highlands. However, quantitative estimates of soil erosion are scarce, and little research on water erosion has been carried out since colonial times. To address this deficiency, the extent of erosion and associated explanatory factors were studied in two representative watersheds across a wide range of cropping systems and soil characteristics. Rill and gully erosion volumes were measured every 2 weeks in 90 fields by the transect methods during four successive long (SA) and short (SB) rainy seasons (2015-2017). Additionally, field characteristics (crop types and cover, slope, management practices, soil physicochemical properties) and rainfall were collected. Descriptive statistics, correlation, linear mixed model, regression analysis and PCA were performed. Results show that the average soil loss rate was significantly different between seasons, with rates of 3.1 and 0.47 mm in SA/2015, 1.8 and 0.67 mm in SB/2016, 2.2 and 0.85 mm in SA/2016 and 3.2 and 0.75 mm in SB/2017 for minimum rill and gully erosion, respectively. Gully erosion but not rill erosion rates differed significantly between the two watersheds. As a result of differences both in natural factors (e.g., precipitation and slope steepness) and management conditions (cropping systems and soil cover) across farmers' fields, there was a large variability in cumulative soil erosion rates across fields, from 0.03 to 18 mm and 0.47 to 0.85 mm for minimum rill and gully erosion rates, respectively, over the 4 seasons. For 41% of fields, rill erosion rates are higher than the tolerable soil loss generally set at 12.5 t/ha/year (or 1 mm/year) for the most fertile soils. Low minimum rill erosion rates tended to be associated with high pH, sum of bases and effective CEC, while high erosion rates were associated with high topsoil depth in both watersheds. Cassava-based cropping systems tended to be associated with high rill erosion rates, while high rainfall increased both rill and gully erosion rates. Overall, the very high measured rill erosion rates suggest the need for rapid implementation of erosion control methods. The results could be used to prioritize sites at risk of water erosion in order to install mitigation measures at the scale of small watersheds.

Keywords: Cropland; eastern DR. Congo; water erosion; rill erosion; gully erosion; soil loss extent; South-Kivu, watershed.

4.1. Introduction

Soil erosion by water in cultivated areas remains a major environmental threat across the world (Walling and Webb, 1996; Panagos et al., 2015). Deforestation and natural grassland conversion to agricultural land has strongly increased the rate of soil erosion, which is aggravated by inappropriate cropping and tillage systems (Muchena et al., 2005; Nyseen et al., 2009; Hewawasam and Illangasinghe, 2015; Karamage et al., 2016). Besides the direct damage to crops, one of the most damaging consequences of soil erosion on agricultural land is its contribution to soil fertility depletion, a direct consequence of soil nutrient and organic matter losses and decrease in soil thickness. This loss of fertility is very critical for smallholder farming systems of sub-Saharan Africa (SSA) where more than 50% of the population depends on agriculture for their livelihood (van Straaten, 2002). Indeed, smallholder farmers are particularly affected by the consequences of erosion because their access to inputs is limited and insufficient to compensate for the organic matter and nutrient losses, and because they have limited capacity to invest in conservation techniques. Nutrient depletion is considered a serious threat to crop productivity and food security among smallholder farmers (Bationo et al., 2012), and the resulting net decline in per-capita food production contributes to increasing food deficits and poverty (van Straaten, 2002).

As argued by Poulton et al. (2010), it is essential for small landholder farmers in marginal areas (e.g., highlands or remote) to manage and augment their natural resource base, so as to sustain per-capita agricultural production despite growing population pressure and

climate change. To limit soil erosion and achieve sustainable production, it is recommended that suitable soil conservation practices be adopted. However, such measures must be adapted to the types and the extent of soil loss and require knowledge of the factors that directly influence erosion in each specific context (Herweg, 1996). Quantitative assessment of soil erosion rates is also useful for better targeting priority areas (Nyssen et al., 2009).

Different approaches exist to quantify soil erosion. Soil erosion modelling tools are of widespread use, but the fully empirical or semi-empirical nature of most models implies that extended calibration is required before reliable estimates can be made. This is particularly true because of the complexity of cropping systems and farm fragmentation of smallholder farms (Ansoms et al., 2008; van Asten et al., 2013). Remote-sensing is increasingly used but generally restricted to visible forms of erosion, i.e., gullies (Vrieling, 2006). Photogrammetric or structure from motion technologies also allow quantification of erosion (Di Stefano et al., 2017; Pineux et al., 2017), but monitoring of interrill or even rill erosion requires very high-resolution imagery (cm-scale) which makes application at larger scale difficult, and it suffers from interference with vegetation. Plot-scale measurements therefore remain essential sources of data regarding soil losses by erosion. Erosion plot measurements remain, however, extremely time and labour consuming. Consequently, most erosion plot studies have been carried out for controlled land use conditions and a limited range of environmental conditions, and they are therefore strong simplifications of the generally complex smallholder systems which

involve a variety of crops, often in association, and cropping practices in response to resource endowment and spatial heterogeneity. Whereas such erosion plot studies provide useful insight into factors affecting soil loss rates, they are thus seldom representative of farmer field conditions. Hence, due to the lack of appropriate field data, in many countries land use planning experts adopt recommendations based on experimental sites or erosion risk models despite that they are not always adapted to local conditions of smallholder farms (Okoba and Sterk, 2006b). However, this way of proceeding generates costs and serious errors (Lal, 1995).

Hence, there is a need for alternative approaches to assess soil erosion in situ based on easily quantifiable factors such as monitoring rill and gully erosions (e.g., Cerdan et al., 2002; Prasuhn, 2011). Such an approach, when associated with other parameters (rainfall, soil properties, topography), can help relate erosion severity with site-specific soil surface characteristics and land use practices (Di Stefano et al., 2017). Likewise, the advantages of real-life plot-scale studies are the identification of erosion hot spots, providing a means to assess the impact of specific cultivation methods or the effects of soil-crop combinations on erosion extent (Hewawasam and Illangasinghe, 2015; Di Stefano et al., 2017).

The Kivu dorsal region in the eastern Democratic Republic of Congo (DRC) offers a very favourable environment for erosion (steep slope, heavy rainfall), as in other regions of the East African highlands. Various impacts of soil erosion have been reported from limited studies, such as losses of productivity, siltation of lowlands,

contamination of Lake Kivu, etc. (Muzaliwa et al., 2014; Karamage et al., 2016), but quantitative estimates of erosion on croplands are scarce even though it threatens the sustainability of agricultural production. In fact, little research on water erosion has been carried out in this region since colonial times. Existing reports emphasize that the problem is acute although most studies are oriented towards mass movement phenomena or landslide issues (Ilunga, 1991; Moeyersons et al., 2004; Maki and Dewitte, 2014). In other studies, erosion processes are described and presented as the major causes of food insecurity among smallholder households in the Kivu region but the causes or the prevalence of erosion phenomena are not quantified (Tollens, 2004; Bisimwa et Mambo, 2009). It thus appears that the occurrence of erosion in the Kivu region is currently well recognized, but with little scientific data regarding the actual state of the phenomenon.

Therefore, the objectives of this study were threefold. Firstly, (1) to quantify the severity of soil loss by rills and gullies, the latter being characterized in smallholder farmers' fields in 2 watersheds in the South-Kivu. Secondly, (2) to evaluate the temporal variability of soil loss across farms over a period of two years and four rainy seasons, and thirdly, (3) to investigate the relationships between the severity of soil erosion and various explanatory variables related to cropping systems and field characteristics (crop types and vegetation cover, slope gradient and length, degree of roughness, soil physicochemical properties and the rainfall).

4.2. Materials and methods

4.2.1 Study area

Farmer fields were monitored in two watersheds in the Walungu (Wal2) and Kabare (Kab2) territories in the northern part of South Kivu, DRC (Figure 4.1). The two watersheds are located about 60 km southwest (Wal2 -Kadubo river) and 25 km northeast (Kab2- Mushuva river) of Bukavu, with altitudes ranging from 1508 m to 1659 m and from 1525 m to 1700 m a.s.l., respectively (Figure 1). Based on an earlier survey of 8 watersheds in 2015 (Chapter 2, this thesis), these two watersheds were selected for detailed monitoring on the basis of accessibility (including safety) and differences in soil parent material.

The soils of the two watersheds are representative of the major soil groups found in the area: orthic Cambisols and dystric or humic Nitosols derived from ancient, strongly weathered soil materials, mostly basaltic, in the Kadubo watershed; and mollic Andosols, dystric or humic Nitosols and eutric Cambisols derived from volcanic and basaltic parent materials in the Mushuva watershed (FAO, 1998). According to the soil map of the Kivu dorsal (Van Ranst et al., 2010), the most representative soils in both watersheds are soils derived from the dominance of basic rocks (gabbro, basalt, dolerite, amphiboles), with locally soils derived from magmatic or acid metamorphic rocks and micashists. In the upstream part of the Mushuva watershed (Kab2), one finds soils derived from consolidated rocks dominated by quartz and soft sandstone from the Karoo system. In the eastern part of the Kadubo watershed (Wal2), one finds soils derived from the

dominance of schist and schist-sandstone and argillites of the Karroo system (Chapter 1; Figure 1.4).

The area experiences a tropical highland climate with a bi-modal rainfall distribution resulting in two wet seasons: a long rainy season from September till January (referred to as 'season A', or SA) and a short rainy season from February till May (referred to as 'season B', or SB). As a result, there are two main cropping seasons per year. The 10-year average annual rainfall recorded in this area varies between 1300 and 1600 mm (IPAPEL, 2010). The monitoring period extended over nearly 2 years (October 2015 – May 2017) encompassing 2 long (SA) and 2 short (SB) rainy seasons.

In each watershed, 45 farmers were selected from 5 to 8 different villages (Figure 4.1). Village and farmer selection were in part guided by accessibility and safety criteria. In addition, the main field of each farmer had to be located on the hillslope, which is where most rainfed cropping occurs (Heri-Kazi and Bielders, submitted). Although farmers often cultivate more than one field, only the main field of each household was monitored.

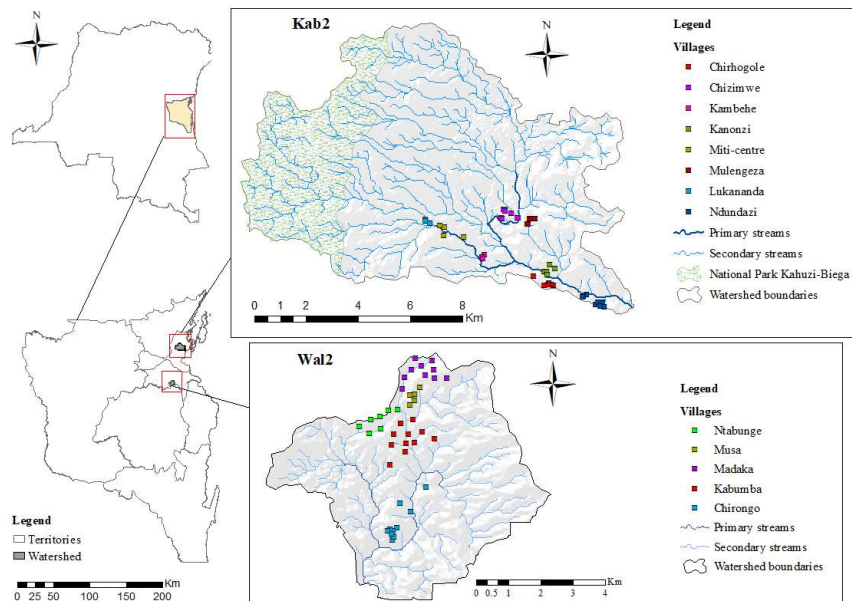


Figure 4.1. Location of the 45 monitored fields in each of the two watersheds in two territories (Kabare and Walungu) of the Kivu dorsal. Northern South Kivu (Eastern D.R. Congo).

4.2.2. Data collection and processing

The overall methodology relies on the quantification of soil loss by soil erosion (rills and gullies) in combination with observations regarding field and cropland characteristics as erosion explanatory factors. Rills and gullies are usually distinguished on the basis of their cross section, with cross sections smaller or greater than 900 cm² for rills and gullies, respectively (Ledermann et al., 2008). In this study, we distinguished between permanent channels (gullies) and ephemeral channels that are easily erased by tillage, weeding operations, or trampling (rills) (Photo 4.1). Permanent channels reflect the overall sensitivity of the watershed (rain, soil, land use on the slope...). They are a global indicator of degradation, perhaps more reliable than temporary forms of erosion (Valentin et al., 2005). On the contrary, temporary channels are very

dependent on the conjunction between a rainfall event and land conditions, and thus may not be observed each year on the same plot.

Prior to field data collection, a sketch of the main plot was made. In particular, the main plot was divided into subplots based on homogeneous land use (e.g., banana subplot, maize-bean-cassava intercropping subplot, etc.). The gully network and areas affected by rills were located on the sketch.



Photo 4.1. Examples of (a) a permanent channel (gully) and (b) ephemeral channels (rills) in a given plot on the monitored farmers' fields

- Monitoring gullies

Gullies (permanent channels) were assessed twice per season, at the beginning and at the end of each season. For each gully, the top and bottom widths and the depth of the gully were measured at regular intervals (at most 10 m). Based on the hypothesis of a trapezoidal cross section, the gully volume in between two cross sections was calculated. The overall volume of a gully was then estimated by summing the volumes of all the subsections. Seasonal gully erosion rate (GE [mm]) for each field was then calculated as follows (Eq. 1):

$$GE_{i,j} = \frac{Ve_{i,j} - Vs_{i,j}}{A_i} \cdot 1000 \quad (\text{Eq. 1})$$

Where i stand for the field and j stand for the season, V_s and V_e represent the gully volume [m^3] at the start and end of each season, respectively, and A is the total field area [m^2]. Gully density [m/m^2] was calculated by dividing the total gully length by the area of the farmer's field. In addition, the percentage area of the whole field affected by gulling was also calculated.

- Monitoring rills

Rill development was monitored 6 times (approx. every fortnight) during each of the 4 seasons. Because of the high areal density of rills, the transect method was used to characterize the extent of rills (Govers and Poesen, 1988). First, the area affected by rill incisions was delimited by sticks. Then parallel equidistant transects were marked with ropes. The transects were perpendicular to the main slope and had an equidistance of at most 5 m with a minimum of 5 transects per rill-affected area (including the upper and lower limits of the affected area). Along each transect, the depth as well as the top and bottom widths of each rill was measured (e.g., Di Stefano et al., 2017). In addition, the angle between the rill and the transect was recorded in three classes: 0-30°, 30-60° and 60-90°. Given the steep slopes in the study area, the 60-90° case was rarely observed.

Rill volume was calculated on the basis of the rill cross section, distance separating two transects and the angle between rill and transect. Rill erosion rate was then calculated at two scales: the 'damage area', corresponding to the area affected by rilling, and the whole field area. Rill erosion rate [mm] was calculated for each damage area by dividing the total rill volume [m^3] by the area affected by rilling [m^2] and

multiplying by 1000. Whole field rill erosion rate [mm] was calculated by summing the volume of rills [m³] from all damage areas in a given field and dividing by the whole field area [m²]. Rill density was expressed as the number of rills per unit length of transect. In addition, the percentage area of the whole field affected by rilling was also calculated.

In order to calculate the cumulative amount of rill erosion (RE [mm]) for each rainy season, it was first assumed that no rills are present at the start of each rainy season. Indeed, manual tillage is performed systematically before planting of annual crops, which would erase all rills. Because rills may fill-in in between two observations as a result of tillage, weeding, trampling or trapping of splashed material, and because the exact location of each rill was not recorded, it was not possible to track the evolution of each rill. Consequently, rill erosion volumes could increase or decrease from one date to the next (Figure 4.2, dashed line). Cumulative erosion rates were thus estimated in two ways. A maximum rill erosion rate (RE_{-max} [mm]) for a given season was calculated by adding the rill erosion rates of each observation date (Figure 4.2, red line; (Eq. 2)).

$$RE_{-ma} = \sum_{t=1}^n RE_t \quad (\text{Eq. 2})$$

Where RE_t [mm] refers to the rill erosion rate on observation date t, and n is the number of observation dates (n = 6). The underlying assumption is that all rills observed on a given observation date are new rills, i.e., rills were systematically erased in between two observation dates. Because this is likely to overestimate the true rill

erosion rate, a minimum rill erosion rate ($RE_{\min}$ [mm]) was also calculated by adding the rill erosion rates of each observation date but only if the erosion rate at time t is greater than the erosion rate at time $t-1$ (Figure 3, orange line; (Eq. 3)).

$$RE_{\min} = \sum_{t=1}^n RE_t \mid RE_t > RE_{t-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

Indeed, if $RE_t > RE_{t-1}$, then additional erosion must have occurred within the $(t-1, t)$ time interval. This erosion rate is likely to underestimate the true rill erosion rate.

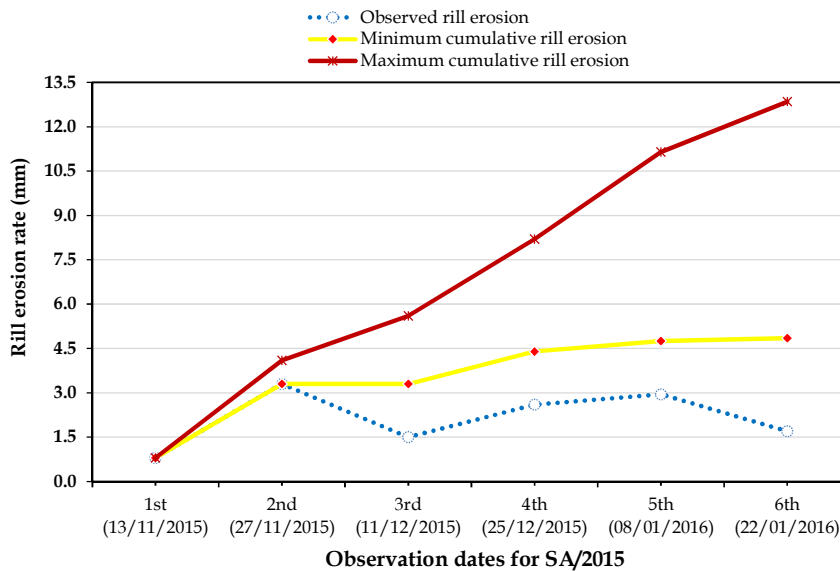


Figure 4.2. Example of rill erosion rate data and calculated cumulative erosion rates. Dashed blue line: biweekly observed rill erosion rate in a given farmer field. Yellow and red line: cumulative minimum and maximum rill erosion rates, respectively. The real soil loss of the field lies in between these two lines. See text for explanation.

- Additional field measurements

For each field, slope length, gradient and shape (convex, concave, linear, depression-concave and irregular-convex/concave; Herweg,

1996) were determined on site. Surface roughness and depth of topsoil were characterized in each rill-affected zone of the surveyed field based on the ACED method (Herweg, 1996).

Four classes of soil surface roughness were considered based on the presence and state of aggregates. This was done according to their visual aspects by referring to images describing the features of each form (sharp edges and coarse aggregate surface for 'very rough', edges slightly rounded for 'rough', edges considerably rounded for 'medium', and no edges, round aggregates surface for 'fine/smooth'), as proposed by Herweg (1996). Surface roughness was characterized on each visit.

Three soil textural classes were defined. Moist soil samples were used to form thin cylinders. For the clay loam texture, the thin cylinder could be bent into a U-shape. For the light clay texture, the cylinder could be bent to form a circle that shows cracks and for the heavy clay, the U-shaped cylinder could be bent to form a circle without showing cracks.

Topsoil depth was determined using an auger and a ruler on each visit. In addition, at the beginning of the 2015 rainy season, one composite soil sample (0-0.3 m depth) was taken using at least 5 randomly selected points from the entire field. Each sample was analysed for soil pH in water (soil water ratio of 1:2.5), total organic carbon (Walkley and Black) and nitrogen (Kjeldahl), available potassium (K) (modified Olsen extractant), exchangeable Ca and Mg (by spectrophotometer method, using filtered extracts diluted by deionized water and

Lanthanum solution), exchangeable acidity (Al and H) by titration using 1 N KCl and 0.01 N NaOH extracts of soil, based on the International Center for Agroforestry Research (ICRAF, 1999). Particle-size analysis was done by the hydrometer method using Na-Hexametaphosphate ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) and distilled water (Bouyoucos, 1962). All laboratory analyses were carried out at the International Institute for Tropical Agriculture (IITA, Kalambo, D.R. Congo). The undrained shear strength (Su) of the soil was measured on a previously wetted surface, on each visit, with a Torvane Shear Device using the standard vane (1 kgf/cm²) to determine the magnitude of the shear stress that a soil can withstand.

Thirty-minute rainfall data were obtained from two existing rainfall gauges operated by BANRO Congo Mining located in Kadubo village for the Wal2 watershed, and by the Natural Science Research Center (CRSN), located in Lwiro village, for the Kab2 watershed.

The type of crops and percentage soil cover by vegetation were quantified at 2-week intervals. First, the farmer's field was divided into sub-plot (if applicable) based on differences in crops or crop associations. The relative proportion of each crop type in terms of percentage cover in the sub-plot was determined, which was used to define the dominant cropping systems. In addition, the total vegetation cover of the entire plot or by subplots if applicable was quantified on three 5 m x 5 m quadrats randomly located in the plot.

4.2.2 Statistical analysis

Statistical analyses included descriptive statistics, correlation, simple and multiple linear mixed model regression. Prior to the analysis,

erosion data were checked for normal distribution using the Anderson-Darling test. All seasonal erosion data were root square transformed before the analysis of variance because of non-normality. Pearson's correlation was used to characterize the relationships among soil parameters on the one hand, and land use parameter on the other hand.

An analysis of variance (ANOVA) over the 4 seasons was performed using a linear mixed model (LMM). Fixed effects entered in the analysis included watershed and season, and the farm was included as random effect. Mean separations were performed using the least significant difference (LSD)/Fisher's test at an error probability $p < 0.05$.

In case of significant correlations between the erosion rates (rill and gully) and a given explanatory variable, scatter charts were used to show the trend of the relationships.

Principal component analysis (PCA) was performed to strengthen the analysis of the information summarized by the groups of variables having significant correlations with the minimum rill erosion rate. For this purpose, rill erosion rate data for damaged area and rill erosion rate at whole field scale were used for the two watersheds. All analyses were done with XLSTAT Version 2016.02.

4.3. Results

4.3.1. General characteristics of monitored farmer fields

The monitored fields had an average field size of 0.18 ha (range: 0.04 to 0.96 ha) in Wal2 and 0.17 ha (range: 0.04 to 0.54 ha) in the Kab2 watersheds (Table 4.1). The total mean farm size for the South Kivu is about 0.3 to 0.4 ha (van Asten et al., 2013), knowing that each farm generally has more than one field. Convex, concave and linear slopes dominated in the two watersheds, but concave and linear slopes were more frequent in Wal2 whereas linear slopes were more frequent in Kab2. Clay loam (71%) and light clay (28%) soils dominated in Wal2, whereas light (62%) and heavy (22%) clay soils dominated in Kab2. Medium soil roughness dominated in Wal2 (78%), while in Kab2 roughness was mostly medium (45%) and fine-smooth (35%). The hillside topographic position dominated in the two watersheds, but the downslope position was significantly more present in Kab2 (20%) compared to Wal2 (7%). Average slope gradients were significantly lower in Wal2 (20%) than in Kab2 (30%), whereas field slope lengths were significantly different yet similar (49-57 m). Topsoil depth was on average 26 and 23 cm in Wal2 and Kab2, respectively. The values of the undrained shear strength were comparable in the two watersheds (1.1-1.2 kg/m²).

Table 4.1. Frequency distributions for biophysics farmers' field characteristics in the monitored watersheds of the Kivu dorsal in western South Kivu (n=90, SD=standard deviation).

Field characteristics	Wal2 (n=45) Mean $\pm$ SD or Percentage	Kab2 (n=45) Mean $\pm$ SD or Percentage	Sign diff. P < 0.05
Average altitude (m a.s.l.)	1599 $\pm$ 59	1601 $\pm$ 53	
Plot superficies (ha)	0.18 $\pm$ 0.17	0.17 $\pm$ 0.10	
Slope shape (%)			
Convex	8.9	22.2	*
Concave	46.7	24.4	*
Linear	37.8	48.9	
Depression	2.2	0	
Irregular	4.4	4.4	
Textural class (%)			
Clay loam	71.1	15.6	*
Light clay	26.7	62.2	*
Heavy clay	2.2	22.2	*
Soil surface roughness (%)			
Medium	78.3	45.00	*
Rough	2.2	19.4	*
Fine-smooth	19.4	35.6	*
Topographic position			
Downslope	6.7	20.0	*
Hillside	80.0	73.3	
Plateau	13.3	6.7	
Other field parameters			
Slope gradient (%)	19.8 $\pm$ 2.9	29.5 $\pm$ 3.7	*
Slope length (m)	48.9 $\pm$ 21.1	56.5 $\pm$ 26.3	
Topsoil depth (cm)	26.2 $\pm$ 5.4	23.5 $\pm$ 5.2	
Undrained shear [kg.cm ⁻²]	1.2 $\pm$ 0.5	1.1 $\pm$ 0.4	

Soils were generally acidic, with 2.4% SOC content on average (Table 4.2). SOC tended to be higher in Wal2. Both in terms of texture and SOC content, soils were more variable in Wal2 than Kab2. ECEC was significantly higher in Kab2 compared to Wal2. Soil clay content and sum of clay+ silt contents were significantly higher in Kab2, while soil sand content was significantly higher in Wal2.

In the majority of the monitored fields within the two watersheds, no erosion control measures were present. Nevertheless, erosion control measures were observed in approximately 16 to 20% of fields, made of progressive terraces and hedges (living and dead). However, their effectiveness was noticeably low. The major causes of their dysfunction were the lack of maintenance, bad installation and the high spacing between hedge lines.

Table 4.2. Statistical comparison (Student *t*-test) for soil sample analyses in the Wal2 and Kab2 watersheds, *n*=90 (*t*-test prob.= Student test probability)

Soil characteristics	Wal2			Kab2			<i>t</i> -test prob.
	Min	Max	Mean $\pm$ SD	Min	Max	Mean $\pm$ SD	
pH (H ₂ O)	4.4	6.4	5.1 $\pm$ 0.5	4.4	6.6	5.3 $\pm$ 0.6	0.701
SOC [%]	1.2	5.3	2.7 $\pm$ 1.0	0.8	3.0	2.1 $\pm$ 0.5	0.074
Bases [cmol ⁺ .kg ⁻¹]	2.2	12.5	5.2 $\pm$ 2.3	2.4	13.4	6.7 $\pm$ 2.9	0.159
ECEC [cmol ⁺ .kg ⁻¹]	4.2	12.5	6.5 $\pm$ 1.6	5.1	13.4	7.8 $\pm$ 2.0	0.029
Sand [%]	13.3	62.5	36.6 $\pm$ 12.4	10.4	42.5	20.3 $\pm$ 5.5	< 0.0001
Clay [%]	11.6	71.4	44.5 $\pm$ 13.4	41.5	72.1	59.4 $\pm$ 6.3	< 0.0001
Silt [%]	9.3	36.0	18.9 $\pm$ 6.4	12.0	29.9	20.2 $\pm$ 4.6	0.471
Sum clay + silt [%]	37.5	86.7	63.4 $\pm$ 12.4	57.5	89.6	79.7 $\pm$ 5.5	< 0.0001

A large proportion of monitored fields were affected by erosion generated in upslope fields, but more within Wal2 (82%) than in Kab2 (67%). Similarly, erosion in the monitored fields regularly extended into downslope fields, but this was noticeably and significantly higher in Kab2 (91%) compared to Wal2 (36%) (Table 4.3).

Table 4.3. Prevalence of erosion and soil and water control measures (SWC) within the selected household's fields in the monitored watersheds of the Kivu dorsal in western South Kivu (n=90, SD=standard deviation).

Characteristics	Wal2 (n=45) %	Kab2 (n=45) %	Sign diff. P < 0.05
<i>Presence of SEC</i>			
Yes	20.0	15.6	
No	80.0	84.4	
<i>Adopted types of SWC</i>			
Structural + biological measures	0.0	4.4	
Structural measures only	6.7	0.0	
Biological measures only	13.3	11.1	
<i>Adopted agron./biological SWC</i>			
Grass strips	11.1	8.9	
Agroforestry	4.4	0.0	
Hilling/ridging	8.9	15.6	
<i>Effectiveness of SWC measures</i>			
Low (1)	77.8	85.7	
Moderate (2)	11.1	14.3	
High (3)	11.1	0.0	
Very high (4)	0.0	0.0	
<i>Cause of dysfunction</i>			
No maintenance of structural measures	22.2	42.9	*
High spacing between hedge lines	11.1	0.0	
Bad installation of structural measures	22.2	42.9	*
No idea	44.4	14.3	*
<i>Erosion from upslope fields affects monitored fields</i>			
Yes	82.2	66.7	
No	17.8	33.3	
<i>Erosion from monitored fields affects downslope fields</i>			
Yes	35.6	91.1	*
No	64.4	8.9	

There was a greater diversity of crops in Kab2 compared to Wal2 (Table 4.4). Nevertheless, seven crops (beans, cassava, maize, sweet potato, taro, yam and banana) dominated land use in both watersheds. Beans, maize, banana and taro tended to be more common in Kab2, whereas cassava and sweet potatoes were more common in Wal2.

Table 4.4. Proportions of planted crops on the monitored farmer fields during the four rainy seasons (2015-2017), grouped by watershed (n=45).

Planted crop	Wal2				Kab2			
	SA2015	SB2016	SA2016	SB2017	SA2015	SB2016	SA2016	SB2017
Bean	53.3	35.6	33.3	0.0	84.4	82.2	57.8	20.0
Banana	31.1	24.4	26.7	44.4	44.4	40.0	42.2	48.9
Maize	35.6	24.4	17.8	8.9	80.0	75.6	51.1	11.1
Cassava	88.9	93.3	91.1	88.9	86.7	75.6	80.0	86.7
Sweet potato	84.4	73.3	57.8	77.8	20.0	20.0	33.3	33.3
Taro	53.3	51.1	51.1	66.7	51.1	71.1	68.9	80.0
Yam	20.0	40.0	28.9	44.4	28.9	42.2	24.4	42.2
Soy	6.7	2.2	4.4	2.2	11.1	8.9	0.0	0.0
Sunflower	0.0	0.0	0.0	2.2	17.8	4.4	6.7	4.4
Potato	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	35.6	2.2	2.2
Groundnut	0.0	0.0	4.4	4.4	2.2	2.2	0.0	0.0
Coffee	0.0	2.2	4.4	2.2	13.3	4.4	13.3	8.9
Pumpkin	0.0	0.0	0.0	11.1	13.3	13.3	0.0	15.6
Sorghum	0.0	0.0	0.0	8.9	4.4	0.0	2.2	17.8
Fallow	4.4	4.4	2.2	4.4	0.0	4.4	2.2	2.2
Other	13.3	22.2	24.4	33.3	0.0	13.3	2.2	15.6

Note: The total percentage for each season is more than 100 as number of crops vary in a given farmer's field and between seasons.

A farmer's field was composed of 2 plots on average, each being characterized by a homogeneous land cover/cropping system (CS) generally composed of a mixture of crops. Six land use/cropping system classes were defined by agglomerative hierarchical clustering (AHC) based on the percentage cover of the planted crops in each plot (Table 4.5). CS 1, 3, 4 are intercropping systems based on a dominant staple: beans, cassava, or sweet potato, respectively. CS2 is a mixture of various crops, with no dominant species. CS5 is dominated by

banana or taro, whereas CS6 corresponds to fallow. In Wal2, CS3 dominated, with lesser contributions of CS1 and CS2. In Kab2, CS1 and CS2 dominated the first year whereas CS3 dominated the second year. The other cropping systems generally make for less than 5-7% of the plots each (Table 4.5b).

Table 4.5a. Land use/cropping system definition based on vegetation cover percentage in each plot.

Cropping system (CS)	Grouping criteria for a given cropping system with hierarchical ascendant classification (HAC), based on the cover rate (%) of each crop identified on the plot.
CS 1	Intercropping of Bean (>60%); maize; cassava with sweet potato and other (<10 - 40%)
CS 2	Intercropping of many crops with a cover between (1 to <50%) with bean; cassava (1- 50%); maize (20-45%) and with sweet potato and other (<40%)
CS 3	Intercropping dominated by cassava (>50%) with other crops (bean, maize, sweet potato with a cover of 5 to <30%)
CS 4	Intercropping dominated by sweet potato (>60%) with bean (<20%) and taro (<10%)
CS 5	Cropping system with banana (100%) or taro (60-100%)
CS 6	Cropping system integrated fallow (50-100%)

Table 4.6b. Proportion (%) of plots per type of land use/cropping system in the two watersheds for the four monitored seasons (2015-2017).

Land use /season	Wal2 (n=226)				Kab2 (n=214)			
	SA2015	SB2016	SA2016	SB2017	SA2015	SB2016	SA2016	SB2017
CS 1	33.3	17.0	17.2	0.0	29.6	34.6	10.9	3.8
CS 2	14.0	9.4	12.1	19.0	46.3	30.8	20.0	15.1
CS 3	42.1	64.2	60.3	72.4	16.7	15.4	56.4	67.9
CS 4	5.3	3.8	6.9	3.4	3.7	5.8	7.3	1.9
CS 5	1.8	1.9	1.7	0.0	3.7	3.8	3.6	5.7
CS 6	3.5	3.8	1.7	5.2	0.0	9.6	1.8	5.7

Note: one farmer's field may comprise several plots with different land use/cropping systems

Overall, rainfall during the monitoring period was 35% higher in Kab2 compared to Wal2 (Figure 4.3, Annex Table A.6). In both watersheds, total rainfall was 40 to 60% higher during the 2015-2016 period than during the 2016-2017 period. In Kab2, total rainfall per period was fairly constant across periods (475-569 mm). In Wal2, however, rainfall varied greatly from one monitoring period to another (264-604 mm). Highest daily rainfall was of the order of 50 mm in Wal2 and 70 mm in Kab2.

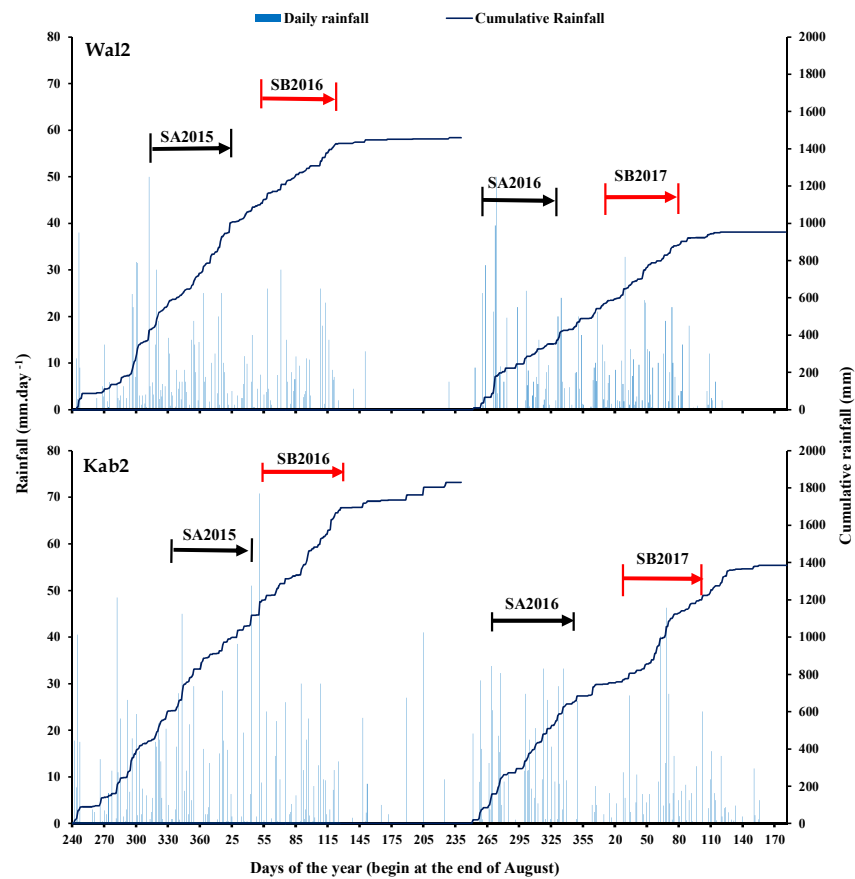


Figure 4.3. Rainfall distribution for the four monitored rainy seasons (2015-2017) in the two watersheds (Wal2 and Kab2): cumulative year rainfall and daily rainfall distribution. The arrows mark the erosion monitoring periods in the two watersheds. SA = long rainy season, SB = short rainy season.

4.3.2. Extent of soil erosion rates in the two watersheds

On average, 88% and 85% of monitored fields were affected by rilling in Wal2 and Kab2, respectively (Figure 4.4a) in a given season. However, all fields were affected by rilling in at least one season. 31 and 24% of monitored fields were affected by gully erosion in Wal2 and Kab2, respectively. In Wal2, rilling affected on average 52% of the whole field area, while in Kab2 this was close to 63%. Gully erosion affected 1.5 to 1.9% of the area on average in Wal2 and Kab2, respectively (Figure 4.4b).

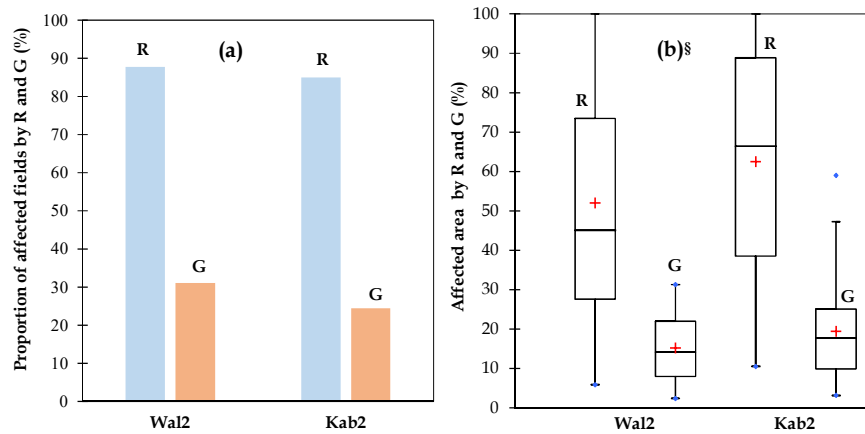


Figure 4.4. (a) Proportions of fields affected by rills or gullies and (b) fraction of whole field affected by rill and gully erosions, plotted by watershed Wal2 and Kab2. (R=Rill and G=Gully).
§The area affected by gullies has been multiplied by 10 to be better projected on the same graph.

Rill widths and depths were comparable across seasons and watersheds, with average depths of 2.9 and 4 cm in Wal2 and Kab2, respectively, and average widths of 13.2 and 12.1 cm (Figure 4.5a). Average rill densities were 0.18 and 0.23 rills/m in Wal2 and Kab2, respectively, but there was much greater inter-seasonal variability at Wal2 compared to Kab2. Overall, rill density showed much greater variability than rill width and depth.

Gully widths and depths were also comparable across seasons and watersheds, with average depths of 12.5 and 15.5 cm in Wal2 and Kab2, respectively, and average top widths of 54 and 50 cm. Gully densities were on average 1.4 times higher in Kab2 (0.031 m/m²) compared to Wal2 (0.022 m/m²), with little inter-seasonal variability (Figure 4.5b).

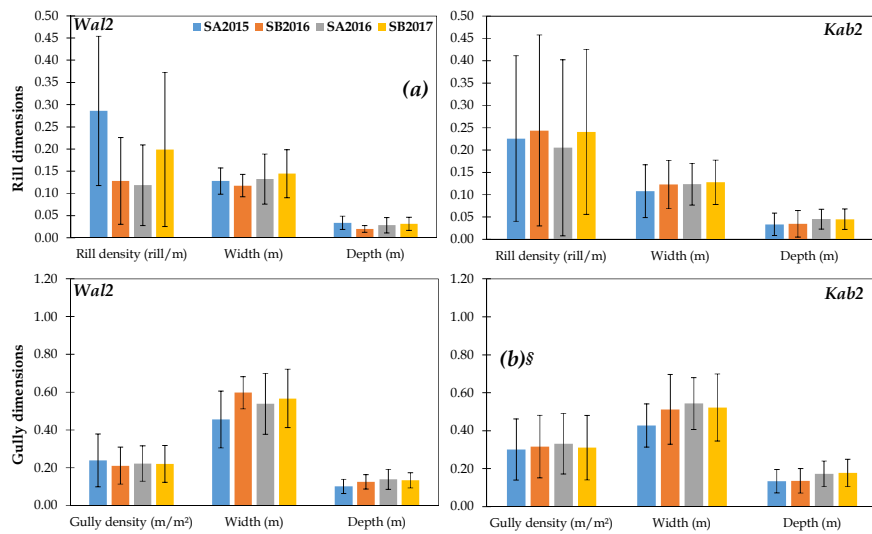


Figure 4.5. (a) Average rill characteristics (rill density, width and depth) and (b) gully characteristics (density, top width and depth) grouped by season and watershed. Bars denote standard deviation (SD). SA: the long rainy season; SB: the short rainy season. Rill widths are average of top and bottom widths. § Gully density data have been multiplied by 10 to be better projected in this figure.

Minimum seasonal rill erosion rates in rill-affected plots varied widely across fields, watersheds and seasons, from 0 up to nearly 18 mm (Figure 4.6a). Maximum rates reached almost 34 mm in some fields (Figure 4.6b). On average across all seasons, minimum rill erosion rates in rill-affected plots was 2.1 and 2.4 mm in Wal2 and Kab2, respectively, while maximum erosion rates were 4.9 and 5.7 mm. Since

only a portion of farmers' fields were affected by rilling, mean seasonal minimum rill erosion rates at whole field scale were 1.2 and 1.4 mm at Wal2 and Kab2, respectively (Figure 4.6c). For gully erosion, seasonal field-scale erosion rates are respectively 0.5 and 0.9 mm on average at Wal2 and Kab2.

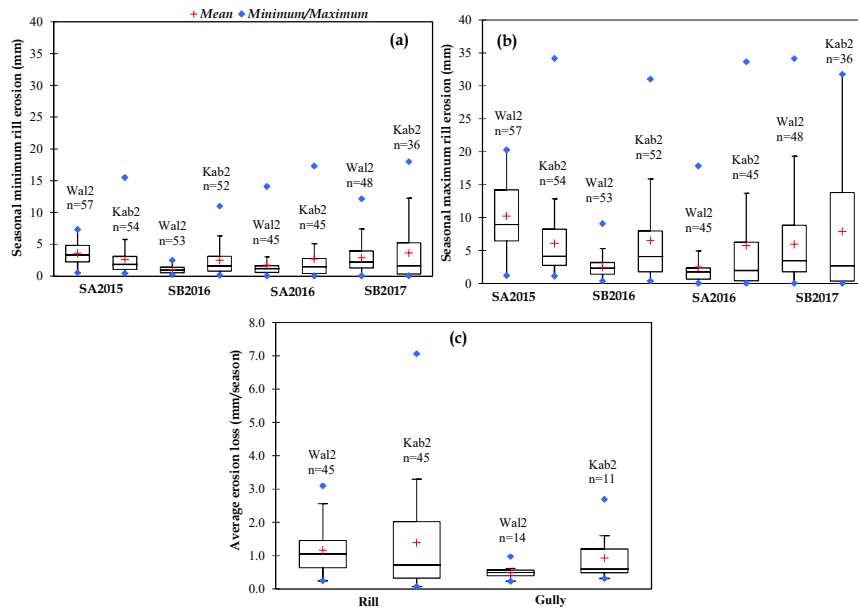


Figure 4.6. (a) Minimum and (b) maximum rill erosion rates of the rill-affected subplots ('damage areas': n= variable in each season), plotted by season and watershed (SA: the long rainy season; SB: the short rainy season). (c) "Whole field" minimum rill erosion rate and gully erosion rate averaged over the 4 seasons by watershed (Wal2 and Kab2).

Results of the LMM analysis over all 90 monitored farmers' fields revealed no watershed effect but a significant effect of seasons as well as a significant season x watershed interaction for the minimum and the maximum rill erosion rates in damage areas (Table 4.7). This interaction reflects the fact that rill erosion rates were fairly stable across seasons at Kab2 whereas at Wal2 much higher inter-seasonal

variability was observed, with highest values in SA2015 and lowest in SA2016. This in turn largely results from the rainfall distribution, which was rather similar across the 4 seasons at Kab2 but varied widely from one season to another at Wal2. As a matter of fact, one observes a tendency for rill erosion rates to increase with seasonal rainfall at Wal2 (Figure 4.7). This trend is not observed at Kab2 where differences in rainfall across seasons were also much smaller.

There was a seasonal and watershed effect on gully erosion rates. At Kab2 average gully erosion rate was roughly twice that of the average rate of Wal2 each season (0.66 to 1.12 mm and 0.32 to 0.64 mm, respectively) (Annex Table A.7). The average gully erosion rate in SA2016 was highest (0.85 mm) and significantly higher than SA2015 in which it was lowest (0.47 mm) in both watersheds (Annex Table A7).

Table 4.7. Summary of the results of the linear mixed-model analysis for minimum and maximum rill erosions and, gully erosion rates using square root transformed data for the two watersheds all over the four monitored seasons (2015-2017).

Effects	Rill erosion				Gully erosion	
	Minimum		Maximum		F	Pr. > F
	F	Pr. > F	F	Pr. > F		
Watersheds	0.54	0.46	0.56	0.46	6.59	0.01
Season	18.53	< 0.0001	37.91	< 0.0001	3.43	0.03
Watersheds*Season	8.39	< 0.0001	13.46	< 0.0001	0.12	0.95

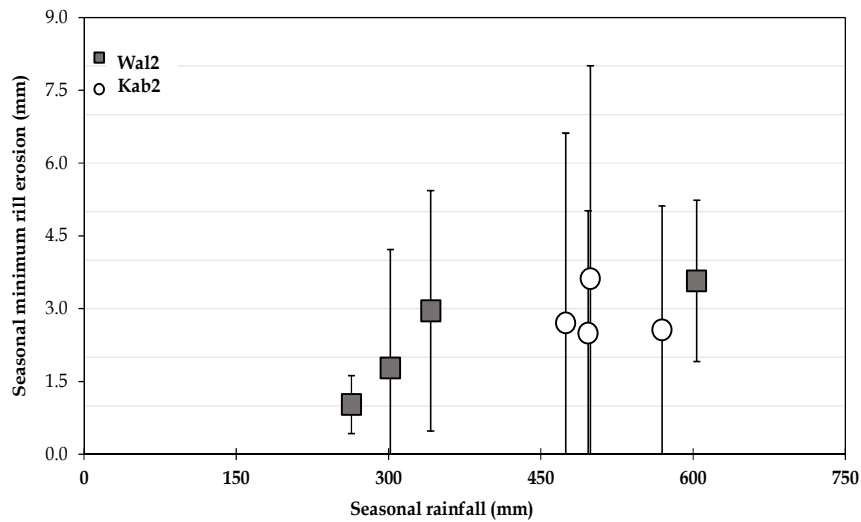


Figure 4.7. Average seasonal rill erosion rate (mm) as a function of seasonal rainfall (mm) for the two watersheds (Wal2 and Kab2).

4.3.3. Effects of measured factors on rill and gully erosion

Correlation analysis for both watersheds combined showed minimum rill loss rate (RE-min) to be positively correlated with topsoil depth ($p < 0.0001$; Fig. 4.8), soil sand content ($p = 0.0003$; Fig. 4.8), but negatively correlated with soil pH (Fig. 4.8), sum of bases, ECEC, vegetation cover ($p < 0.0001$; Fig. 4.8), soil clay content ($p = 0.01$) and clay + silt content ($p = 0.0003$) (Table 4.8). In addition, no significant correlation was detected between RE-min and SOC content, while it was positively correlated with gully erosion rate (GE). Likewise, gully erosion rate was negatively correlated with SOC ($p = 0.02$), sum of bases ($p = 0.01$), ECEC ($p = 0.05$) and soil silt content ($p = 0.04$) and positively correlated to topsoil depth ($p = 0.03$) (Fig. 4.9).

Table 4.8. Spearman correlation coefficients among soil properties and rill and gully erosion rates for the two watersheds

Variables	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
1. pH (H ₂ O)	1														
2. SOC	-0.08	1													
3. SB	0.90	-0.12	1												
4. ECEC	0.65	-0.18	0.86	1											
5. SAND	-0.15	0.55	-0.27	-0.40	1										
6. CLAY	-0.02	-0.52	0.05	0.22	-0.84	1									
7. SILT	0.41	-0.10	0.50	0.38	-0.28	-0.22	1								
8. CLAY+ SILT	0.15	-0.55	0.27	0.40	-1.00	0.84	0.28	1							
9. SU	-0.05	0.05	-0.10	-0.16	0.26	-0.18	-0.13	-0.26	1						
10. SG	-0.15	-0.31	-0.06	0.07	-0.56	0.47	0.09	0.56	-0.22	1					
11. SL	-0.07	0.01	-0.08	-0.02	-0.08	0.10	-0.02	0.08	0.03	0.03	1				
12. Cover	0.19	0.13	0.20	0.22	-0.14	0.14	0.08	0.14	0.05	0.02	0.19	1			
13. TD	-0.36	0.28	-0.38	-0.29	0.36	-0.24	-0.19	-0.36	-0.01	-0.22	0.00	0.07	1		
14. RE-min.	-0.56	0.10	-0.59	-0.49	0.37	-0.28	-0.19	-0.37	-0.02	0.01	0.14	-0.35	0.42	1	
15. GE	-0.21	-0.24	-0.28	-0.21	0.00	0.11	-0.21	0.00	0.01	-0.06	0.04	-0.08	0.23	0.30	1

Notes: Values in bold are different from 0 with a significance level $\alpha=0.05$; pH (H₂O): pH water; SB: sum of base; ECEC: effective cationic exchange capacity; SAND: soil sand content; CLAY: soil clay content; SILT: soil silt content; CLA+SIL: Sum of clay and silt contents; SU: Undrained shear strength, SG: slope gradient; SL: slope length, Cover: soil cover; TD: topsoil depth; RE-min.: minimum rill loss rate; GUL: gully loss rate.

A correlation analysis for each of the watersheds is presented in Annex Table A.8. However, some of the statistically significant correlations obtained appear counterintuitive, such as the positive relationship between minimum rill erosion rates or gully erosion rates and SOC content (Annex Table A.8).

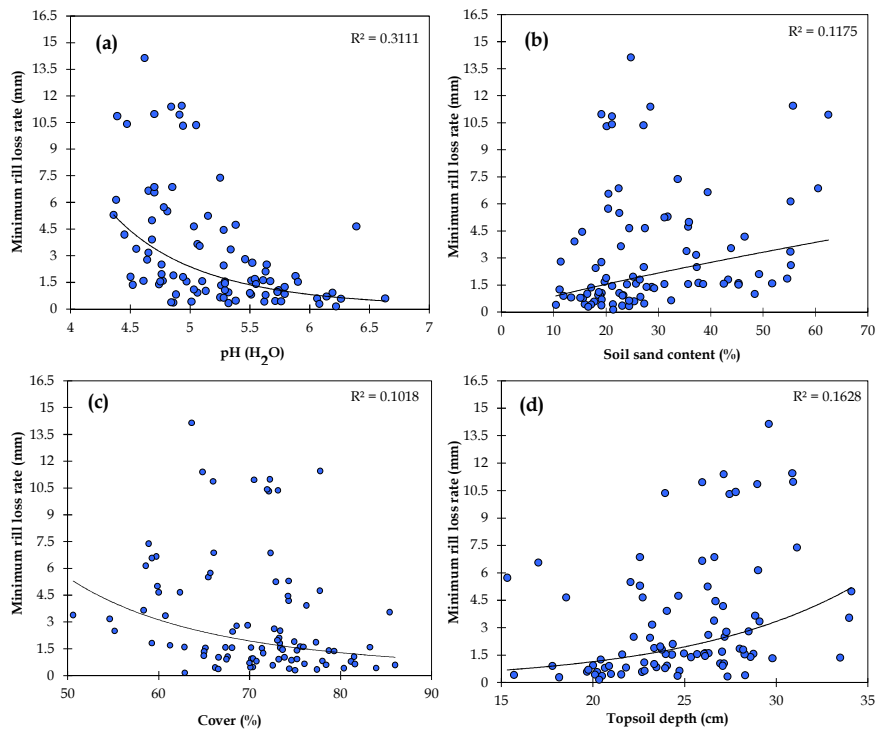


Figure 4.8. Scatter plots of minimum rill erosion rate (mm) compared to (a) the soil pH (water); (b) the soil sand content (%), (c) the plant cover rate (%) and (d) the topsoil depth for both watersheds.

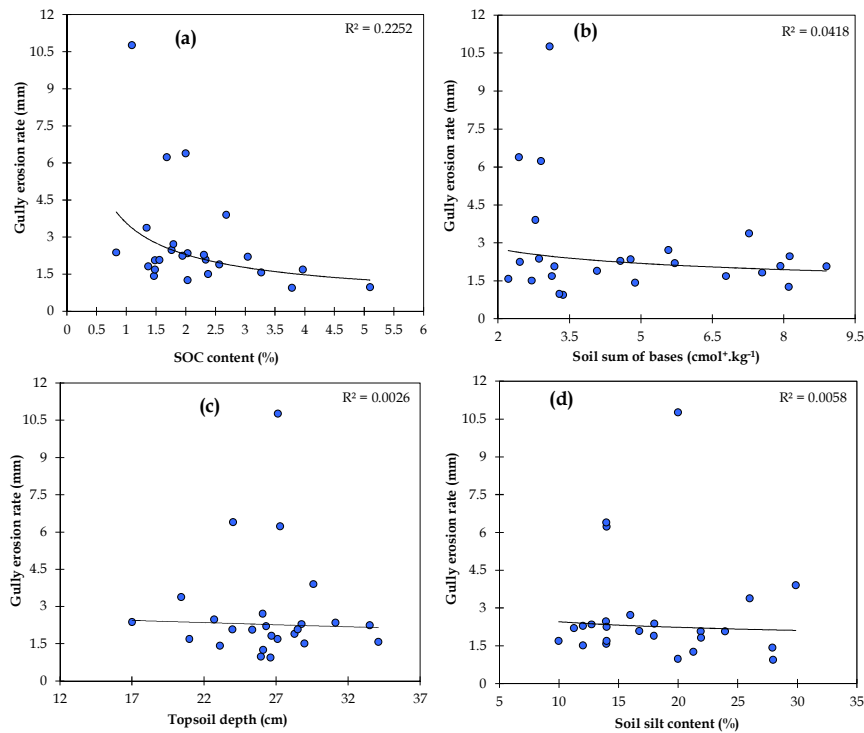


Figure 4.9. Scatter plots of average gully erosion rate (mm) compared to many variables: (a) the soil SOC content (%); (b) the sum of bases content ($\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$), (c) topsoil depth (cm) and (d) the soil silt content (%) for both watersheds.

To better analyse the profile of these relationships for both watersheds, a PCA analysis was performed (Figure 4.8). CLAY+SILT was excluded in this analysis because it was highly correlated to SAND ($r = 1$). The first two axes of the PCA explain 47.8% of the total variance. Four groups of variables can be observed. A group which includes pH, SB, ECEC, SILT and to a lesser extent Cover rate, and which is opposed to a group that includes rill and gully erosion rates, and topsoil depth and slope length. A third group includes CLAY and slope gradient SG, and is opposed to a group that includes SOC, SAND and undrained shear

strength SU. Separate PCA analyses for each watershed are provided in Annex Figure A.2.

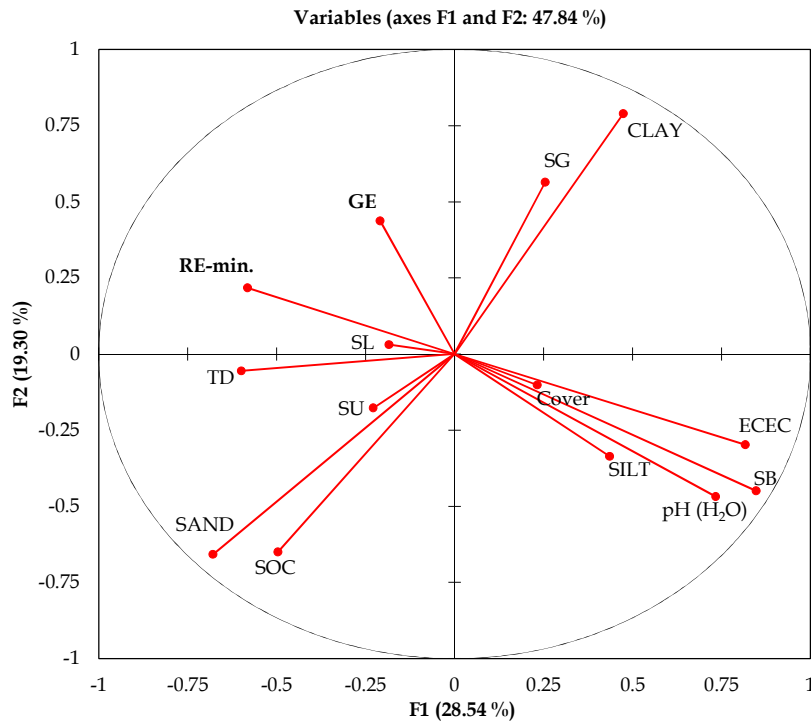


Figure 4.10. Summary result of principal component analysis (PCA) to link minimum rill and gully erosion rates (RE-min and GE (mm)) with major explanatory variables for both watersheds: (TD: topsoil depth, SOC: soil organic carbon, SL: slope length, Rainfall, Cover: soil cover, SB: sum of bases, pH(H₂O): pH-water, ECEC: effective cationic exchange capacity, SG: slope gradient, and CLAY: soil clay content and SILT: soil silt content. Factor loadings are provided in supplementary materials (Annex Table A.9).

Finally, when analyzing the effect of cropping systems within the two watersheds, one can observe that there was no general trend regarding their effect on seasonal minimum rill erosion rates. Nevertheless, there is a tendency for CS3 (cassava-based cropping systems) to show a greater average rill erosion rate compared to the other cropping

systems in both watersheds, while the CS4 (sweet potato-based cropping systems) shows lower averages rill erosion rates (Fig. 4.11).

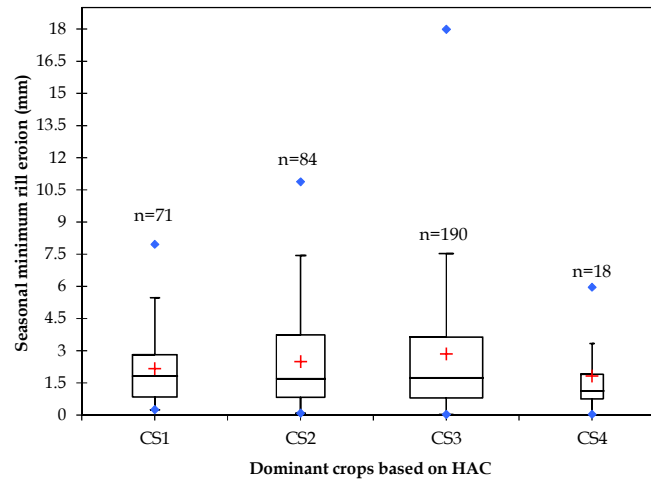


Figure 4.11. Box plots of minimum seasonal rill erosion rate as a function of the dominant cropping system (CS1=bean, CS2=mix of cassava-bean-maize, CS3=cassava, and CS4=sweet potato).

4.4. Discussion

4.4.1. Biophysical characteristics of croplands and watersheds

The land and soil characteristics of the monitored farmers' fields in the two studied watersheds (Wal2 and Kab2) were representative of those found in the highland regions of the African Great Lakes (AGL) (Tables 4.1 and 4.2), dominated by hills and plateaus, high rainfall (Annex Table A.6), with very acidic soils (pH 4.4 - 5.6), and with medium level of organic matter (Rishirumuhirwa and Roose, 1998; Lunze, 2000; Verdoodt and van Ranst, 2003). However, the current study revealed substantial differences between sites within this zone, more so for the physical than the chemical characteristics.

Physical factors varied significantly from one watershed to another (e.g., slope gradient and shape, soil texture and soil surface roughness). Based on this, Kab2 has more unfavourable physical characteristics that would make it more prone to soil erosion, such as more fields with fine-smooth surface roughness, steeper slope gradients, and light clay soil texture with lower SOM content (lower cohesion), compared to those of Wal2 being slightly less susceptible to erosion (Table 4.1).

The average values of almost all analysed soil chemical properties were higher in Kab2 compared to Wal2, except for the SOC, for which averages were greater in Wal2 than in Kab2 (Table 4.2). However, overall, most monitored fields in the two watersheds have low levels of soil nutrients and medium SOC content, which is consistent with previous findings from studies conducted in this zone (Bitijula and Lal, 1983; Lunze, 2000; Pypers et al., 2010).

The total rainfall amount varied widely between the two watersheds but was well distributed for agricultural activities during the four monitored seasons (2015-2017). The average daily rainfall varies very little between the four monitored seasons (8 - 11 mm/day) (Annex Table A.6). Throughout this monitoring period, however, more large rainfall events were observed in the long seasons-SA compared to the short rainy seasons-SB (Fig. 4.3). This might lead to more erosive rainfall events during the long compared to the short rainy seasons and consequently, it could largely explain the differences in rilling and gully erosion rates. Nevertheless, erosive power is mainly related to rainfall intensity which controls the runoff intensity (Wirtz et al., 2012).

Considering the land-use practices observed in the current study, the intercropping system was the most dominant in the two watersheds, combining arable crops and seldom short fallows in the same plots, as has been reported for other small farming systems in sub-Saharan Africa (e.g., Valbuena et al., 2015). Fields were mostly occupied by maize, legumes, and root and tuber crops (Table 4.3). These systems imply that farmers plough the same plots each season without reverting the extracted nutrients back to the soil. In the short and medium-term, these practices substantially modify the pH, nutrient status and SOC content and hence structure of their soils and increase their susceptibility to erosion (e.g., Gowing and Palmer, 2008).

4.4.2. Soil loss by rills and gullies

The results of this study reveal high seasonal rill erosion rates, 2.6 and 5.6 mm for the average minimum (RE-min) and maximum (RE-max) rill erosion rates respectively (Fig. 4.6), corresponding to ~ 32.5 to 70 t/ha/season, converted by assuming a bulk density of 1.25 g/cm³ for croplands in Africa (Lal, 1995). Given the existence of 2 rainy seasons in this study area, these rates must be doubled to arrive at yearly erosion rates. In addition, given that the monitoring periods do not cover the entire periods with rain (Fig. 4.3), annual erosion rates could be even larger.

Compared to previous estimates using the Universal Soil Loss Equation (USLE) model for the Lake-Kivu basin (South-Kivu, and Eastern Rwandan Provinces) which reported a mean annual rate of 30 t/ha/yr (Karamage et al., 2016), one can consider that the present results are very high, and that soil loss rates have been underestimated

in the study of Karamage et al. (2016), maybe because of the large observation scale that these kinds of studies use to determine the extent of erosion (e.g., Okoba and Sterk, 2006b). Moreover, compared to what has been previously reported also at the cropland level for other tropical soils (20 to 25 t/ha/yr; Hewawasam and Illangasinghe, 2015), the results in present study seem to be very high giving the permissible soil loss which should not exceed 10-12 t/ha/yr.

Considering gully erosion (GE), the soil loss rates were rather low (averages between 0.46 to 0.85 mm over each of the four observed seasons) compared to RE loss rates, but its average was significantly different between seasons and the two watersheds. On the other hand, given that gullies are continuous over great lengths, they will undoubtedly have more impact in terms of the exported total sediment budget towards the depression zones and Kivu lake, compared to rills. Overall, RE-min losses represented 89 to 95% of the total, while GE losses represented only 5 to 11% of the total losses all seasons combined (Annex Table A.7). According to Poesen et al. (2003), the contribution of ephemeral gully erosion to overall soil loss rates and sediment production rates represent all over the world between 10% and 94% of total sediment yields caused by water erosion. Hence our observations lie at the lower end of the range. This may be because permanent gullies in the present study are fairly small in size. In addition, despite their small size, gullies are not refilled with soil each year as opposed to ephemeral gullies.

As far as rill dimensions (3.5 and 12.5 cm, for depth and width, respectively) or gully dimensions (13.5 cm and 52.5 cm, for depth and

width) are concerned, they are generally smaller than those reported elsewhere in cropland systems in Navarra (Spain; Casalí et al., 1999; Taguas et al., 2015) or Belgium (Poesen, 1993). Thus, the high soil loss rates caused by rills at our sites were likely due to their high observed densities (0.12 to 0.29 rills/m, on average in Wal2, and 0.21 to 0.24 rills/m, in Kab2) (Figure 4.5). Indeed, on steep slopes and small plots, the rills would be more likely to flow parallel to the general slope with less opportunity for convergence to form large rills or gullies, yet they will still produce a lot of sediment. Overall, soil erosion by rills and gullies showed significant spatial (between and within the two sites) and temporal variations.

4.4.3. Explaining variability in soil loss by rills and gullies at plot and whole-field scales

Large variability in field characteristics was observed across fields, but this variability was much greater within Wal2 compared to Kab2 (Tables 4.1 & 4.2). Such large variability across a large range of variables is likely to complicate the identification of relationships between these variables and the observed erosion rates.

Nevertheless, the observed results in both watersheds show a tendency of increasing RE-min rates with, in particular, the decrease in pH, ECEC and sum of base content (Table 4.8). Likewise, gully erosion rates tended to increase with low soil SOC, sum of bases and ECEC (Figure 4.10). Lower ECEC and SB values and acid soil may reflect in part a higher degree of degradation and hence higher susceptibility to erosion. On the other hand, high topsoil depth and high sand content also tended to induce high RE-min loss rates. On these very clayey

soils, higher sand content may result in lower aggregate stability and hence higher susceptibility to erosion (e.g., Hewawasam and Illangasinghe, 2015). Regarding the effect of topsoil depth, one would have expected low topsoil depths to be associated with high erosion rates (rather than the opposite), even more so because topsoil depth is positively correlated to SOC content. A positive correlation between topsoil depth and SOC content has also been reported by Bouchoms et al. (2019). Indeed, SOC is known to contribute positively to soil aggregate stability and soil cohesion (Li et al., 2013; Bouchoms et al., 2019), and hence one would expect a decrease in RE-min when SOC and topsoil depth increase. The reason for this discrepancy is unclear.

Regarding cropping systems, cassava-based systems seem to produce higher RE loss rates when compared to other systems. Several factors could explain this situation including, among others, the fact that cassava-based systems are most of the time present on marginal plots prone to erosion, or because of large spacings between plants leaving the soils poorly covered and therefore easily exposed to erosion. In general, however, it is difficult to relate erosion rates to specific crops or cropping systems because of the prevalence of mixed crop systems.

Part of the difficulty in relating erosion rates to plot characteristics may stem from the fact that about three quarters of the monitored fields were affected by off-site effects, namely erosion from upslope fields. This shows that there is a strong connectivity of erosion along the entire length of the slope, which is not the case in environments where erosion-control structures are present (e.g., Rutebuka et al. 2019).

4.4.5. Opportunities for estimating the extent of soil erosion at cropland level

For erosion quantification at cropland level, rill and gully volumes (densities, sections, widths and depths) can be used as a guide to minimum erosion rates and are highly appropriate for small-scale studies (De Santisteban et al., 2006; Castillo et al., 2012; Di Stefano et al., 2017). Nevertheless, as argued by Steinhoff-Knopp and Burkhard (2018), the determination of the extent of soil loss by measuring erosion features (channels) is a practical compromise between accuracy, applicability, and efficiency. According to these authors and to Ledermann et al. (2010), error rates in the used method for linear erosion quantification could vary between 10% and 15%, which suggests that the resulting data have to be treated with caution. However, all admit that the magnitude of loss rates is correct, and the results lead to a good understanding of the processes and impacts of soil erosion by water at the field to the landscape scale.

Indeed, it is now clear that the soil volume which is lost by water erosion phenomena is very high, especially through rilling. In the long run, this will lead to a reduction in nutrient availability, in soil depth, in water holding capacity (loss of SOC), which in turn will have detrimental effects on crop productivity (e.g., Bouchoms et al., 2019). This will be harmful to smallholder farming-systems in which a significant decline in crop productivity will have enormous consequences and will tend to perpetuate the vicious circle seen in soil degradation and food insecurity (e.g., Lal, 2009). On the other hand, gully erosion will lead to a reduction in cultivated area and fragmentation of land but also, because of their permanent nature and

high impact on overland flow and sediment connectivity, to the siltation and eutrophisation of rivers and lakes.

The current study shows that the methods of monitoring and measuring rills and gullies but also collecting environmental and physical characteristics within small agricultural plots, offers the possibility of integrating scale notions (plot, farm and watershed) into the analysis of water erosion determinants as well as for guiding future soil conservation efforts. Indeed, it has proven difficult to promote adoption of control methods on the basis of modeling methods (empirical and process-based field-scale and catchment-scale soil erosion models; Okoba & Sterk, 2006a). The evaluation of the extent of soil loss due to water erosion by this method has the advantage of obtaining similar or sometimes even better results over small areas compared to modelling results, and of being accessible and understandable to land users, thereby allowing for greater confidence on behalf of smallholder farmers. To make this method more amenable to smallholder farmer or extension agents, one could investigate increasing the interval between monitoring periods (for example from two to three weeks) or using intermediate indicators of the soil erosion rate such as rill densities and cumulative rill widths along a transect. Such information could be sufficient to evaluate the severity of erosion and to rank plots on a relative scale to prioritise future interventions.

4.5. Conclusion

The results of the current study show that there is a potential to quantify the extent of rill and gully erosion at cropland level by

monitoring farmers' fields in small watershed. Moreover, the temporal variability of soil erosion between farms can be evaluated by monitoring consecutive rainy seasons.

This study revealed that the extent of water erosion rates in small farmers' fields was higher than what has been reported in similar environments (from 0.03 to 18 mm/season for min. rill erosion and from 0.47 to 4.06 mm/season for gullies), meaning that the Kivu dorsal region suffers enormously from water erosion damages. This is likely to have severe consequences on plot productivity and on the livelihoods of smallholder farmers, but also on the quality of surface waters downstream and in particular the quality of Lake Kivu water which is already under strong pressure as a result of overexploitation and high population density.

Variability in soil loss rates observed in farmers' fields could be partly explained by a range of environmental (rainfall amount) and plot-scale physical or chemical factors (e.g., soil texture, pH, sum of bases and effective CEC). Thus, as an initial indication for small farms in the Kivu dorsal, it may be most efficient and sustainable to invest in the actions that improve the soil biophysical properties. Priority should be given to bio-physical SWC measures which have the capacity to make the ecology more stable and economically viable by substantially decreasing water erosion (mainly in rilling).

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the VLIR-UOS for funding the two last campaigns of the current research as part of the IUC program

in partnership with the Université Catholique de Bukavu (UCB). The first author benefitted from a doctoral fellowship of the Université catholique de Louvain (UCLouvain). We also thank all enumerators and farmers who participated in the field evaluations.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

5.1. Introduction

Le problème central identifié et développé dans l'introduction de cette thèse concerne la question de la gestion de la dégradation des sols, en particulier, de celle par érosion hydrique dans les zones montagneuses de la dorsale du Kivu. Depuis les années de colonisation, une inquiétude s'était déjà observée dans le chef des gestionnaires des terroirs qui avaient constaté que la forêt reculait à une très grande vitesse avec des conséquences avérées sur la perte de terres par érosion hydrique (Tondeur, 1954), comme cela avait été aussi observé ailleurs (Lal, 1983). Malheureusement, en raison du contexte sécuritaire de cette zone dominée par des guerres à répétition (1996-2003) qui a mis à mal le système de recherche, peu d'études récentes ont été menées pour évaluer le niveau atteint par la dégradation des sols.

Plusieurs décennies après, certaines études ont abordé la question de la dégradation des sols, identifiant la pratique de l'agriculture comme l'élément déclencheur, sans pour autant en quantifier l'ampleur en milieu réel ou en approfondir les différentes composantes (ex., Bitijula and Lal, 1983; Wils et al., 1986). Pourtant, les évaluations de la dégradation des sols en général, et de la perte en terre par érosion en particulier, doivent intégrer les effets des pratiques et des techniques de gestion agricole avec leurs dimensions environnementales, sociales et institutionnelles (Muchena et al., 2005). De plus, les environnements physiques et socio-économiques dans lequel la dégradation se produit ne doivent pas être négligés (Teshome et al., 2014; Muchena et al., 2005).

Au vu de l'importance de la démographie dans la zone de hautes altitudes de l'Afrique Sub-Saharienne, particulièrement dans les pays de la Région des Grands Lacs Africains, les agriculteurs y sont obligés de produire plus de nourriture pour suivre le rythme de la croissance démographique de cette sous-région. Cependant, ceci n'est possible que si le potentiel productif de ces sols est préservé ou restauré, ce qui suppose l'adoption par les utilisateurs des sols, de bonnes pratiques de gestion et de conservation de leurs terres. Néanmoins, le taux d'adoption ainsi que les investissements dans les techniques et pratiques de gestion et conservation des sols sont influencés par divers facteurs socioéconomiques et biophysiques qui sont dépendants des milieux (Adimassu et al., 2012; Shiferaw et al., 2009; Ervin and Ervin, 1982).

Tenant compte de tous ces aspects, l'objectif principal de cette étude était de faire une caractérisation de l'érosion hydrique sur les parcelles agricoles dans la dorsale du Kivu afin de contribuer, à long terme, à la mise en œuvre d'un outil et d'un système de gestion coordonnée des actions de lutte contre l'érosion des sols pour l'accroissement de la productivité des terres agricoles au Sud Kivu. Cet objectif global devait être atteint à travers (1) une étude des caractéristiques des exploitations agricoles et de la perception paysanne de l'état de dégradation des terres dans la dorsale du Kivu, (2) une évaluation de l'impact des pratiques agricoles et des mesures de gestion et conservation des sols sur l'érosion en partant des avis des producteurs agricoles et enfin, (3) une quantification de l'étendue et de la sévérité des pertes par l'érosion en rigoles et en ravines sur les parcelles des petits producteurs par des mesures de terrain.

La mise en œuvre des activités de la recherche en vue de répondre à cet objectif a débouché sur certaines conclusions et leçons clés qui sont présentées ci-dessous. Outre ces leçons, une réflexion est faite sur la possibilité d'extrapoler ces résultats au-delà des zones d'étude et sur les perspectives de recherches futures sur la modélisation et la spatialisation de l'aléa érosion en vue de mieux gérer et coordonner les activités de lutte antiérosives dans la Région des Grands Lacs Africains.

5.2. Principaux résultats

5.2.1. *Diversité des contextes biophysiques et socioéconomiques en lien avec l'état de dégradation des sols*

Les résultats rapportés au chapitre 2 ont mis en évidence des caractéristiques environnementales et socioéconomiques à travers la dorsale du Kivu qui sont propices à une dégradation accélérée des terres. Partant des avis des premiers bénéficiaires et utilisateurs des terres agricoles, il s'avère que cette dégradation générale est perçue comme moyenne à sévère et cela à travers toute la zone d'étude, ce qui est très inquiétant. De plus, au vu des évaluations des différentes formes de dégradation – particulièrement l'érosion hydrique, perte de MO, compaction, baisse de fertilité des sols - il semble probable que l'état général de dégradation soit sous-estimé.

Malgré certaines spécificités entre bassins versants au sein de la zone d'étude tant sur le plan biophysique que socioéconomique, seules de faibles différences ont pu être observées entre eux en termes de niveau de dégradation. Néanmoins, certains facteurs comme la densité de population, l'importance de l'agriculture comme source de revenu et

la pente influencée par l'altitude semblent favoriser un état de dégradation plus avancé dans certains sites comparé à d'autres.

A l'échelle de l'exploitation, la dotation en ressources (niveau de richesse élevé et superficie, principalement) semble avoir un impact positif sur l'état du sol. Ainsi, il est apparu que l'état de dégradation est généralement perçu comme plus sévère dans les exploitations pauvres. Cette situation peut refléter un problème d'accès à des ressources en sol de qualité pour les plus pauvres, ou une pression accrue sur les sols associés à de faibles moyens pour entretenir la qualité des sols, accentuant la précarité des ménages pauvres. Cela peut aussi refléter la capacité des plus riches à allouer des ressources vers des actions de conservation des sols. En tout état de cause, ces disparités en termes de dotation en ressources semble expliquer au moins en partie la grande variabilité dans l'état des sols à l'échelle de la zone d'étude, dépendante de l'allocation des ressources disponibles au sein des ménages (ex., Teshome et al., 2016; Schut et al., 2016; Tesfaye et al., 2014; Tittonell et al., 2005).

En définitive, à cause de la précarité généralisée dans laquelle vivent la quasi-totalité des ménages agricoles de la dorsale du Kivu, comme ceux de l'Afrique subsaharienne en général, ces derniers apparaissent comme les vrais observateurs de l'état d'évolution (positive ou négative) des terres agricoles qu'ils exploitent, car tout changement survenu les impactera d'une manière plus marquée que les autres utilisateurs des sols. Cette étude contribue aussi à montrer que la compréhension des processus de dégradation des sols ne doit pas seulement prendre en compte les changements observés dans les stocks physico-chimiques des sols, mais aussi l'analyse des contextes

socioéconomiques (ex., Abdulai and Huffman, 2014). Elle ouvre ainsi une brèche pour explorer d'autres pistes pour expliquer les liens éventuels entre la mise en culture des terres au sein de la dorsale du Kivu et l'état de dégradation avancé qui est à la base de la faible productivité des terres.

5.2.2. *Opportunités de la prise en compte des perceptions paysannes dans l'évaluation des obstacles à l'adoption des méthodes de lutte contre l'érosion*

Un des résultats importants rapporté dans le chapitre 3 de cette thèse était la perception par les producteurs d'un faible impact des cultures et des pratiques agricoles sur la dégradation en général et sur la perte de terre par érosion en particulier. En effet, selon cette perception, les ménages ont tendance à beaucoup plus incriminer les facteurs exogènes dont la forte pluviosité de la zone, le ruissèlement et la forte pente de leurs parcelles. Et pourtant, dans plusieurs études on a démontré, à part ces facteurs exogènes, l'importance des actions anthropiques sur l'évolution négative des sols dans différents environnements (ex., Lal, 2006).

Il a été aussi fait remarquer dans ce chapitre 3 que la quasi-majorité des exploitants agricoles au sein de la zone d'étude a un niveau de connaissance assez élevé, non seulement en rapport des différentes techniques de lutte contre la dégradation des sols, mais aussi de la problématique d'érosion hydrique en général. Il a aussi été vérifié que ce niveau de connaissance l'était aussi bien pour les techniques qu'ils connaissent depuis longtemps, car héritées de père en fils depuis la période ancestrale (cas de l'application d'amendements organiques - déchets ménagers, etc.), mais également pour les technologies recommandées dans la lutte contre l'érosion hydrique. Ces dernières

étaient même reconnues comme étant plus efficaces que leurs méthodes traditionnelles de lutte contre l'érosion. Cependant, les résultats obtenus dans ce chapitre ont aussi montré que, malgré ce niveau assez élevé de connaissance de la problématique de l'érosion en général, le niveau d'adoption des nouvelles technologies était faible. Ceci met en lumière l'écart qui peut exister entre le niveau de connaissance et le niveau d'adoption des nouvelles technologies, malgré qu'il soit reconnu comme étant l'élément crucial justifiant l'adoption ou la continuité d'adoption de nouvelles techniques de protection des sols contre la dégradation par érosion hydrique (ex., Tesfaye et al., 2014; Bizosa, 2014). Il en résulte que d'autres facteurs doivent être pris en compte, dont les facteurs socioéconomiques et politiques qui, selon plusieurs études, jouent aussi un rôle très prépondérant dans ce processus d'adoption de nouvelles technologies (ex., Assefa and Rudolf, 2016; Wildemeersch et al., 2013).

D'où l'importance d'associer à cette évaluation du niveau de connaissance, l'analyse des freins à l'adoption des méthodes de lutte contre l'érosion qui dépendent eux aussi, des facteurs endogènes et exogènes. Ainsi, ce chapitre 3 a identifié plusieurs freins à l'adoption de nouvelles technologies de lutte contre l'érosion du sol, dont les plus pertinents dans la zone d'étude sont la petite taille des exploitations, le nonaccès aux crédits financiers et la main-d'œuvre insuffisante. En effet, avec des ressources limitées pour investir dans la gestion des terres, la pression continue exercée sur les ressources aggrave encore la dégradation des terres due à l'érosion des sols (Teshome et al., 2016). Ces mêmes problèmes ont été aussi identifiés dans d'autres études (ex., Schut et al. 2016; Bizosa, 2014), comme étant des principaux freins à

l'adoption ou à la continuité d'adoption de nouvelles technologies de gestion et conservation des sols contre les dégradations.

Sur base de cet état de lieux, cette étude offre plusieurs opportunités d'améliorer les méthodes d'identification des points noirs de dégradation du sol par l'érosion hydrique en tenant compte de la perception des utilisateurs des terres agricoles. Elle ouvre ainsi une voie aux chercheurs et aux décideurs pour faire le suivi de l'effectivité des mesures de contrôle contre toutes les formes de dégradation et en l'occurrence, celle par érosion hydrique. Car le choix de facteurs pertinents d'analyse de l'état d'adoption ou de non-adoption par les petits exploitants agricoles pauvres, en Afrique subsaharienne en général et en région de hautes altitudes en particulier, est crucial pour proposer des solutions adaptées, selon les particularités de chaque milieu.

5.2.3. *Etendue de perte des terres par érosion en rigoles et en ravines, et sa variabilité à l'échelles des parcelles agricoles et des bassins versants*

Les résultats rapportés au chapitre 4 ont relevé des pertes importantes de terres par l'érosion en rigoles et en ravines. C'est une situation très alarmante étant donné que ces deux signes d'érosion rendent compte de la perte actuelle sur les parcelles agricoles. Ces résultats confirment en tout ou en partie les résultats des chapitres 2 et 3 sur la perception de plus du tiers des producteurs qui ont affirmé observer une dégradation sévère à très sévère par érosion hydrique. Les taux de pertes par érosion en rigoles ont énormément variés sur les quatre saisons d'observation, entre 0,03 à 17,99 mm pour le minimum et entre 0,03 à 34,17 mm pour le maximum, ce qui représente une perte potentielle de fertilité énorme compte tenu de la faible superficie des

parcelles agricoles dans cette zone d'étude (Annexes Tableau A.7). Ceci représente en réalité une perte minimale largement au-dessus de la perte admissible de 10 t/ha/an (0,7- 0,8 mm, en fonction de la densité du sol). De même, les taux de perte par érosion en ravines ont aussi beaucoup varié, entre 0,13 et 16,3 mm, ce qui est comparable à la perte minimale observé pour l'érosion en rigoles, mais beaucoup plus inquiétant car il s'agit des ravines permanentes.

Plusieurs facteurs se sont révélés être responsables des grandes variations observées dans les taux de pertes en terre par érosion en rigoles et en ravines au niveau de la parcelle agricole et au niveau des bassins versants. Au niveau de la parcelle agricole, les facteurs en lien avec ces indicateurs d'érosion concernent certains paramètres biophysiques dont le pH, la somme des bases et la capacité d'échange cationique effective et, dans une moindre mesure, la teneur en sable, la profondeur de la couche arable et le taux du couvert végétal. Ainsi, sur les parcelles agricoles, les propriétés chimiques jouent donc un rôle très déterminant dans la variabilité observée et résultent principalement de différences observées dans les caractéristiques du sol et des apports (déchets ménagers, fumiers...) qui dépendent de la dotation en ressources par les exploitants. Alors qu'au niveau des bassins versants, les différences observées sont liées à des facteurs comme la pluviométrie, le nombre d'évènements pluvieux et la position topographique des parcelles agricoles.

Enfin, dans ce chapitre 4, il a été très difficile de mettre en évidence un quelconque lien entre pratiques culturales en général et la sévérité de l'érosion en rigoles ou en ravines. Ceci peut être attribué à la présence quasi généralisée des associations de plusieurs cultures. En effet, bien que certaines pratiques soient associées à des cultures spécifiques, en

cas d'association de plusieurs cultures, il devient difficile de dissocier la part de chacune prise isolément. Toutefois, comme il a été rapporté dans plusieurs autres études en zones montagneuses de l'Afrique subsaharienne par Karamage et al. (2016b); Hewawasam and Illangasinghe (2015) et, bien avant eux, par Rishirumuhirwa (1994), les cultures peuvent être la cause d'importantes pertes dans ces environnements si elles sont associées à des pratiques inappropriées sans les dispositifs qui protègent les sols contre les érosions.

5.3. Principales implications et recommandations

La méthodologie adoptée pour évaluer l'état de dégradation par érosion hydrique s'est montrée efficace car elle a permis d'évaluer l'intensité et l'étendue de la dégradation, soit à travers la perception des producteurs, soit à travers le suivi des rigoles et ravines sur leurs parcelles de production. Compte tenu de l'intensité de l'érosion en rigoles particulièrement et son impact sur les pertes de terres observées sur parcelles agricoles, il s'est avéré que l'érosion hydrique est très sévère au sein de la dorsale du Kivu et que la productivité de ses sols serait potentiellement affectée. Ceci implique qu'il faudrait prendre rapidement des mesures adéquates pour stopper les effets négatifs de l'érosion hydrique avant que ses effets ne soient irréversibles. L'état des lieux fait sur base de la perception d'exploitants agricoles a permis d'avoir une connaissance actualisée de ces milieux étudiés, permettant de mettre en lumière l'état de dégradation atteint. Ceci démontre l'intérêt d'en tenir compte dans les évaluations futures à faire dans d'autres milieux similaires pour tenter de résoudre ce problème.

Ainsi, connaissant les critères sur lesquels se basent les exploitants agricoles pour évaluer la qualité de leurs terres, il serait aussi possible

de déterminer non seulement les principaux types de dégradation, le niveau atteint par chacun d'eux, mais aussi et surtout d'évaluer le niveau de connaissance que les producteurs en ont. Ceci aura comme avantage de pouvoir identifier les vraies limites à l'adoption des mesures de lutte et proposer les voies de sorties appropriées tenant compte de la particularité de chaque milieu.

Selon les résultats de cette thèse, pour plus de 70% des fermiers, les principaux types de dégradation de leurs terres sont la perte de matière organique, l'épuisement par perte d'éléments nutritifs, et tout particulièrement l'érosion du sol qui, en définitive, est l'obstacle majeur à la productivité de leurs terres et menace leur production agricole. Ceci implique que ce sont les conséquences de la dégradation des sols qui renforcent les actions de l'érosion hydrique plutôt que l'inverse, ce qui est cohérent avec ce que plusieurs auteurs avaient démontré, dont Wells et al. (2016), arguant que la dégradation et l'érosion fonctionnent en tandem, chacun exacerbant l'autre. Ainsi, tenter de résoudre la problématique de l'érosion hydrique dans un tel contexte implique aussi, tant pour les vulgarisateurs que pour les politiques, de connaître comment les premiers utilisateurs de sols s'y prennent pour apporter des solutions idoines, soit en adoptant de nouveaux comportements dans leur manière d'utiliser leurs terres, soit en utilisant des techniques qu'ils jugent les plus efficaces ou disponibles dans leurs terroirs. Car, en effet, il pourrait être plus avantageux, tant en termes de moyens à disponibiliser qu'en termes du temps à mobiliser, de partir de leurs propres expériences, si celles-ci s'avèrent être efficaces face au problème d'érosion. En effet, ces deux facteurs (moyens et temps) sont très prépondérants dans le processus d'adoption des nouvelles technologies étant donné que nombreux

d'entre les producteurs sont enclins à adopter une technologie si et seulement si celle-ci leur permettra d'obtenir rapidement un retour sur leur investissement (ex., Mulugeta and Stahr, 2010).

De manière générale, les résultats de cette thèse ont montré que les ménages vivant dans cette partie de la dorsale du Kivu sont très pauvres, l'essentiel des revenus provenant de l'activité agricole pour la grande majorité d'exploitants. Par conséquent, les politiques de lutte contre la dégradation des sols seront donc très utiles pour eux, en vue d'accroître la productivité de leurs terres. Néanmoins, les politiques agricoles font toujours face à plusieurs défis dont les plus importants sont la réduction de la pauvreté, en particulier parmi les ménages ruraux, et la protection de l'environnement et des écosystèmes qui fournissent des services essentiels devant soutenir les activités agricoles (ex., Nabahungu, 2012; Mulugeta and Stahr, 2010). Ainsi devrait-on promouvoir un délicat équilibre entre l'utilisation intensive des ressources en sols pour l'agriculture et la protection des hautes terres. Ceci est très capital étant donné l'engouement de la mise en culture des terres, y compris des collines qui devraient être réservées aux boisements purs à cause de leur nature fragile, impropre à la mise en culture. Il est certes difficile de combiner plusieurs objectifs qui tendent à aller parfois dans des directions divergentes (par ex., protection de l'environnement et intensification agricole), mais les politiques adéquates qui soutiennent ces objectifs sont à recommander.

Il importe donc, pour inverser le cercle vicieux de la dégradation des sols et de la pauvreté, qu'une attention particulière soit accordée à la reconnaissance du rôle que jouent les exploitants agricoles dans le problème de dégradation de leurs sols par l'érosion en particulier. Ceci

serait donc un point d'entrée de toute action qui vise à inverser la tendance généralisée de dégradation sévère des terres agricoles dans les zones de hautes altitudes en l'occurrence. Il importe toutefois d'en connaître les limites pour mieux les exploiter. Ainsi, les nouveaux projets et services de vulgarisation doivent mettre beaucoup plus l'accent sur le renforcement des capacités des agriculteurs à expérimenter et à s'adapter aux nouvelles technologies. Bien que les pratiques agricoles traditionnelles ne soient pas suffisamment efficaces pour réduire considérablement l'érosion des sols, comme l'a reconnu la grande majorité des exploitants, elles sont tout au moins un point de départ auquel les agriculteurs ont peut-être davantage confiance que les nouvelles technologies de lutte introduites. Quelle que soit la proposition, le choix dépendra des conditions locales, tout en reconnaissant que les agriculteurs choisiront les mesures les plus adaptées à leur situation. Il convient de prêter attention aux mesures biophysiques de protection des sols contre les dégradations en proposant celles qui ont la capacité de rendre l'écologie plus stable et qui sont économiquement viables. De plus, il faudrait veiller à ce que la plupart des pratiques de conservation biologique soient compatibles avec les pratiques agricoles usuelles et ne soient pas trop difficiles à mettre en œuvre par les agriculteurs. Cependant, cela nécessitera un soutien institutionnel, pour renforcer la sécurité nécessaire aux efforts d'extension à grande échelle et réduire les contraintes résultant de la fragmentation croissante des terres, observée aussi dans de nombreuses régions de hautes terres d'Afrique subsaharienne fortement peuplées. Certes, la petite agriculture paysanne ne contribue pas énormément dans la productivité économique du secteur agricole à l'échelle régionale, moins encore au niveau du pays tout entier, mais

au niveau local, elle joue un rôle prépondérant dans la subsistance des ménages ruraux pauvres. Ainsi, les programmes à mettre en place doivent, en plus du soutien dans le domaine des techniques agricoles, investir aussi dans le domaine non-agricole en soutenant des mécanismes qui tendent à trouver des solutions à cette problématique.

Enfin, à part les atouts qu'offre le niveau de connaissance des fermiers, il importe de noter l'existence de la fragmentation avancée des terres qui est un des freins majeurs à l'adoption de mesures adéquates de gestion et conservation des sols. Elle a d'ailleurs aussi été reconnue par la grande majorité des exploitants qui ont participé dans cette étude et qui ont identifié la faible superficie de leurs parcelles parmi les contraintes à l'adoption de mesures de lutte contre l'érosion. Par ailleurs, l'approche bassin versant, qui intègre l'approche colline, semble être la seule option et la meilleure stratégie de mise en place des systèmes coordonnés de lutte contre les dégradations. Les exploitants ayant des parcelles à faibles superficies étant les plus affectés face aux affres de la dégradation des sols, sont malheureusement aussi les plus réfractaires aux actions qui militent pour l'approche « colline » ou « bassin versant ». Il est dès lors crucial, pour la réussite d'une telle stratégie, de développer des politiques particulières pour cette grande catégorie des utilisateurs des sols dans les hautes altitudes en particulier.

5.4. Perspectives pour les recherches futures

La caractérisation de l'état de dégradation des terres par l'érosion hydrique a ouvert la voie à plusieurs pistes de recherche dans la connaissance des caractéristiques des terres agricoles en hautes altitudes en particulier, et leurs liens avec les facteurs

socioéconomiques ainsi qu'environnementaux dans l'étude de la dynamique de la dégradation des terres au sein de la dorsale du Kivu.

Les résultats de cette étude ont montré clairement qu'il y a un réel besoin de tenir compte de plusieurs disciplines pour améliorer nos connaissances de base et leur emploi par les exploitants agricoles, premiers utilisateurs des sols, avec l'objectif d'améliorer durablement leurs moyens d'existences. A travers cette étude basée essentiellement sur la connaissance par les exploitants de l'état de dégradation des sols et les mesures d'érosion en rigoles et en ravines sur les parcelles agricoles, il n'a pas été possible d'approfondir la confrontation entre ces deux approches par des analyses pouvant permettre de mettre à profit toutes les informations collectées. Aussi, la spatialisation des résultats qui offre d'énormes avantages dans l'actualisation des données sur des grandes étendues n'a pas été exploitée, pourtant très capitale pour le développement d'un système de gestion des sols impliquant plusieurs bassins versants ou une importante région.

Dans l'ensemble et de manière pratique, les recherches à mener sur le terrain devraient proposer des solutions durables au problème de la dégradation des ressources et de la pauvreté rurale en incluant dans leurs sphères d'analyse, l'atténuation de la pression démographique sur les ressources, les améliorations technologiques dans l'agriculture et le développement d'autres secteurs de l'économie rurale. De plus, davantage de recherches sur l'approche socioéconomique et biophysique des mesures de gestion et conservation de l'eau et du sol sont nécessaires pour avoir une idée complète des effets de ces mesures sur les propriétés clés des sols, le développement socioéconomique, les impacts environnementaux, les systèmes de culture et de travail du sol, etc. pour avoir une compréhension intégrée.

Cette thèse a modestement fourni et fait une actualisation de l'information pour entamer les études sur la mise en place d'un système coordonné des actions de lutte contre la dégradation des sols au sein des bassins versants des zones de hautes altitudes en R.D. Congo en général, et de la dorsale du Kivu en particulier. Ainsi, les résultats trouvés justifient la nécessité et l'urgence qu'il faudrait donner au développement de techniques adaptées et leur adoption pour préserver les sols contre les dégradations. Pour ce faire, un dialogue permanent entre toutes les parties prenantes (agriculteurs-chercheurs-décideurs) est crucial pour l'atteinte de cet objectif qui assure un meilleur futur à la gestion de l'écosystème tout entier de la dorsale du Kivu.

Références bibliographiques

- Abdulai A. & Huffman W., 2014. The Adoption and Impact of Soil and Water Conservation Technology: An Endogenous Switching Regression Application. *Land Economics* 90 (1), 26-43.
- Adidja, M., Majaliwa, M.J., Tenywa, M., Samora, M., 2016. Soil and water conservation practices and soil erosion intensity in the Lake Kivu Basin, Democratic Republic of Congo. *RUFORUM Working Document Series*, 14 (3): 77 - 85.
- Adimassu Z, Langan S, Johnston R, Mekuria W. and Amede, T., 2017. Impacts of Soil and Water Conservation Practices on Crop Yield, Run-off, Soil Loss and Nutrient Loss in Ethiopia: Review and Synthesis. *Environmental management*, 59 (1), 87-101. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0776-1>
- Adimassu Z., Kessler A., Hengsdijk H., 2012. Exploring determinants of farmers' investments in land management in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Applied Geography* 35, 191-198.
- Adimassu Z., Kessler A., Yirga C. and Stroosnijder L., 2013. Farmers' Perceptions of Land Degradation and Their Investments in Land Management: A Case Study in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Environmental Management*, 51: 989 - 998. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0030-z>
- Alemu, M.D., Kebede, A. and Moges, A., 2019. Farmers' Perception of Soil Erosion and Adoption of Soil Conservation Technologies at Geshy Sub-Catchment, Gojeb River Catchment, Ethiopia. *Agricultural Sciences*, 10, 46-65. <https://doi.org/10.4236/as.2019.101005>
- Amaury Frankl, Jean Poesen, Mitiku Haile, Jozef Deckers, Jan Nyssen., 2013. Quantifying long-term changes in gully networks and volumes in dryland environments: The case of Northern Ethiopia, *Geomorphology*, 201, 254-263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.025>
- Amsalu A. and de Graaff, J., 2007. Determinants of adoption and continued use of stone terraces for soil and water conservation in an Ethiopian highland watershed. *Ecological Economics* 61, 294-302.
- Amsalu, A. and de Graaff, J., 2006. Farmers' Views of Soil Erosion Problems and Their Conservation Knowledge at Beressa Watershed, Central Highlands of Ethiopia. *Agriculture and Human Values*, 23, 99-108. <https://doi.org/10.1007/s10460-005-5872-4>
- Ansoms A., Verdoodt A. and Van Ranst E., 2008. The Inverse Relationship between Farm Size and Productivity in Rural Rwanda. Institute of

Development Policy and Management (IOB), University of Antwerp.
DISCUSSION PAPER /2008.09. 31pp.

- Assefa E, and Hans-Rudolf B., 2016. Farmers' perception of land degradation and traditional knowledge in Southern Ethiopia-resilience and stability. *Land Degradation & Development*, 27(6), 1552-1561; <https://doi.org/10.1002/ldr.2364>
- Azanga, O.E., Majaliwa, J.G.M., Kansiime, F., Mushagalusa, N., Karume, K. and Tenywa, M.M. 2016. Land-use and land cover, sediment and nutrient hotspot areas changes in Lake Tanganyika Basin. *African Journal of Rural Development (AFJRD)* 1(1): 75 90.
- Bagoora F.D.K., 1988. Soil erosion and mass wasting risk in the highland area of Uganda. *Mountain Research and Development*, Vol. 8, No. 2/3, *African Mountains and Highlands*; 173-182
- Bationo A, Hartemink AE, Lungo O, Naimi M, Okoth P, Smaling, EMA, Thiombiano L., 2006. African soils: their productivity and profitability of fertilizer use: background paper for the African Fertilizer Summit 9-13th June 2006, Abuja, Nigeria. IFDC.
- Bationo A., Hartemink A., Lungu O., Naimi M., Okoth P., Smaling E., Thiombiano L., and Waswa B., 2012. Knowing the African Soils to Improve Fertilizer Recommendations In: J. Kihara et al. (eds.), *Improving Soil Fertility Recommendations in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2960-5_3
- Batjes, N. H., Al-Adamat, R., Bhattacharyya, T., Bernoux, M., Cerri, C. E. P., Gicheru, P., ... and Rawajfih, Z., 2007. Preparation of consistent soil data sets for modelling purposes: secondary SOTER data for four case study areas. *Agriculture, ecosystems & environment*, 122 (1), 26-34.
- Bekele, W. and Drake L., 2003. Soil and water conservation decision behaviour of subsistence farmers in the eastern highlands of Ethiopia: A case study of the Hunde-Lafto area. *Ecological Economics* 46, 437-451.
- Bekunda M.A., Wortmann C.S., Bwamiki D.P., Okwakol M., 2003. Potentials and challenges of soil fertility management in the banana-based cropping systems of Eastern Africa. *Soil fertility management in Africa: A regional perspective*. Academy Science Publishers (ASP); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), Nairobi, Kenya, p.123-147.
- Bewket, W., 2007. Soil and Water Conservation Intervention with Conventional Technologies in Northwestern Highlands of Ethiopia:

- Acceptance and Adoption by Farmers. *Land Use Policy*, 24, 404-416. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2006.05.004>
- Beyene A., Gibbon D., and Haile M., 2006. Heterogeneity in land resources and diversity in farming practices in Tigray, Ethiopia. *Agricultural systems*, 88(1), 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.06.004>
- Birhanu A., and Meseret D., 2013. Structural soil and water conservation practices in Farta District, North Western Ethiopia: an investigation on factors influencing continued Use. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 2(4), 114-121. <https://doi.org/10.4314/star.v2i4.20>
- Bisimwa G. et Mambo B., 2009. Souveraineté alimentaire : le paradoxe du Sud-Kivu. *Défis sud* 91, 22-24.
- Bitijula, M. and Lal, R., 1983. Socioeconomic constraints and soil degradation in Kivu region of Zaïre. Project report founded by the IFIAS. ISRIC Library, Wageningen, The Netherlands, 55pp.
- Bizoza A.R. and De Graaff J., 2012. Financial cost-benefit analysis of bench terraces in Rwanda. *Land degradation & development*, 23(2), 103-115. <https://doi.org/10.1002/ldr.1051>
- Bizoza A.R., 2014. Three-stage analysis of the adoption of soil and water conservation in the highlands of Rwanda. *Land degradation & development*, 25(4), 360-372. <https://doi.org/10.1002/ldr.2145>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K.V., Montanarella, L., Panagos, P., 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1) : 2013, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Bouchoms, S., Wang, Z., Vanacker, V., and Van Oost, K., 2019. Evaluating the effects of soil erosion and productivity decline on soil carbon dynamics using a model-based approach. *SOIL* 5, 367-382, <https://doi.org/10.5194/soil-5-367-2019>
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bucekuderhwa, C. et Mapatano S., 2013. Comprendre la dynamique de la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire au Sud-Kivu. *Hors-série 17 septembre* 2013. <http://vertigo.revues.org/13819>; <https://doi.org/10.4000/vertigo.13819>

- Cahen L., Jamotte A., Lepersonne J. et Mortelmans G., 1946. Etat actuel des connaissances relatives à la stratigraphie des systèmes du Kalahari et du Karroo au Congo-Belge. Bulletin du Service Géologique de Léopoldville. N°2; Fasc. II; p237-289.
- CAID (Cellule d'Analyses des Indicateurs de Développement, République Démocratique du Congo), 2016. Rapports annuels des territoires de la province du Sud-Kivu. <https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-province-administrative/province-de-sud-kivu/?donnees=fiche>
- Carrol P., 1980. Classification des sols 2/1 à la station de Mulungu par Soil Taxonomy. Rapport Inédit. 67p.
- Casalí J., Loizu J., Campo M.A., De Santisteban L.M. and Alvarez-Mozos J., 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. Catena 67, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.005>
- Casalí, J., López, J.J., Giráldez, J.V. 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). Catena 36, 65-84.
- Castillo C., Pérez R., James M.R., Quinton J.N., Taguas E.V. and Gomez, J.A., 2012. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. Soil Sci. Soc. Am. J. 76, 1319-1332. <https://doi.org/10.2036/sssaj2011.0390>
- Cazanave-Piarrot A., 2009. La région des grands lacs africains : collapse nature et société pronostiqué. Entropia; pp 61-74
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H. and Souchère V., 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events In Normandy, France. Soil & Tillage Research 67 (2002) 99-108. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00045-4)
- Chikowo R., Zingore S., Snapp S., and Johnston A., 2014. Farm typologies, soil fertility variability and nutrient management in smallholder farming in Sub-Saharan Africa. Nutr Cycl Agroecosyst (2014) 100:1-18. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9632-y>
- CIALCA (Consortium for Improving Agricultural-based Livelihoods in Central Africa), 2010. CIALCA Baseline survey report, led by IITA Kampala, TSBF-CIAT, Nairobi, Bioversity Int., Kampala. 129p (www.cialca.org)
- CNKI (Comité National du Kivu), 1948. Vingt ans d'activité en matière de colonisation européenne 1928-1948. Wellens et Godenne, janvier 1948. 105p.

- Cox P.T., 2012. Farming the battlefield: the meanings of war, cattle and soil in South Kivu, Democratic Republic of the Congo. *Disasters*. 2012, 36 (2): 233-248. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2011.01257.x>
- Crosson, P., 2003. Global consequences of land degradation: An economic perspective. In K. Wiebe, ed. *Land Quality, Agricultural Productivity, and Food Security*. UK, Cheltenham, Edward Elgar; 36-46.
- De Graaff J., Amsalu A., Bodnar F., Kessler A., Posthumus H., Tenge A., 2008. Factors influencing adoption and continued use of long-term soil and water conservation measures in five developing countries. *Applied Geography* 28, 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.05.001>
- De Meyer A., Poesen J., Isabirye M., Deckers J., Raes D., 2011. Soil erosion rates in tropical villages: A case study from lake Victoria basin, Uganda. *Catena* 84, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.10.001>
- De Santisteban, L.M., J. Casali and J.J. Lopez, 2006. Assessing soil erosion rates in cultivated areas of Navarre (Spain). *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 487-506. <https://doi.org/10.1002.esp.1281>
- Di Stefano C., Ferro V., Palmeri V. and Pampalone V., 2017. Measuring rill erosion structure from motion: A plot experiment. *Catena* 156; 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.023>
- Diao X., Hazell P. and Thurlow J., 2010. The Role of Agriculture in African Development. *World Development*, 38 (10) (2010), pp. 1375-1383. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.06.011>
- Dovie D.B.K, 2015. Africa's Environment: A Stressed Biogeographical and Cultural Landscape. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Elsevier, 2nd edition by James D. Wright, Volume 1, pp292-299. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.10113-8>
- DSCR-2 (Gouvernement de la République Démocratique du Congo), 2011. Document de Stratégie de Croissance et de Réduction de la Pauvreté. RDC, Ministère du plan. 126p.
- DSRP-1 (Gouvernement de la République Démocratique du Congo), 2005. Monographie de la province du Sud-Kivu, Kinshasa, Ministère du Plan, Unité de Pilotage du Processus; 179p.
- El-Hassanin A.S.; T.M. Labib and Gaber E.I., 1993. Effect of vegetation cover and land slope on runoff and soil losses from the watersheds of

- Burundi. *Agriculture, Ecosystems & Environment*; 43(3,4), 301-308.
[https://doi.org/10.1016/0167-8809\(93\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0167-8809(93)90093-5)
- Ellis-Frank, 2005. Small farms, livelihood diversification, and rural-urban transitions: strategic issues in Sub-Saharan Africa. In IFPRI (international Food policy Research Institute). *The future of small farms: Proceedings of a research workshop*, Wyre, UK, June 26-29. Washington, DC. pp135-180.
- Ervin, C.A., and Ervin, D.E., 1982. Factors affecting the use of soil conservation practices: hypothesis, evidence and policy implications. *Land economics* 58 (3), 277-292.
- Eswaran, H., R. Lal and P.F. Reich., 2001. Land degradation: an overview. In: Bridges, E.M., I.D. Hannam, L.R. Oldeman, F.W.T. Pening de Vries, S.J. Scherr, and S. Sompatpanit (eds.). *Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification*, Khon Kaen, Thailand. Oxford Press, New Delhi, India.
- FAO, 1998. Synthèse agronomique des essais de fertilisation dans la Province du Kivu. RDC. Programme National Engrais. AG: GCPF/ZAI/013/BEL. Rapport technique n°98/8. Rome. 56p.
- FAO, 2009. Pourquoi investir dans la gestion des bassins versants? Rome (Italie); 31p.
- FAO, ISRIC, ISSS, 1998. *World reference base for soil resources*, vol. 84.
- Giller K.E., Tittonell P., M.C. Rufino, Van M.T. Wijk, S. Zingore, P. Mapfumo, S. Nsiah, M. Herrero, R. Chikowo, M. Corbeels, E.C. Rowe, F. Baijukya, A. Mwijage, J. Smith, E. Yeboah, W.J. Van Der Burg, O.M. Sanogo, M. Misiko, N. De Ridder, S. Karanja, C. Kaizzi, J. K'ungu, M. Mwale, D. Nwaga, C. Pacini, Vanlauwe B., 2011. Communicating complexity: integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agricultural systems*; vol.104, 2; 191-203
- Giller K.N., Witter E., Corbeels M., Tittonell P., 2009. Conservation agriculture and small farming in Africa: The heretics' view. *Field crops Research*, 114(1), 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>
- Govers G. and Poesen J., 1988. Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology*, 1(4), 343-354 [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(88\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0169-555X(88)90006-2)

- Gowing J.W., and Palmer M., 2008. Sustainable agricultural development in sub-Saharan Africa: the case for a paradigm shift in land husbandry. *Soil Use and Management* 24, 92–99 <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00137.x>
- Haghjou M, Hayati B, Momeni D, Choleki D., 2014. Identification of factors affecting adoption of soil conservation practices by some rainfed farmers in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(5), 957-967.
- Hauser S, Sonder K, Binsika Bi Mayala G, Mafuka MM, Lema KM, Coyne D, Van Asten P, Legg J, Abele S, Alene A, Hanna R, Ajala S, Abaidoo R, Ingelbrecht I, Dixon A, Sanni L, Winter S, Kadiata B, Janssens M., 2007. Programme prioritaire de la recherche agricole. Projet 9 ACP ZR 13/1 (GCP/DRC/036/EC selon codification FAO). Programme de réhabilitation de la recherche agricole et Forestière en République Démocratique du Congo.91p.
- Heri-Kazi B.A. et Biolders C.L., 2019. Dégradation des terres cultivées au Sud-Kivu, R.D. Congo : perceptions paysannes et caractéristiques des exploitations agricoles. (Submitted to BASE, under review)
- Heri-Kazi B.A. et Collinet G., 2014. Diversité et mode de gestion des sols dans l'espace socio-agricole des territoires de Walungu et Kabare, Sud-Kivu, R.D. Congo. *Cahiers du CERUKI , Nouvelle Série* , 44, pp. 125-143
- Herweg K., 1996. Field manuel for Assessment of Current Erosion Damage. Soil Conservation Research Program, Ethiopia and Centre for Development and Environment, University of Berne, Switzerland.69p.
- Hewawasam T. and Illangasinghe S., 2015. Quantifying sheet erosion in agricultural highlands of Sri Lanka by tracking grain size. *Anthropocene* (2015) 11, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2015.11.004>
- Himeidan Y.E. and Kweka E.J., 2012. Malaria in East African Highlands during the past 30 years: impact of environmental changes. *Frontiers in physiology*, 3: 315.
- Hurni H., 1990. Degradation and conservation of soil resources in the Ethiopian highlands, in *African Mountains and Highlands: Problems and Perspectives*, Messerli B., Hurni H., editors. (Missouri : Wadsworth Press), 51–63

- ICRAF, 1999. Laboratory methods for soil and plant analysis. May 1999. Nairobi, Kenya.
- Ilunga, L., 1991. Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du Sud-Kivu. Bulletin de la Société géographique de Liège, 27, 209-228.
- IPAPEL (Inspection provinciale de l'agriculture, pêche et élevage), 2018. Rapport biennuel 2016-2017. R.D. Congo, Sud-Kivu. Bureau production et protection des végétaux. 77p.
- IPAPEL (Inspection Provinciale de l'Agriculture, Pêche et Élevage), 2010. Rapport annuel. Province du Sud Kivu. RD Congo. 87p.
- Jankowski, F., 2013. Les typologies traditionnelles sont-elles fonctionnelles ? Recherche participative et connaissance locale des sols au Sénégal. Revue d'anthropologie des connaissances, 7 (1), 271-290.
- Jankowski, F., et Le Marec J., 2014. Légitimation des savoirs environnementaux dans un programme de recherche participative au Sénégal. Natures Sciences Sociétés, 22, 15-22. <https://doi.org/10.1051/nss/2014015>
- Jayne T.S., Mather D. and Mghenyi E., 2010. Principal challenges confronting smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa. World Development, 38 (10), 1384-1398 <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.06.002>
- Karamage F., Shao H., Chen X., Ndayisaba F., Nahayo L., Kayiranga A., ... Zhang C., 2016a. Deforestation Effects on Soil Erosion in the Lake Kivu Basin, D.R. Congo-Rwanda. Forests, 7(11), 281. <https://doi.org/10.3390/f7110281>
- Karamage F., Zhang C., Ndayisaba F., Shao H., Kayiranga A., Fang X., ... Tian G., 2016b. Extent of Cropland and Related Soil Erosion Risk in Rwanda. Sustainability, 8(7), 609. <https://doi.org/10.3390/su8070609>
- Kassie M., Zikhali P., J. Pender and Köhlin G., 2010. The Economics of Sustainable Land Management Practices in the Ethiopian Highlands. Journal of Agricultural Economics, 61(3), 605-627. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2010.00263.x>
- Kiage L.M, 2013. Perspectives on the assumed causes of land degradation in the rangelands of Sub-Saharan Africa. Progress in Physical Geography, 37 (5), 664-684. <https://doi.org/10.1177/0309133313492543>

- König D., 1993. Dégénération et érosion des sols au Rwanda. (Projet Agricole et Social Interuniversitaire, Rwanda) Geographisches Institut Johannes Gutenberg-Universität. Mainz. Allemagne. p31-40
- Labrière N., Locatelli B., Laumonier Y., Freycon V., Bernoux M., 2015. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 203, 127-139.
- Lal, R., 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Dept. of Agronomy, The Ohio state University Columbus Ohio, 53-58.
- Lal, R., 1995. Erosion-Crop Productivity Relationships for Soils of Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:661-667. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900030004x>
- Lal, R., 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development*, 17: 197-209. <https://doi.org/10.1002/ldr.696>
- Lal, R., 2009. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security*, 1(1), 45-57. <https://doi.org/10.1007/s12571-009-0009-z>.
- Lal, R., 1983. Soil erosion in the humid tropics with particular reference to agricultural land development and soil management. *Hydrology of Humid Tropical Regions with Particular Reference to the Hydrological Effects of Agriculture and Forestry Practice (Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983)*. IAHS'Publ. no. 140.
- Lal, R., 1988. Soil degradation and the future of agriculture in sub-Saharan Africa. *Journal of soil*. 43 (6) pp.444 (0022-4561).
- Lal, R., 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Dept. of Agronomy, The Ohio state University Columbus Ohio, p.53-58.
- Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development* 12: 519-539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Lal, R., 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment international*, 29(4), 437-450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)

- Le Bissonnais Y., C. Montier, M. Jamagne, J. Daroussin, D. King, 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, 207-220. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00167-9)
- Ledermann, T., Herweg, K., Liniger, H.P., Schneider, F., Hurni, H., Prasuhn, V., 2008. Erosion damage mapping: assessing current soil erosion damage in Switzerland. *In*: Dazzi, C., Costantini, E. (Eds.), *The Soils of tomorrow: Advances in GeoEcology*, 39, 263–284.
- Li M, Zhang X, Zhen Q, Han F., 2013. Spatial Analysis of Soil Organic Carbon in Zhifanggou Catchment of the Loess Plateau. *PLoS ONE*, vol. 8, issue 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083061>
- Lombart O., 1996. Une nouvelle méthode de mesure de l'érosion hydrique : Exemples dans la vallée de l'Ailette. *In* : Travaux de l'Institut Géographique de Reims, vol. 24, n°93-94, 1996. Erosion et aléas naturels et cartographie. Pp.99-112. <https://doi.org/10.3406/tigr.1996.1337>
- Louvain Développement, 2008. Pauvreté rurale et insécurité alimentaire au Sud-Kivu : situation des milieux précarisés à l'Est de la République Démocratique du Congo. Médiaspaul. Sud-Kivu, RDC, 95pp.
- Lunze L., 1990. Possibilité de gestion des sols au Sud-Kivu montagneux. Rapport annuel de l'Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomique (INERA-Mulungu). Décembre, 1990. 28p.
- Lunze L., 1992. Comportement des variétés du haricot tolérantes à la toxicité aluminique en champs d'agriculteurs. Séminaire Régional. CIAT. Goma, RDC. Résultats d'une étude de base dans 4 localités près de Mulungu. Non paginé.
- Lunze L., 2000. Possibilités de gestion de la fertilité des sols au Sud-Kivu montagneux. *Cahiers du CERPRU*, 14, 23-26.
- M'Biandoun M. et Bassala JP.O.B, 2007. Savoir paysan et fertilité des terres au Nord-Cameroun. *Cahiers Agricultures*, 16 (3), 185-197. <https://doi.org/10.1684/agr.2007.0100>
- Maass B.L., Katunga M.D., Wanjiku L.C., Zozo R. and Peters M., 2010. Livelihoods of smallholders in South Kivu depend on small livestock: the case of the 'cobaye'. *In* Tropentag 2010. ETH Zurich, September 14-16, 2010. Conference on International Research on Food Security, Natural Ressource Management and Rural Development. 4pp.
- Majaliwa, J.G.M., Bashwira, S., Tenywa, M. and Kansiime, F. 2012. An overview of pollution loading into Lake Kivu basin. Third

- RUFORUM Biennial Meeting 24 - 28 September 2012, Entebbe, Uganda. pp. 861-868.
- Maki M.Jc. & Dewitte O., 2014. Vers un inventaire des glissements de terrain et des éléments à risque sur les versants du rift à l'ouest du lac Kivu (RDC). *Geo-Eco-Trop.*, 2014, 38, 1, 137-154.
- Mashi SA., Yaro A. and Jenkwe E.D., 2014. Causes and consequences of gully erosion: perspectives of the local people in Dangara area, Nigeria. *Environment, development and sustainability* 17 (6), 1431-1450. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9614-x>
- Mastaki N.J.L., Nfuamba L.F., et Rushigira C., 2013. Essai sur la durabilité des exploitations agricoles au Sud-Kivu. *L'Afrique des grands lacs. Annuaire 2012-2013*, p133-152.
- McQueen J. B., 1967. Some methods for classification analysis of multivariate observations. *Proc. 5th Berkeley Symp.* 1 :233-248.
- Meijer S.S, Catacutan D, Ajayi O.C, Sileshi G.W, Nieuwenhuis M., 2015. The role of knowledge, attitudes and perceptions in the uptake of agricultural and agroforestry innovations among smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(1), 40-54. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.912493>
- Moeyersons J, Tréfois Ph, Lavreau J, Alimasi D, Badriyo I, Mitima B, Mundala M, Munganga DO, Nahimana L., 2004. A geomorphological assessment of landslide origin at Bukavu, Democratic Republic of the Congo. *Engineering Geology* 72, 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.06.003>
- Moeyersons J., 1989. La nature de l'érosion des versants au Rwanda. *Recherches sur la colline de Rwaza (Runyinya-Butare) et observations dans la partie occidentale du pays suivies de quelques réflexions sur la lutte antiérosive. Musée Royal de l'Afrique Centrale. Tervuren. Annales Sciences Economiques*, 19. 396p.
- Moumami A., 2010. Analysis of Poverty in the Democratic Republic of Congo. *Working Paper* 112- 187.
- Muchena F.N., Onduru D.D., Gachini G.N. and De Jager A., 2005. Turning the tides of soil degradation in Africa: capturing the reality and exploring opportunities. *Land Use Policy* 22, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.07.001>

- Mucheru-Muna M., Pypers P., Mugendi D., Kung'u J., Mugwe J., Merckx R., Vanlauwe B., 2010. A staggered maize-legume intercrop arrangement robustly increases crop yields and economic returns in the highlands of Central Kenya. *Field Crops Research* 115 (2010) 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.013>.
- Mufungizi, N.A., 2016. Agricultural Market Failures and Peasants' Welfare in South Kivu. Thèse (Dissertation). UCL. <http://hdl.handle.net/2078.1/17623>
- Mulugeta D and Stahr K., 2010. Assessment of integrated soil and water conservation measures on key soil properties in South Gonder, North-Western Highlands of Ethiopia. *Journal of Soil Science and Environmental Management* 1(7), 164-176.
- Mutombo T., Phezo P., Munyandamusa F., Lutaladio N.B., Ewell P.T., 1999. Pomme de terre et patate douce au Bushi : Impact socio-économique de la présence des réfugiés rwandais et synthèse des résultats de recherche au programme national de recherche sur les tubercules. INRA/Mulungu (1994-1998). Ed. CERPRU. 57p.
- Muzaliwa O.S., J. Norbert, F. Mtalo and Ndomba P.M., 2014. Sediment yields estimation and sources identification in Lake Tanganyika basin- the case of Mulongwe sub catchment - Uvira city - DR Congo. *Standard Global Journal of Geology and Explorational Research* 1(2): 032- 042.
- Nabahunu N.L., 2012. Problems and opportunities of wetland management in Rwanda. Thesis, Wageningen University, The Netherlands. 134p.
- Nabahunu N.L. and Visser, S.M., 2011. Farmers' knowledge and perception of agricultural wetland management in Rwanda. *Land Degradation and Development* 14p. <https://doi.org/10.1002/ldr.1133>.
- Nabahunu N.L., Van Beek C.L., Visser S.M., Mowo J.G. and Vanlauwe B., 2011. Nutrient resource flows in agricultural wetland and hillside fields in Rwanda, as affected by farmer's resource endowments. *Agriculture, ecosystems and environment*. pp67-83. Chapter of Thesis dissertation: Problems and opportunities of wetland management in Rwanda. Wageningen University 134p.
- NASA and METI, 2011. (Accessed, May 2015). ASTER Global Digital Elevation. Model-GDEM V2. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- Ngondjeb Y., Nje P., Harvard M., 2011. Déterminants de l'adoption des techniques de lutte contre l'érosion hydrique en zone cotonnière du Cameroun. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des pays*

- tropicaux, 64 (1-4): 9-19.
http://remvt.cirad.fr/revue/notice_fr.php?dk=569601
- Nijimbere G. and Lizana C.R., 2019. Assessment of soil erosion of Burundi using remote sensing and GIS by RUSLE model. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 27 (1); 17-28.
<https://doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-1-17-28>
- Ntamwira J., Blomme G., Bahati L., Ocimati W., 2019. Effect of timing of diseased plant cutting, altitude and banana cultivar on efficacy of singly removing *Xanthomonas* wilt infected banana plants. *Eur J Plant Pathol*.154: 477-489 <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01671-9>
- Nyssen J., Poesen J. and Deckers J., 2009. Land degradation and soil and water conservation in tropical highlands. *Soil & Tillage Research* 103 (2009) 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.08.002>
- Okoba B.O. and de Graaff J., 2005. Farmers' knowledge and perceptions of soil erosion and conservation measures in the central highlands of Kenya. *Land Degradation and Development*, 16 (5), 475-487.
<https://doi.org/10.1002/ldr.678>
- Okoba B.O. and Sterk G., 2006a. Farmers' identification of erosion indicators and related erosion damage in the Central Highlands of Kenya. *Catena*, 65(3), 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.12.004>
- Okoba, B.O. and Sterk, G., 2006b. Quantification of visual soil erosion indicators in Gikuuri catchment in the central highlands of Kenya. *Geoderma*, 134 (1-2), 34-47.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.08.013>
- Oldeman, L.R., 1992. Global Extent of Soil Degradation. Published in *ISRIC Bi-Annual Report 1991-1992*, Wageningen, The Netherlands; 19-36.
- Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L. and Alewell C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Panagos, P., Karydas C.G., Ballabio, C., Gitas, I.Z. 2014. Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27, Part B, pp. 147-155

- Pécrot A., et Léonard A., 1960. Notice explicative de la carte des sols et de la végétation de la dorsale du Kivu. Publications de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo-Belge (INEAC). Bruxelles. 137p.
- Pimentel, D., & Kounang, N., 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1(5), 416-426. <https://doi.org/10.1007/s100219900035>
- Pineux N., J. Lisein, G. Swerts, C.L. Biélders, P. Lejeune, G. Colinet, A. Degré, 2017. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? *Geomorphology*, 280, 122-136. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.003>
- Place F., Pender J., Ehui S., 2006c. Key issues for the sustainable development of smallholder agriculture in the East African highlands, in *Strategies for Sustainable Land Management in the East African Highlands*, eds Pender J., Place F., Ehui S., editors. (Washington, D.C: International Food Policy Research Institute); 1-30
- Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50 (2003) 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
- Poesen, J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In *Farmland Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*, S. Wicherek (ed.). Elsevier, Amsterdam, pp. 221-239.
- Poulton, C., Dorward, A., & Kydd, J., 2010. The future of small farms: New directions for services, institutions, and intermediation. *World Development*, 38(10), 1413-1428. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.06.009>
- Prasuhn V., 2011. Soil erosion in the Swiss midlands: Results of a 10-year field survey. *Geomorphology*, 126, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.023>
- Pypers P., Sanginga J.M., Kasereka B., Walangululu M., Vanlauwe B., 2010. Increased productivity through integrated soil fertility management in cassava-legume intercropping systems in the highlands of Sud-Kivu, DR Congo. *Field Crops Research* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.004>
- Ragasa C, Ulimwengu J., Randriamamonjy J and Badibanga T., 2015. Factors Affecting Performance of Agricultural Extension: Evidence from Democratic Republic of Congo. *Journal of Agricultural Education and Extension*, 22(2), 113-143. <http://dx.doi.org/10.1080/1389224X.2015.1026363>

- Rishirumuhirwa T. and Roose E., 1998. The contribution of banana farming systems to sustainable land use in Burundi. In : Blume H.P. (ed.), Eger H. (ed.), Fleischhauer E. (ed.), Hebel A. (ed.), Reij C. (ed.), Steiner K.G. (ed.) Towards sustainable land : use furthering cooperation between people and institutions. (31), 1197-1204. (Advances in Geocology, 31). ISBN 3-923381-42-5.
- Rishirumuhirwa T., 1994. Facteurs anthropiques de l'érosion dans les montagnes et hauts plateaux au Burundi, Rwanda et Zaïre. In: Cahiers d'outre-mer, 185, 47^{ème} année, 23-34. <https://doi.org/10.3406/caoum.1994.3502>
- Roose E., 1993. Innovations dans la conservation et la restauration des sols. Cah. Orstom, sér. Pédol. XXVIII (2); 147-155.
- Roose E. et Piot J., 1984. Ruissellement, érosion et restauration de la fertilité des sols sur le plateau Mossi (Haute-Volta). Symp. "Challenges in African hydrology and water resources" Harare, Juillet. 13 p
- Roose E. et Sarrailh J.M., 1989. Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., 25, (1-2), 7-30
- Roose E., Ndayizigiye F., Sekayange L. et Nsengimana J., 1992. La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GOCES) : 'Une nouvelle stratégie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement en montagne. In : Réseau Erosion, Bulletin 12. Montpellier, p. 140 - 160
- Rutebuka, J., Kagabo, D. M., & Verdoodt, A., 2019. Farmers' diagnosis of current soil erosion status and control within two contrasting agro-ecological zones of Rwanda. Agriculture, ecosystems & environment, 278, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.03.016>
- Sattler C., and Nagel U.J., 2010. Factors affecting farmers' acceptance of conservation measures-A case study from north-eastern Germany. Land Use Policy 27, 70-77.
- Scherr, S.J., 2003. Productivity-related economic impacts of soil degradation in developing countries: an evaluation of regional experience. In: K. Wiebe, ed. Land Quality, Agricultural Productivity, and Food Security. UK, Cheltenham, Edward Elgar; 223-261.
- Scholten, T., & Seitz, S., 2019. Soil Erosion and Land Degradation. Soil Systems 3, 68. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3040068>

- Schut M., van Asten P., Okafor C., Hicintuka C., Mapatano S., Nabahungu N.L., Kagabo D., Muchunguzi P., Njukwe E., Dontsop-Nguezet P.M., Sartas M. and Vanlauwe B., 2016. Sustainable intensification of agricultural systems in the Central African Highlands: The need for institutional innovation. *Agricultural Systems* 145, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.03.005>
- Scopel E., Triomphe B., Affholder F., Macena da Silva F.A., Corbeels M., Valadares J.H., Xavier R., Lahmar S., Recours M., Bernoux E., Blanchart I.C., Mendes and de Tourdonnet S., 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 33: 133-130 <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0106-9>
- Senthikumar K., Bindraban P.S., de Boer W., de Ridder N., Thiagarajan T.M., Giller K.E., 2009. Characterising rice-based farming systems to identify opportunities for adopting water efficient cultivation methods in Tamil Nadu, India. *Agricultural Water Management* 96, 1851-1860. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.007>
- Shiferaw B., Okello J., Reddy R.V., 2009. Adoption and adaptation of natural resource management innovations in smallholder agriculture: reflections on key lessons and best practices. *Environ Dev Sustain* 11, 601-619.
- Shimelis G.S., Ragahavan S., Bijan D., and Assefa M.M., 2009. Spatial delineation of soil erosion vulnerability in the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrol. Process.* 23, 3738-3750. <https://doi.org/10.1002/hyp.7476>
- Steinhoff-Knopp B. and Burkhard B., 2018. Soil erosion by water in Northern Germany: long-term monitoring results from Lower Saxony. *Catena*, 165, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.017>
- Taguas V., Guzmán E., Guzmán G., Vanwalleghem T., Gómez J.A., 2015. Characteristics and importance of rill and gully erosion: a case study in a small catchment of a marginal olive grove. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(1), 107-126. <https://doi.org/10.18172/cig.2644>
- Takele L, Chimdi A, Abebaw A., 2015. Socio-economic Factors Affecting Soil Fertility Management Practices in Gindeberet Area, Western Ethiopia. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 4(1), 149-153. <https://doi.org/10.4314/star.v4i1.25>
- Tefera B. and Sterk G., 2010. Land management, erosion problems and soil and water conservation in Fincha'a watershed, western Ethiopia.

- Land Use Policy 27 (4), 1027-1037
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.01.005>
- Tenge A.J., de Graaff J., Hella J.P., 2004. Social and economic factors affecting the adoption of soil and water conservation in West Usambara highlands, Tanzania. *Land Degradation & Development*, 15(2), 99-114. <https://doi.org/10.1002/ldr.606>
- Tesfaye A., Negatu W., Brouwer R. and van der Zaag P., 2014. Understanding soil conservation decision of farmers in the Gedeb watershed, Ethiopia. *Land Degradation and Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.2187>
- Teshome A., de Graaff J. and Kassie M., 2016. Household level determinants of soil and water conservation adoption phases in the north-western Ethiopian highlands. *Environmental Management*, 57: 620. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0635-5>
- Teshome A., de Graaff J., Ritsema C., Kassie M., 2014. Farmers 'perceptions about influence of land quality, land fragmentation and tenure systems on sustainable land management investments in the North Western Ethiopian Highlands. *Land degradation and development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.2298>
- Tittonell P., Muriuki A., Shepherd K.D., Mugendi D., Kaizzi K.C., Okeyo J., Verchot L., Coe R. and Vanlauwe B., 2010. The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa -A typology of smallholder farms. *Agricultural systems*, 103, 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.10.001>
- Tittonell P., Vanlauwe B., Leffelaar P.A., Rowe E.C., Giller K.E., 2005. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: I. Heterogeneity at region and farm scale. *Agriculture. Ecosystems and Environment* 110, 149-165. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.001>
- Tollens, E., 2004. Les Defis: Securite Alimentaire Et Cultures De Rente Pour L'Exportation--Principales Orientations Et Avantages Comparatifs De L'Agriculture En RD Congo (No. 1067-2016-86827).
- Tondeur G., 1954. Erosion du sol spécialement au Congo Belge. Publication des services de l'agriculture du ministère des colonies et du Gouvernement général du Congo-Belge. 3ème Edition. 237p.
- Ulimwengu J, Funes J, Headey D, You L., 2009. Paving the way for development: The impact of road infrastructure on agricultural production and household wealth in the Democratic Republic of Congo. In Annual Meeting, 26-28. IFPI Discussion Paper 00944.

- International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington, DC, USA, 48.
- UNFPA (UN Population Division, Department of Economic and Social Affairs), 1995. Population and Land Degradation. FAO/UNFPA TSS. Document pdf. 31p.
- Valbuena D., Homann-Kee Tui S., Erenstein O., Teufel N., Duncan A., Abdoulaye T., Swain B., Mekonnen K., Germaine I. and Gérard B., 2015. Identifying determinants, pressures and trade-offs of crop residue use in mixed smallholder farms in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Agricultural Systems* 134, 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.013>
- Valentin C., Poesen J. and Yong Li, 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, 63, 132-153. <https://doi.org/10.1006/j.catena.2005.06.001>
- van Asten P., S. Kaaria, A.M. Fermont and R.J. Delve, 2009. Challenges and lessons when using farmer knowledge in agricultural research and development projects in Africa. *Experimental Agriculture*, 45, 1-14. <https://doi.org/10.1017/S0014479708006984>
- van Asten P., Vanlauwe B., Ouma E., Pypers P., Van Damme J., Blomme G., Lepoint P., Ntamwira J., Bouwmeester H., Birachi E., Jassogne L., Muliele T., Bizimana S., Nibasumba A., Delstache S., Baret P.V., Sanginga J., Bafunyembaka F. and Manzekele M., 2013. CIALCA's efforts on integrating farming system components and exploring related trade-offs. In: *Agro-Ecological Intensification of Agricultural Systems in the African Highlands*. Routelage Londres and Newyork. p.117-133.
- van de Steeg J.A., Verburg P.H., Baltenweck I., Staal S.J. 2013. Characterization of the spatial distribution of farming systems in the Kenyan Highlands. *Applied Geography*, 30-2, 239-253. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.05.005>
- Van Oost K., Quine T. A., Govers G., De Gryze S., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J.V., Marques da Silva J.R., Merckx R., 2007. The Impact of Agricultural Soil Erosion on the Global Carbon Cycle. *Science*, 318 (5850), 626-629. <https://doi.org/10.1126/science.1145724>
- Van Ranst E., Baert G., Ngongo M.L., Mafuka P.M., 2010. Carte pédologique de la R.D. Congo : Dorsale du Kivu, carte de reconnaissance. ISBN 9789491114410.

- van Straaten P., 2002. Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338pp.
- Verdoodt, A., and Van Ranst E., 2003. Land Evaluation for Agricultural Production in the Tropics. A Large-Scale Land Suitability Classification for Rwanda. Ghent University. Laboratory of Soil Science.175p. <http://hdl.handle.net/1854/LU-212638>
- Visser, S. M., Leenders, J. K., & Leeuwis, M., 2003. Farmers' perceptions of erosion by wind and water in northern Burkina Faso. *Land Degradation & Development*, 14 (1), 123-132.
- Vrieling A., 2006. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena* 65; 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005>
- Walling, D. E., & Webb, B. W., 1996. Erosion and sediment yield: a global overview. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 236, 3-20.
- Wauters, E., Biolders, C., Poesen, J., Govers, G., Mathijs, E., 2010. Adoption of soil conservation practices in Belgium: An examination of the theory of planned behaviour in the agri-environmental domain. *Land Use Policy*, 27(1), 86-94
- Wells, R. R., Momm, H. G., Bennett, S. J., Gesch, K. R., Dabney, S. M., Cruse, R., & Wilson, G. V., 2016. A Measurement Method for Rill and Ephemeral Gully Erosion Assessments. *Soil Science Society of America Journal*, 80(1), 203-214. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0320>
- Wickama J, Okoba B, Sterk G., 2014. Effectiveness of sustainable land management measures in West Usambara highlands, Tanzania. *Catena*, 118, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.013>
- Wildemeersch JCJ, Timmerman E, Mazijn B, Sabiou M, Ibro G, Garba M, Cornelis W., 2015. Assessing the constraints to adopt water and soil conservation techniques in Tillabéri, Niger. *Land Degradation & Development*, 26(5), 491-501. <https://doi.org/10.1002/ldr.2252>
- Wils W., Caraël M., et Tondeur G., 1986. Le Kivu montagneux : Surpopulation-Sous nutrition-Erosion du sol (Etude prospective par simulations mathématiques). Académie Royale des Sciences d'Outre-mer. Classe des sciences naturelles et médicales. Mémoires In Nouvelle série 8,. Tome 21, fasc. 3, Bruxelles. 201p.

- Wirtz S., Seeger M. and Ries J.B., 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.002>
- Yan, L., Lei, T., Zhang, J., Zhang, Q. and Qu, L., 2015. Finite element method for one-dimensional rill erosion simulation on a curved slope. *International Soil and Water Conservation Research* 3, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.001>
- Zirirane D.N., Majaliwa J.G.M., Muhigwa B.J.B., Mushagalusa N.G., Karume K., Bagalwa M., 2015. Efficacité de rétention des polluants par les marais Ciranga et Kabamba du Lac Kivu, République Démocratique du Congo. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement* (en ligne), 15 (1). <https://doi.org/10.4000/vertigo.16027>

ANNEXES

ANNEXES A.

Tableau A.1. Facteurs et critères d'observation pour la caractérisation des contextes (Territoire et parcelle agricole).

N°	Facteur à observer	Critères à considérer	Caractéristiques	Sources
I	Contextes biophysiques			
1.	Sol	Type	En Système International et vernaculaire locale	Groupelements villageois
		Etat	Très dégradé, Dégradé, Moyennement dégradé, non dégradé (lessivage)	Organisations locales de développement
		Réaction	Acide, alcalin ou salin	Observations et mesure de terrain
		Granulométrie	Sableux, argileux, limoneux et mélanges entre les trois.	Analyse des échantillons et bibliographie
		Structure	Grumeleuse, dispersée, massive...	Observations et bibliographie
		Fertilité	Forte, moyenne, faible, très faible.	Groupelements villageois
2	Climat	Type	Froid, humide, très humide, sec	Bibliographie
3	Relief (géomorphologie)	Forme	Dominante, succession, variation d'altitude...	Observations
4	Pression abiotique	Etat (pressions directes et indirectes)	Destruction de milieux naturels, fragmentation des parcelles, sédimentation, déforestation...	Observations et avis de l'administration locale
II	Contextes socioéconomiques			
1	Démographie	Nombre d'habitants	Taux de la population par villages, localité, groupements et territoire	Administrations sanitaires et étatiques

N°	Facteur à observer	Critères à considérer	Caractéristiques	Sources
2	Accès aux marchés	Existence au niveau local et externe	Nombre et distance d'accès entre différents villages au sein du territoire	Administrations locales
3	Services de vulgarisation	Existence ou non au niveau du territoire	Nombre et composition d'équipes de vulgarisation au niveau du territoire	Administration locale
4	Finance des ménages	Liquidité au niveau des ménages	Revenu moyen du ménage	Enquêtes ménages
5	Superficies exploitées par ménage	Champs en propriété ou en location	Nombre et dimensions des parcelles	Enquêtes ménages
6	Existence ou non des conflits fonciers	Répartition des champs au niveau des villages	Nombre des champs en conflits et taux des contrats fonciers	Administration locale et enquêtes ménages
7	Utilisation de la fumure (Organique et inorganique)	Types des fertilisants utilisés	Quantité des fertilisants utilisés par ménage; quantité et lieux d'approvisionnement disponibles au sein du territoire	Administration locale et enquêtes ménages
8	Elevages	Types d'élevages	Nombre des têtes pour chaque type et nombres des fermes répertoriées par territoire	Enquêtes ménages et Administration locale
9	Outils agricoles et mécanisation	Types d'outils de travail de la terre	Nombre et qualité d'outils et/ou machines agricoles utilisées	Enquêtes ménages et administration locale.

Tableau A.2. Répartition des intervalles de pentes au sein de chacun des huit bassins de la dorsale du Kivu.

Bassin versant	Intervalles de pentes				
	<10%	10-20%	20-30%	30-40%	>40%
Kal1	17,8	26,8	22,3	15,3	17,8
Kal2	12,6	35,8	33,2	15,4	3,1
Kab1	29,4	30,2	20,1	12,1	8,1
Kab2	16,4	24,0	21,3	15,9	22,4
Idj1	9,1	21,7	27,3	22,5	19,4
Idj2	13,4	30,1	29,8	17,1	9,7
Wal1	21,7	17,8	16,5	13,6	30,3
Wal2	16,8	22,6	18,1	14,4	28,1

Tableau A.3. Caractéristiques importantes des différents types de fermes agricoles selon la catégorisation des ménages enquêtés au sein de la dorsale du Kivu. RD. Congo

Type de ferme	Ressources disponibles; source des revenus et orientation de la production agricole sur le marché	Principales caractéristiques
1	Ressources disponibles moyennes à faibles; production destinée principalement à la vente; les revenus proviennent faiblement de l'agriculture.	Superficie totale moyenne à faible; quantité de main d'œuvre familiale assez élevée, pratique de l'agriculture et d'autres activités génératrices des revenus ainsi que du petit élevage et rarement, l'élevage de vache; les ménages pauvres et très pauvres sont majoritaires.
2	Faibles à très faibles ressources disponibles; orientation de production agricole mixte (vente et autoconsommation); les revenus proviennent majoritairement de l'agriculture.	Superficie totale moyenne à faible; très faible quantité de main d'œuvre familiale; pratique de l'agriculture et d'autres activités génératrices des revenus ainsi que du petit élevage et rarement, l'élevage du porc ou de la vache; les ménages pauvres et très pauvres sont majoritaires.
3	Ressources élevées à moyennes; orientation de production agricole mixte; revenus proviennent majoritairement de l'agriculture et d'autres sources.	Superficie totale élevée; main d'œuvre familiale en quantité élevée à moyenne; pratique de l'agriculture et d'autres activités génératrices des revenus ainsi que la pratique de l'élevage de vache ou du porc ainsi que du petit élevage. Les ménages riches sont beaucoup plus représentés et le nombre des très pauvres en baisse.
4	Faibles à très faible ressources disponibles; production agricole destinée principalement à la vente; les revenus proviennent essentiellement de l'agriculture.	Superficie totale faible à très faible; très faible quantité de main d'œuvre familiale; pratique de l'agriculture et d'autres activités génératrices des revenus ainsi que du petit élevage et rarement l'élevage du porc ou de la vache; les ménages très pauvres sont majoritaires.

Tableau A.4. Contributions (lignes) pour l'analyse de la correspondance (ACP) entre les variables socio-économiques et les facteurs pour la typologie des exploitations agricoles

	F1	F2	F3	F4
Superficie totale (ha)	0,480	-0,470	0,709	-0,215
Main d'œuvre familiale	0,629	-0,297	-0,329	0,639
Cultures à orientation vente	0,630	0,169	-0,441	-0,616
Agriculture source des revenus	0,378	0,808	0,384	0,238
Type de ferme -1	0,566	0,135	-0,341	-0,544
Type de ferme-2	-0,616	0,071	0,405	-0,137
Type de ferme-3	0,169	-0,212	-0,091	0,650
Type de ferme-4	0,208	0,092	-0,253	-0,252

Note : Les résultats correspondant aux variables supplémentaires sont affichés dans la seconde partie du tableau

Table A.5. Loading contributions (rows) for correspondence analysis between SWC measures/techniques and their adoption constraints.

SWC	Weight	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
SMFS	0,222	0,001	0,130	0,205	0,205	0,080	0,056	0,001	0,003	0,000	0,039	0,036	0,001
NAW	0,151	0,008	0,258	0,026	0,091	0,008	0,134	0,006	0,003	0,031	0,072	0,159	0,006
LAZF	0,083	0,009	0,032	0,000	0,057	0,005	0,013	0,017	0,280	0,228	0,224	0,037	0,000
ENOP	0,084	0,041	0,042	0,564	0,011	0,023	0,002	0,014	0,000	0,012	0,129	0,006	0,002
UNSM	0,045	0,001	0,002	0,028	0,297	0,038	0,012	0,027	0,015	0,121	0,022	0,025	0,052
REQM	0,094	0,003	0,017	0,014	0,003	0,293	0,027	0,002	0,076	0,013	0,015	0,177	0,001
DINSL	0,093	0,000	0,005	0,000	0,006	0,385	0,008	0,006	0,001	0,072	0,079	0,100	0,000
TNARP	0,075	0,006	0,023	0,082	0,034	0,026	0,024	0,009	0,044	0,099	0,300	0,120	0,000
NOINT	0,013	0,002	0,010	0,012	0,005	0,090	0,235	0,002	0,015	0,001	0,024	0,002	0,133
GDHP	0,032	0,587	0,002	0,023	0,006	0,006	0,005	0,002	0,090	0,153	0,000	0,002	0,011
DWMC	0,031	0,305	0,004	0,004	0,006	0,000	0,000	0,001	0,193	0,210	0,003	0,004	0,020
NOFT	0,064	0,032	0,463	0,016	0,202	0,000	0,099	0,000	0,001	0,002	0,024	0,075	0,002
MHPP	0,004	0,001	0,002	0,002	0,005	0,007	0,009	0,630	0,027	0,032	0,000	0,014	0,219
TBC	0,004	0,000	0,004	0,016	0,011	0,035	0,308	0,071	0,004	0,010	0,009	0,039	0,279
NOL	0,003	0,000	0,005	0,005	0,056	0,001	0,066	0,021	0,244	0,014	0,056	0,201	0,034
NOIV	0,002	0,001	0,001	0,002	0,004	0,003	0,002	0,191	0,004	0,002	0,004	0,003	0,240

Table A.6. Rainfall events[n], daily amount and standard deviation (SD) and the total rainfall amount [mm] in the monitored four rainy seasons 2015-2017, grouped by watershed

Rainy seasons	Wal2 watershed			Kab2 watershed		
	number of events	daily amount (mean $\pm$ SD)	Total amount	number of events	daily amount (mean $\pm$ SD)	Total amount
SA2015	72	8.4 $\pm$ 9.2	603.5	53	10.7 $\pm$ 10.6	569.4
SB2016	34	7.8 $\pm$ 7.5	263.5	44	11.3 $\pm$ 11.2	496.6
SA2016	38	7.9 $\pm$ 7.4	301.8	42	11.3 $\pm$ 10.5	474.5
SB2017	41	8.3 $\pm$ 7.7	341.6	47	10.6 $\pm$ 11.1	498.7

SA: the long rainy season (September-January); **SB:** short rainy season (February-May).

Table A.7. Statistics summary of the damaged area soil loss by rill erosion (minimum and maximum), average “whole field” minimum rill loss rate, and gully erosion [mm] for four seasons from 2015 to 2017, grouped by watershed. (Means analysis were performing on damaged areas minimum and maximum rill erosions and, gully erosion rates using square root transformed data)

Season	Statistic	Rill erosion rate (mm)							Gully erosion rate (mm)		
		Minimum			Maximum			Whole field minimum rill			
		Wal2	Kab2	All	Wal2	Kab2	All		Wal2	Kab2	All
SA2015	N	57	54		57	54		N	45	45	
	Min.	0.53	0.42	0.42	1.19	1.12	1.12				
	Max.	7.32	15.49	15.49	20.28	34.17	34.17				
	*Mean	3.57	2.56	3.08 <i>a</i>	10.25	6.08	8.22 <i>a</i>				
	Std.	1.66	2.56		4.88	5.81					
SB2016	N	53	52		53	52		Min	0.25	0.07	
	Min.	0.20	0.13	0.13	0.36	0.37	0.36				
	Max.	2.45	10.99	10.99	9.09	31.03	31.03				
	*Mean	1.02	2.49	1.75 <i>b</i>	2.47	6.52	4.48 <i>b</i>				
	Std.	0.60	2.53		1.60	6.69					
SA2016	N	45	45		45	45		Max	3.10	7.06	
	Min.	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03				
	Max.	14.11	17.30	17.30	17.86	33.67	33.67				
	*Mean	1.74	2.71	2.22 <i>b</i>	2.51	5.73	4.12 <i>b</i>				
	Std.	2.43	3.91		3.53	8.58					
SB2017	N	48	36		48	36		Mean	1.16	1.39	
	Min.	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03				
	Max.	12.14	17.99	17.99	34.16	31.76	34.16				
	*Mean	2.89	3.62	3.20 <i>a</i>	5.94	7.91	6.78 <i>a</i>				
	Std.	2.49	4.39		6.30	9.50					

*Means with the same letters in the column [All] are not significantly different (P -value < 0.05). (Wal2=Wal2 watershed (WValungu) and Kab1=Kab2 watershed (Kabare)).

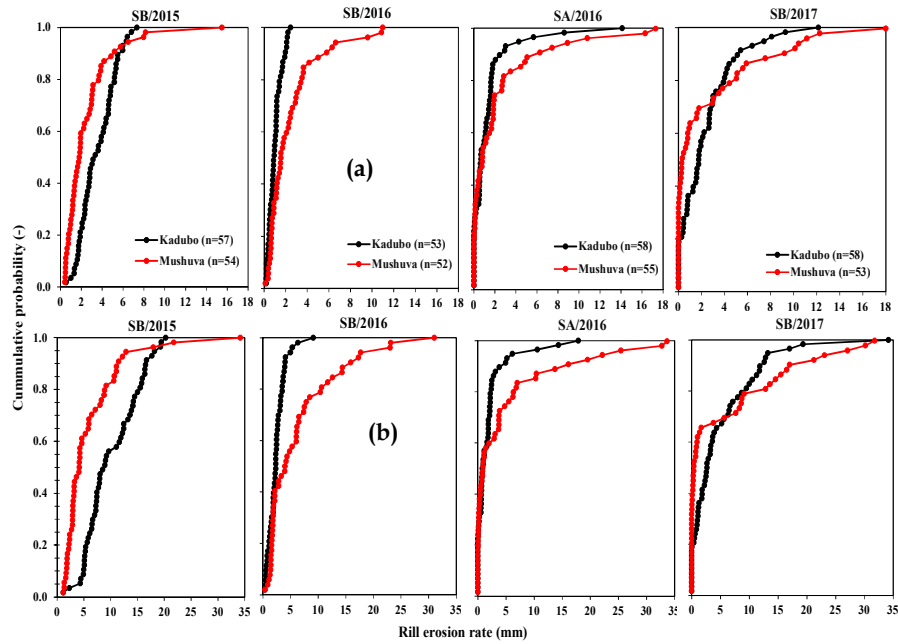


Figure A.1. Cumulative probability of occurrence of soil losses, plotted by minimum (a) and maximum (b) rill erosion rates for the four monitored seasons (2015-2017), grouped by watershed (Wal2 and Kab1). SA: the long rainy season; SB: the short rainy season.

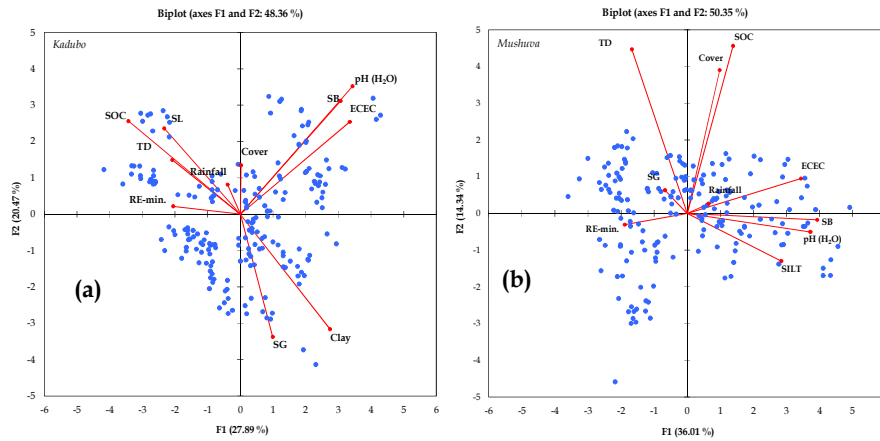


Figure A.2. Summary result of principal component analysis (PCA) to link minimum rill erosion loss rate with major explanatory variables at plot scale (damaged area) (RE-min), plotted by watershed (a) Wal2=Kadubo and (b) Kab2= Mushuva (TD: topsoil depth, SOC: soil organic carbon, SL: slope length, Rainfall, Cover: soil cover, SB: sum of bases, pH(H₂O): pH-water, ECEC: effective cationic exchange capacity, CLAY: soil clay content, SG: slope gradient, and SILT: soil silt content).

Table A.8. Spearman correlation coefficients among soil properties and rill and gully erosion for the two watersheds separately

Variables	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
a). Wal2															
1. pH (H ₂ O)	1														
2. SOC	-0.22	1													
3. SB	0.83	-0.22	1												
4. ECEC	0.55	-0.24	0.90	1											
5. SAND	-0.08	0.85	-0.17	-0.28	1										
6. CLAY	-0.03	-0.75	-0.01	0.09	-0.88	1									
7. SILT	0.21	-0.09	0.35	0.35	-0.09	-0.39	1								
8. CLAY+ SILT	0.08	-0.85	0.17	0.28	-1.00	0.88	0.09	1							
9. SU	-0.19	-0.11	-0.22	-0.23	0.03	0.06	-0.18	-0.03	1						
10. SG	-0.26	-0.28	-0.20	-0.05	-0.36	0.34	-0.01	0.36	0.10	1					
11. SL	0.00	0.31	0.00	-0.07	0.23	-0.33	0.23	-0.23	0.12	-0.20	1				
12. Cover	0.16	0.13	0.13	0.05	0.09	-0.11	0.06	-0.09	-0.03	0.01	0.15	1			
13. TD	-0.13	0.39	-0.12	-0.12	0.30	-0.27	-0.01	-0.30	-0.14	-0.38	0.07	0.11	1		
14. RE-min.	-0.35	0.47	-0.37	-0.31	0.29	-0.33	0.13	-0.29	-0.09	-0.11	0.45	-0.18	0.31	1	
15. GE	-0.03	-0.10	-0.13	-0.12	-0.14	0.17	-0.09	0.14	-0.13	-0.14	-0.05	0.05	0.15	0.32	1
b). Kab2															
1. pH (H ₂ O)	1														
2. SOC	0.20	1													
3. SB	0.90	0.21	1												
4. ECEC	0.77	0.19	0.92	1											
5. SAND	-0.13	0.09	-0.09	-0.08	1										
6. CLAY	-0.28	-0.13	-0.39	-0.33	-0.71	1									
7. SILT	0.54	0.07	0.64	0.54	-0.22	-0.53	1								
8. CLAY+ SILT	0.13	-0.09	0.09	0.08	-1.00	0.71	0.22	1							
9. SU	0.02	0.12	0.02	-0.11	0.20	-0.19	0.03	-0.20	1						
10. SG	-0.10	-0.17	-0.14	-0.13	-0.42	0.30	0.09	0.42	-0.40	1					
11. SL	-0.22	-0.01	-0.35	-0.25	0.17	0.12	-0.36	-0.17	0.09	-0.07	1				
12. Cover	0.22	0.38	0.15	0.14	-0.17	0.18	-0.04	0.17	0.19	-0.10	0.22	1			
13. TD	-0.51	0.11	-0.48	-0.31	0.09	0.16	-0.33	-0.09	-0.04	0.18	0.27	0.21	1		
14. RE-min.	-0.57	-0.29	-0.56	-0.39	0.17	0.07	-0.30	-0.17	-0.18	0.25	0.09	-0.31	0.33	1	
15. GE	-0.29	-0.47	-0.39	-0.32	0.07	0.10	-0.22	-0.07	-0.03	0.05	0.04	-0.22	0.25	0.32	1

Table A.9. Factors loadings for PCA to link seasonal minimum rill erosion loss rate (RE-min (mm)) with major explanatory variables at whole field scale for both watersheds

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
pH	0.73	-0.47	-0.01	0.01	0.17	-0.13	-0.10	-0.12	0.14	-0.15	0.28	0.22	-0.05
SOC	-0.50	-0.65	-0.13	0.17	-0.30	-0.10	-0.07	-0.12	0.15	0.07	-0.28	0.25	0.00
SB	0.85	-0.45	-0.10	-0.02	0.10	-0.08	-0.06	0.07	0.16	0.00	-0.01	-0.04	0.13
ECEC	0.82	-0.30	-0.22	0.00	0.08	-0.09	-0.10	0.18	0.22	0.09	-0.20	-0.20	-0.08
SAND	-0.68	-0.66	0.01	-0.11	-0.01	-0.08	-0.05	-0.18	0.06	-0.12	0.08	-0.18	0.00
CLAY	0.47	0.79	0.19	0.17	-0.04	-0.11	-0.14	0.14	0.05	0.10	-0.05	0.13	0.00
SILT	0.44	-0.34	-0.48	-0.14	0.12	0.42	0.42	0.07	-0.26	0.03	-0.05	0.09	-0.01
SU	-0.23	-0.18	0.67	0.09	0.30	0.38	0.33	0.09	0.33	0.04	-0.03	0.02	0.00
SG	0.26	0.56	-0.30	0.03	-0.46	0.18	0.26	-0.19	0.31	-0.29	0.00	-0.04	0.00
SL	-0.18	0.03	-0.22	0.67	0.27	0.43	-0.39	0.02	-0.04	-0.21	-0.04	-0.02	0.01
Cover	0.23	-0.10	0.00	0.81	-0.06	-0.22	0.33	-0.22	-0.07	0.23	0.08	-0.08	0.00
TD	-0.60	-0.06	-0.25	0.23	0.04	-0.37	0.24	0.53	0.06	-0.19	0.07	0.03	0.00
RE-min.	-0.58	0.22	-0.55	-0.10	0.10	0.18	-0.11	0.02	0.28	0.37	0.18	0.02	0.00
GE	-0.21	0.44	-0.24	-0.11	0.66	-0.33	0.15	-0.30	0.07	-0.09	-0.16	0.03	0.01

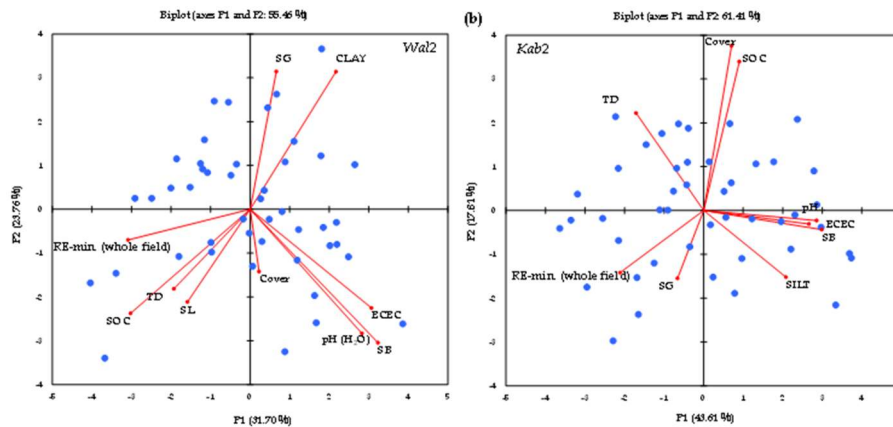


Figure A.3. Summary result of principal component analysis (PCA) to link seasonal minimum rill erosion rate with major explanatory variables at 'whole field' scale (RE-min.- whole field), plotted by watershed (Wal2 and Kab2) (TD: topsoil depth, SOC: soil organic carbon, SL: slope length, Rainfall, Cover: soil cover, SB: sum of bases, pH(H₂O): pH-water, ECEC: effective cationic exchange capacity, CLAY: soil clay content, SG: slope gradient, and SILT: soil silt content). Factor loadings are provided in supplementary materials.

Table A.10. Factors loadings for PCA to link seasonal minimum rill erosion loss rate (RE-min (mm)) with major explanatory variables at whole field scale for Wal2 watershed

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
RE- whole field	-0.72	-0.14	-0.21	0.38	0.18	0.28	0.25	0.30	-0.07	0.01
Cover	0.05	-0.29	0.87	-0.28	0.21	0.03	0.01	0.19	-0.05	0.00
pH (H ₂ O)	0.66	-0.57	-0.02	0.03	0.02	-0.18	0.43	-0.07	0.09	-0.05
SOC	-0.71	-0.48	0.11	-0.05	-0.37	0.08	-0.06	0.06	0.32	0.00
SB	0.76	-0.62	-0.06	0.11	-0.03	0.14	0.00	0.00	0.00	0.10
ECEC	0.72	-0.46	-0.11	0.14	-0.07	0.40	-0.26	0.10	-0.03	-0.07
CLAY	0.51	0.64	-0.09	-0.03	0.48	0.08	-0.03	0.12	0.27	0.01
TD	-0.45	-0.37	-0.19	-0.56	0.33	0.38	0.05	-0.24	-0.01	0.00
SG	0.15	0.64	0.39	0.28	-0.23	0.46	0.17	-0.21	0.02	0.00
SL	-0.37	-0.43	0.21	0.62	0.40	-0.12	-0.15	-0.23	0.04	-0.01

Table A.11. Factors loadings for PCA to link seasonal minimum rill erosion loss rate (RE-min (mm)) with major explanatory variables at whole field scale for Kab2 watershed

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
RE-whole field	-0.68	-0.29	0.21	0.38	-0.27	-0.27	0.34	0.06	0.02
pH (H ₂ O)	0.92	-0.05	0.06	-0.11	-0.07	-0.17	-0.03	0.31	-0.04
SOC	0.29	0.70	0.11	0.40	0.46	-0.19	0.03	0.00	0.00
SB	0.96	-0.09	0.08	0.07	-0.13	-0.07	-0.08	-0.03	0.15
ECEC	0.86	-0.06	0.15	0.23	-0.32	-0.13	-0.14	-0.19	-0.09
SILT	0.67	-0.31	0.33	0.18	0.15	0.46	0.28	0.01	-0.02
Cover	0.23	0.77	0.20	-0.37	-0.24	0.00	0.32	-0.05	0.00
TD	-0.55	0.46	0.45	0.21	-0.27	0.26	-0.29	0.10	0.01
SG	-0.21	-0.32	0.82	-0.29	0.24	-0.19	-0.08	-0.05	0.00

Partie I. ENQUETE DES MENAGES :

Le présent questionnaire d'enquête est élaboré dans le cadre du projet de recherche sur les dégradations de sols par érosion hydrique. Ces enquêtes ont pour objectif de caractériser les modes de gestion et les pratiques agricoles à petite échelle au niveau des parcelles des ménages. Elles permettront de faire un diagnostic de ce qui est fait au niveau des bassins versants qui a un impact sur les facteurs et les processus d'érosion. Enfin, elles vont permettre de connaître les avis des agriculteurs sur la problématique de dégradation de leur sol et les raisons justifiantes les actes qu'ils posent tout au long de leurs activités de production agricole.

Nous tenons à préciser que l'ensemble des avis et réponses de tous les répondants seront confidentiels et exploités uniquement à des fins académiques et nous vous remercions d'avance pour votre acceptation de participer à ces enquêtes.

A. LOCALISATION ET IDENTIFICATION DU REpondANT

1. Localisation du bassin versant

1.1. Territoire :

[illegible]

1.3. Localité (village) :

2. Identification du Chef de ménage

2.1. Nom et post nom du chef de ménage (ou son délégué) :

.....

2.2. Année de naissance :

2.3. Sexe : 1= Masculin 2= Féminin

2.4. Situation matrimoniale :

1= Marié 2= Divorcé 3=Veuf (ve) 4= Célibataire 5= Polygame

2.5. Niveau d'études :...//

1= Aucune; 2= Cercle d'alphabétisation; 3= Primaire; 4= Secondaire;
5= Universitaire

B. ACTIVITES DU MENAGE

3. Activités principales du chef de ménage

3.1. Quelles sont les 3 plus importantes activités du ménage : (1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème})

Activités	a) En considérant le temps qu'elles lui prennent (par ordre d'importance)	b) En considérant les revenus qu'elles lui procurent (par ordre d'importance)
Agriculture		
Élevage		
Artisanat		
Petit commerce		
Main d'œuvre agricole		
Transformation agroalimentaire		
Maraichage		
Exploitation forestière		
Travail salarié		
Exploitation minière		
Autres (à préciser) :		

4. Localisation et caractéristiques de la parcelle du ménage

4.1. Cordonnées GPS du champ du ménage :

X (longitude) :Y (latitude):.....Z (altitude):.....

4.2. Localisation de la parcelle au niveau de la toposéquence :

1=Sommet de colline; 2=Plateau; 3=Flanc de la colline; 4=Bas de la colline; 5 =Bas-fond

4.3. Superficie de la parcelle exploitée par le ménage :m Xm.

Nombre des pas..... X

4.4. Mode de propriété sur la parcelle exploitée par le ménage ? profil

1= Propriétaire; 2=Gérant; 3=Location; 4= Affectée (Autorités)

5= Empruntée 6=Autres (à préciser) :

5. Durée de la mise en culture de la parcelle avant et par l'exploitant actuel

5.1. Depuis combien d'années votre parcelle est-elle mise en culture?

(Nombre d'années)/__

5.2. Depuis combien d'années travaillez-vous sur l'exploitation ?

(Nombre d'années)/ __)

6. Disponibilité et utilisation des facteurs de production

6.1. Disposez-vous d'autres parcelles en dehors de votre village ou de ce bassin versant que vous exploitez ?

1= Oui 0= Non

6.2. Si oui, quelle est la superficie totale de cette (ces) parcelle (s)? :m
Nombre des pas..... X.....

6.3. Type et quantité de main d'œuvre utilisés pour les différents travaux sur votre parcelle et le mode de rémunération ?

Main d'œuvre familiale	Nombre
Adulte	
Enfant >15ans	
Enfant <15ans	

Mode de rémunération:

1=Au comptant 2=En échange d'une partie des récoltes 3= Autres (à préciser)

Main d'œuvre non familiale						
	Personnes louées		Membres de votre association		Autres :	
Activités	Nbre de jours	Mode rémunération	Nbre de jours	Mode rémunération	Nbre de jours	Mode rémunération

6.4. Type et objectif de l'élevage au sein de votre ménage.

Type	Objectifs (plusieurs réponses possibles)
1. Petit bétail (caprin, lapin, cobaye, basse-cours ...)	
2. Gros bétail (Vache)	

Objectifs de l'élevage: 1=Vente 2=Epargne d'argent (système bancaire précaire)
3=Obtention du fumier 4=Autoconsommation
5=Contributions sociales 6= Traction animal 7=Autre (à préciser)

6.5. Quel est le mode de travail du sol que vous pratiquez sur votre parcelle ?

1= Travail manuel (houe, trident, pioche ...) 2=Traction animale
3=Traction mécanisée 4=Autres (à préciser).....

7. Cultures et Pratiques agricoles

7.1 Cultures et Pratiques agricoles

Consignes : commencer par indiquer les cultures pratiquées, en précisant si elles sont produites pour l'autoconsommation et/ou pour la vente (rente). Ensuite, pour chaque culture produite, préciser le niveau de productivité (1-4), les amendements utilisés, le mode de travail du sol, etc.

#	Consigne : - Acceptation : x	Cultures Pratiques	bananier	manioc	maïs	haricot	Patate douce	Taro	caféier	igname	maraichères	
	Critères											
1.	Finalité de la culture	Autoconsommation										
		Rente										
2.	Productivité	Niveau (1-4)*										
3.	Amendement	Engrais chimiques										
		Fumier										
		Compost										
		Résidus de culture										
		Déchets ménagers										
		Paillage										
		...										
4.	Préparation du sol pour le semis	Labour profond										
		Labour superficiel										
		Labour minimum										
		Semis direct										
		...										
5.	Autres travaux du sol	Sarclage (nombre)										
		Buttage										
		Billonnage										
		...										
6.	Gestion des résidus de culture	Maintenu à la surface du sol										
		Enfoui dans le sol										
		Exporté et brûlé										
		Exporté et composté										
												
*Echelle: 1 - 4 (1=Très faible et 4=Très élevé)												

7.2 Autres cultures secondaires, non reprises au tableau précédent (liste)

.....

.....

.....

7.3 Association des cultures (par exemple banane-haricot) et/ou monoculture (p.ex. banane-banane)

Consigne : Acceptation : x	bananier	manioc	Maïs	haricot	Patate douce	Taro	caféier	...	...	...
Association										
bananier										
manioc										
maïs										
haricot										
Patate douce										
Taro										
caféier										
...										
...										

7.4 Rotation des cultures :

7.4.1. Pratiquez-vous la rotation des cultures sur votre parcelle ?

1= Oui 0= Non

7.4.1. Si oui, citez les rotations que vous pratiquez sur votre parcelle ?

(Exemple : Manioc-Haricot/ Maïs-Haricot/ Patate douce) :

.....

C. ETAT DE FERTILITE DE LA PARCELLE

8. Comment appréciez-vous le niveau de fertilité de votre parcelle ?

1=Faible fertilité 2=Fertilité moyenne 3= Bonne fertilité 4=Très bonne fertilité

D. DEGRADATION DES SOLS ET EROSIONS

9. Comment considérez-vous l'état général de votre parcelle ?

1=Faiblement dégradée 2=Moyennement dégradée 3= Dégradée 4=Très dégradée

10. Quelles sont les différents types de dégradation que vous observez sur votre parcelle et leur niveau atteint ?

#	Type	Niveau*
1	<i>Erosion</i>	
2	<i>Epuisement</i>	
3	<i>Compactage</i>	
4	<i>Perte de la MO</i>	
5	<i>Autres (à préciser)</i>	

*Echelle d'évaluation: 1 - 4 (0=absent, 1=Faible et 4=Très sévère)

Quels sont les signes de l'érosion sur votre parcelle et leur importance ?

	Signes	Niveau*
1	<i>Perte de matière organique</i>	
2	<i>Dégâts aux cultures (ensevelissement)</i>	
3	<i>Dégâts aux cultures (arrachage)</i>	
4	<i>Gêne pour le travail du sol</i>	
5	<i>Diminution de la couche arable</i>	
6	<i>Rigoles</i>	
7	<i>Ravines</i>	
8	<i>Affleurement des pierres</i>	
9	<i>Perte de fertilité</i>	
10	<i>Autres</i>	
11	<i>Autres</i>	

*Echelle d'évaluation du niveau: 1 - 4 (1=Faible et 4=Très grand)

Quelles sont les principales causes de l'érosion sur votre parcelle et leur importance ?

#		Importance*
1	<i>Pluies intenses</i>	
2	<i>Pente</i>	
3	<i>Ruissellement</i>	
4	<i>Sol</i>	
5	<i>Cultures</i>	
6	<i>Pratiques</i>	
7	<i>Autre :</i>	

*Echelle d'évaluation de l'importance: 1 - 4 (1=Faible et 4=Très important)

11. Evaluation de l'impact des cultures sur l'érosion sur votre parcelle, pouvez-vous indiquer celles qui:

**1=Favorisent l'érosion ? 2=Neutres(ne favorise, ni ne limite) 3=Limitent l'érosion ?*

<i>Cultures (cfr liste au pt 7)</i>	<i>Impact sur l'érosion *</i>	<i>Justification de l'impact</i>	<i>Si la culture favorise l'érosion, pourquoi est-elle pratiquée ?</i>

12. Evaluation de l'impact des pratiques sur l'érosion sur votre parcelle, pouvez-vous indiquer celle qui:

**1=Favorisent l'érosion ? 2=Neutres(ne favorise, ni ne limite) 3=Limitent l'érosion ?*

En plus de l'association et de la rotation des cultures, reprendre une à une toutes les pratiques listées au tableau 7.1 et pratiquées dans l'exploitation

<i>Pratiques (cfr liste au pt 7.1)</i>	<i>Impact sur l'érosion *</i>	<i>Justification de l'impact</i>	<i>Si la pratique favorise l'érosion, pourquoi est-elle pratiquée ?</i>
Association des cultures			
Rotation des cultures			
.....			

13. Méthodes et techniques de lutte contre les érosions et les dégradations

<i>Méthodes/Techniques</i>	<i>Appliquée 0= Non, 1= Oui</i>	<i>Connue 0=Non, 1= Oui</i>	<i>Efficacité (1-4)</i>	<i>Raisons de non-application (Plusieurs réponses possibles)</i>
Épandage des ordures ménagères				
Compostage				
Paillage				
Association des cultures				
Rotation des cultures				
Non labour (labour minimum)				
Travail du sol selon les courbes de niveau				
Agroforesterie				
Creusage des fossés				

Méthodes/Techniques	Appliquée 0= Non, 1= Oui	Connue 0=Non, 1= Oui	Efficacité (1-4)	Raisons de non- application (Plusieurs réponses possibles)
Plantation d'une haie vive suivant la courbe de niveau				
Installation d'une fascine				
Diguettes anti érosive sur courbe de niveau				
Couverture végétale permanente				
Autres (à préciser)				
Autres				
Autres				

Consignes

- Echelle d'évaluation de l'efficacité: **1 - 4** (1=Faible et 4 =Très efficace)
- Raisons de non-application : 1=Pas de main d'œuvre suffisant 2=Demande beaucoup de travail 3=Exige beaucoup des moyens 4=découragé car les voisins ne s'impliquent pas 5=Je ne suis pas autorisé à l'appliquer 6= Exiguïté de la parcelle 7= Par manque de crédits 8=Matériels inappropriés 9=Autres (à préciser)

E. Evolutions**14. Est-ce qu'il y a eu des changements qui sont survenus dans la manière d'exploiter votre parcelle au cours de ces 10 dernières années ?**

0= Non, 1= Oui

15. Facteurs ayant évolué, type de changement et motivation ?

Secteurs	Types de changements	Motivations de ces changements
1. Amendements ☐		
2. Cultures (types de cultures, associations, rotations, période de semis, ...) ☐		
3. Travail du sol ☐		
4. Autres (à préciser) ☐		
5. Autres (à préciser) ☐		

Nous vous remercions infiniment pour vos avis et réponses.

Fait à le //.....

1.3. Superficie totale du champ (mesurée avec le GPS) / __ / __ / __ / __ / m²
Croquis de la parcelle
Légende :
Echelle: 1 cm sur
papier =

3. EVALUATION DES DEGATS ACTUELS DE L'EROSION

#	Sous-parcelle	1	2	3	4	5	...	...
	Critères							
1	Type (genre) d'exploitation							
2	Positionnement de la S/parcelle							
3	Localisation sur la toposéquence							
4	Caractéristiques de l'érosion (voire fiches des rigoles et ravines)							
5	Caractéristiques du sol							
	- Degré de rugosité							
	- Classification du drainage							
	- Profondeur couche superficielle							
	- Classification de la texture							
	- Détermination de la pente							
	- Configuration de la pente							
	- Longueur de la pente							
	- Estimation du couvert -Vivant							
	- Litière							
	- Mode de préparation sol							
	- Orientation de labour							

#	Sous-parcelle	1	2	3	4	5	...	...
	Critères							
6	Modes de gestion et conservation							
	- Existence sur la parcelle							
	- Structure/technique de LAE							
	- Disposition des fossés							
	- Type des fossés							
	- Forme des fossés							
	- Billons ou buttes -Ecartements							
	- Hauteur							
	- Efficacité							
	- Causes de non-fonctionnement							

Critères d'évaluation (B)

1. Type (genre) d'exploitation (objectif de la parcelle) {1= Oui, 0= Non} ?

1	Parcelle labourée
2	Parcelle non labourée
3	Parcelle de pâture
4	Prairie
5	Forêt
6	Autres (à préciser)

2. Positionnement de la parcelle {1= Oui, 0= Non} ?

1	Près de l'habitation
2	Limite avec une ferme
3	Près de la route/Chemin
4	Près d'une rivière ou lac
5	Autres (à préciser)

3. Localisation de la parcelle sur la toposéquence {1= Oui, 0= Non} ?

1	Plateau
2	Flanc de colline
3	Bas de la colline
4	Bas-fonds
5	Autres (à préciser)

4. Caractéristiques de l'érosion (transect: intervalle des lignes maximum 10m)(voire fiche Excel)

5. Caractéristiques du sol

5.1. Degré de rugosité

#	Classification	Observations	Aspects visuels
1	Très rugueux	Aucune surface lisse entre les agrégats / arêtes vives et agrégats grossiers.	
2	Rugueux	Agrégats sont clairement visuels/ les bords des agrégats légèrement arrondis.	
3	Moyen	Agrégats sont partiellement désintégrés/ bords considérablement arrondis.	
4	Fin/lisse	Un petit nombre d'agrégats restent / pas de bords, agrégats ronds à la surface.	
5	Très lisse partout	Pas d'agrégats sur toute la surface.	

5.2. Classification du drainage au niveau du sol

Classification	Observations faites
Bon	La quasi-totalité de l'eau s'infiltre dans le sol, même après une forte pluie, il n'y a presque pas de ruissellement.
Moyen	Après un orage modéré, la plupart des eaux de surface s'infiltrent dans le sol, mais après une forte tempête, il y a une quantité considérable de ruissellement.
Pauvre	L'engorgement se produit après la plupart des événements pluvieux.

5.3. Mesure de la profondeur de la couche superficielle du sol : / ____ / cm

5.4. Classification de la texture du sol

Classification	Observations	Aspects visuels
Sableuse	Sol sous forme de grains libres, il ne peut pas être	

Classification	Observations	Aspects visuels
	entassé dans une pyramide.	
Sablo-limoneuse	Sol contient suffisamment de limon et d'argile pour avoir un peu de cohésion; il peut être façonné en une boule qui se disperse facilement.	
Limon-sableuse	Sol peut être roulé en un cylindre court et épais, de taille approximativement d'un diamètre du crayon.	
Limoneuse	Sol peut être roulé en un cylindre mince d'environ 15 cm de long.	
Argilo-limoneuse	Le cylindre mince peut être plié en forme de U	
Argile-claire	Le cylindre en forme de U peut être plié et former un cercle qui présente des fissures.	
Argile-lourde	Le cylindre en forme de U peut être plié et former un cercle qui ne présente pas des fissures.	

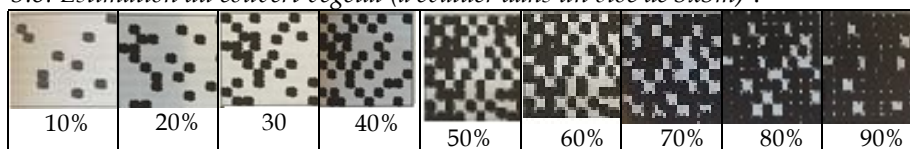
5.5. Détermination de la pente (en pourcent) / ____ / %

5.6. Configuration de la pente (forme) {1= Oui, 0= Non} ?

1	Convexe
2	Concave
3	Linéaire
4	Dépression (concave)
5	Irrégulière (convexe-Concave)
	 Convex Concave Linear

5.7. Détermination de la longueur de la pente en mètre /____/ m

5.8. Estimation du couvert végétal (à évaluer dans un bloc de 5x5m) ?



5.9. Mode de préparation et d'aménagement des sols

1	Mode
2	Sans labour
3	Labour minimum
4	Hersage
5	Labourage
6	Large lit avec sillons
7	Paillage
8	Billonnage/buttage
9	Autres (à préciser)

5.10. Orientation (direction) de labour

1	Sur le contour
2	Diagonale
3	Transversal
4	Mixte (irrégularité de la parcelle)
5	Dans le sens de la pente
6	Autres (à préciser)

6. Mode de gestion et de conservation des sols

6.1. Applique-t-on une méthode de conservation du sol sur la parcelle?

{1= Oui, 0= Non}

6.2. Si oui, quelle est la structure ou la technique de LAE observée sur la parcelle ?

1	Terrasse
2	Fossés de garde
3	Fossés continus et discontinus
4	Bandes enherbées
5	Fascines
6	Haies antiérosives
7	Haies mortes
8	Cordons empierrés
9	Billonnages et buttages
10	Autres (à préciser)

6.3. En cas des fossés de garde ou fossés continues et discontinues, comment sont-ils creusés ?

1	Suivant les courbes de niveau
2	Parallèlement à la pente
3	Sans aucune disposition particulière
4	Autres (à préciser)

6.4. Quels sont les types et dimensions des fossés utilisés ?

1	Fossés isohypses
2	Fossés cloisonnés
3	Fossés continus
4	Étagé
5	Autres (à préciser)

6.5. En cas d'une haie vive ou morte, quelle est sa forme et l'écartement entre deux haies successives ?

1	En quinconce
2	Trapézoïdale
3	Semi-circulaire
4	Sans forme particulière
5	Autres (à préciser)

6.6. En cas de billonnage ou buttages, quels sont les écartements entre billons/butes ainsi que leur hauteur ?

Écartements	Hauteur

6.7. Quelle est l'efficacité de mesure de gestion et conservation du sol : observe-t-on des rigoles et ravines dans la parcelle?

{1= Faible, 4= Très efficace}

6.8. Si oui, quelles sont les causes de non-fonctionnement des dispositifs de lutte installés ?

1	Grands écartements entre deux haies successives ?
2	Haies non touffues ?
3	Forte pente entre deux haies successives ?
4	Pas de LAE en amont de la parcelle ?
5	Mauvais ou pas de curage des fossés ?
6	Labour dans le sens de la pente
7	Mauvaise maintenance des dispositifs
8	Surpâturage
9	Autres (à préciser)

7. PLUVIOMETRIE, SITUATION EN AMONT ET A L'AVAL DE LA PARCELLE

7.1. Événements pluvieux récents

Nombre	Nombre de grosses pluies	Saison culturale

7.2. Observations au-dessus de ladite parcelle

Source partielle des dégâts de l'érosion	Existence: 0=Non 1=Oui
Est-ce que l'érosion débute dans la parcelle en en amont ?	
Les dégâts en amont sont-ils importants ?	

Lister les dégâts observés	Existence: 0=Non 1=Oui
Rigoles	
Ravines	
Autres (à préciser)	

7.3. Observations en-dessous de ladite parcelle

Origine des dégâts observés en aval	Existence: 0=Non 1=Oui
Est-ce que les dégâts observés dans la parcelle en aval proviennent de la parcelle où les mesures ont été prises ?	
Les dégâts en amont sont-ils importants ?	

Lister les dégâts observés	Existence: 0=Non 1=Oui
Sédimentations	
Contaminations des rivières et cours d'eau	
Ravinement	
Rigoles	
Autres (à préciser)	

8. SUIVI DES CULTURES

#	Sous-parcelle & Cultures	1...	2...	3...	4...	5...	...	...
	Critères	1...	2...	3...	4...	5...	...	...
1	Hauteur de la plante							
2	Stade phénologique							
3	Degré de rugosité							
4	Couverture végétale - Litière							
	- Vivant							
5	Encrouement							

COMPLEMENT D'INFORMATIONS

- Prélèvement d'échantillons du sol pour analyses élémentaires (1 échantillon composite par parcelle)
 - Eléments et rapports à analyser : pH, CEC, MO, H, Al et la granulométrie
- Détermination de la cohésion pour estimer la stabilité structurale et du risque de rupture de pentes (avec la Torvane)
 - 5 mesures aléatoires dans chaque parcelle observée.

ANNEXES C.

Quelques images des champs visités



Photo A.1. Deux parcelles de manioc associé au haricot, patate douce et quelques pieds de maïs avec plusieurs incisions par érosion en rigoles.



Photo A.2. A gauche : mesure d'une grande rigole qui s'est agrandie lors d'un événement pluvieux, et à droite, une ravine permanente qui se creuse au fil de la saison pluvieuse.



Photo A.3. Champ de manioc récolté avec grandes incisions (rigoles) en formation au cours d'une saison pluvieuse.



Photo A.4. Colline mise en culture avec élimination des végétations herbacées et ligneuses sans aucun dispositif de lutte contre les érosions, observation des incisions (rigoles) qui se creusent sur les parcelles déjà labourées.

Publications et conférences

Publications avec comité de lecture

1. Heri-Kazi B.A. et C.L. Bielders, 2020. Dégradation des terres cultivées au Sud Kivu, R.D. Congo : perceptions paysannes et caractéristiques des exploitations agricoles. Accepté pour publication par la revue BASE (Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement/Biotechnology, Agronomy, Society and Environment).
2. Heri-Kazi B.A. and C.L. Bielders, 2019. EROSION and SOIL AND WATER CONSERVATION IN SOUTH-KIVU (EASTERN D.R. CONGO): THE FARMERS' VIEW. Submitted to Land Degradation and Development.
3. Heri-Kazi B.A. et Colinet G., 2014. Diversité et mode de gestion des sols dans l'espace socio-agricole des territoires de Walungu et Kabare, Sud-Kivu, RD. Congo. Cahiers du CERUKI, Nouvelle Série 44, pp. 125-143.
4. Birali M., Bulangashane G., Bahati D., Heri-Kazi B.A., Walangululu J. et Sumbu Z., 2014. Facteurs influençant l'élimination de l'acide cyanhydrique des tubercules du manioc amer à différentes étapes de transformation. Cahiers du CERUKI, Nouvelle Série 44, pp. 23-33.

Communications à un colloque :

1. Heri-Kazi B., Aimé; Bielders, Charles. 2018. Characteristics and extent of soil loss by water erosion at the cropland level in the Kivu dorsal, South Kivu, DR. Congo. SoWaSe 2018 (Soil and Water Security): Challenges for the next 30 years! (Imola, Italy, du 06/06/2018 au 08/06/2018). In: Proceedings, (2018). <http://hdl.handle.net/2078.1/199662>
2. Heri-Kazi B., Aimé ; Bielders, Charles. 2017. Assessing the Impacts of Farming Practices and Soil and Water Conservation Measures on Soil Erosion in South Kivu, Eastern DR Congo. 7th Belgian Geography Day (Liège, Belgium, 17/11/2017). <http://hdl.handle.net/2078.1/196922>
3. Heri-Kazi B., Aimé; Bielders, Charles. 2017. Farmer's Perceptions of Land Degradation in South Kivu, Eastern DR Congo. TROPENTAG 2017 (University of Bonn, Germany, du 20/09/2017 au 22/09/2017). <http://hdl.handle.net/2078.1/188049>

A propos de l'auteur



Aimé Heri-Kazi Bisimwa est né le 12 novembre 1974 à Bukavu, au Sud-Kivu, en République Démocratique du Congo. Il a fait ses études primaire et secondaire au Collège Alfajiri, à Bukavu, de 1980 - 1994 avant de rejoindre l'Université Catholique de Bukavu (UCB), à la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) où il obtient en 1999, le diplôme de gradué en sciences agronomiques et, en 2002, il obtient avec mention

Distinction le diplôme de grade d'ingénieur agronome en orientation phytotechnie. Plus tard, de 2010 - 2011, il va rejoindre l'ULiège - Gembloux - Agrobiotech (Belgique) où il obtient toujours avec mention Distinction, le diplôme de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement. Après ses études, il a travaillé dans plusieurs organisations non-gouvernementales de développement (GALE, Louvain Développement, Christian-Aid) et institut international de recherche (IITA) avant et/ou pendant qu'il était assistant d'enseignement à l'UCB. Il est engagé actuellement à temps plein comme assistant sénior (C.T.) au sein de la FSA de l'UCB. Il a commencé ses recherches doctorales (PhD) en 2014 sur la caractérisation de la dégradation des terres par érosion hydrique dans le Sud-Kivu montagneux (Dorsale du Kivu), à l'Est de la République Démocratique du Congo, grâce à une bourse financée par l'Université catholique de Louvain (UCLouvain) et complétée plus tard par celle de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES). Une grande partie de ses recherches sur terrain a été financée par le projet VLIR-UOS en partenariat avec la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Catholique de Bukavu. Ses recherches sur terrain et sa fonction d'enseignant à l'université lui ont permis de travailler étroitement avec les paysans à travers plusieurs organisations œuvrant dans le domaine de gestion des ressources naturelles et la conservation du sol pour la protection du potentiel agricole en RDC et particulièrement au Sud-Kivu, son domaine de spécialisation.