



24-25 Janvier 2024

Bujumbura, La Détente

# FORUM SUR L'EROSION HYDRIQUE AU BURUNDI

Conférences CRAVE 2024

# TABLE DES MATIERES

Discours d'Ouverture du Recteur de l'Université du Burundi	4
Mot d'ouverture de Mr Micael BEUN, Responsable du Projet PAGRIS	6
Note introductive de cadrage	8
<b>THEME 1</b> Document d'orientation stratégique d'aménagement des bassins versants et de lutte antiérosive « DOSABV » : Approche harmonisée pour son opérationnalisation. Par Ing. Pierre Sindayikengera (MINEAGRIE)	12
<b>THEME 2</b> Récurrence des extrêmes climatiques et mécanismes associés en Afrique de l'Est : Cas du Burundi. Par Dr Athanase Nkunzimana (Faculté des Lettres et Sciences Humaines - Université du Burundi)	23
<b>THEME 3</b> Caractérisation des glissements de terrain et des processus d'érosion associés en périphérie de la ville de Bujumbura. Par Dr Désiré Kubwimana (Faculté des Sciences - Université du Burundi)	36
<b>THEME 4</b> Estimation des pertes en terre par l'érosion linéaire en rigoles : application de la méthode ACED Par Ir Alain Niyungeko(IFDC-PAGRIS)	51
<b>THEME 5</b> Contribution de la télédétection par drones au suivi et à la modélisation des pertes en terre par l'érosion au Burundi. Par Dr Anicet Sindayihebura (Faculté des Sciences - Université du Burundi)	64
<b>THEME 6</b> Acquis de la recherche sur l'érosion hydrique dans la région du Kirimiro – Mashitsi. Par Dr Ir Théodimir Rishirumuhirwa (Agrobiotech-IRAZ)	79
<b>THEME 7</b> Acquis de la recherche et leçons apprises sur l'érosion hydrique en nappe dans la région naturelle du Mumirwa (Rushubi-Isare). Par Ir Cyrille Hicintuka (ISABU)	93
<b>THEME 8</b> Rentabilité financière et effets de la haie mixte (Bana grass + Calliandra calothyrsus + Grevillea robusta), du fossé isohypse et de la haie combinée au fossé comme techniques de lutte anti-érosive sur le rendement de la pomme de terre et du maïs en zone densément peuplée du Nord Burundi (Kayanza-Ngozi). Par Prof. Bernadette Habonimana (FABI-Université du Burundi)	104
<b>THEME 9</b> Analysis of Erosion Control Methods Effects on maize growth and production parameters at Matongo and Gashikanwa. Par Prof. Chantal Kwizera (FABI-Université du Burundi)	124
<b>THEME 10</b> Dispositifs expérimentaux de lutte contre l'érosion hydrique de Gashikanwa (Buyenzi) et Matongo (Mugamba) : Pertes physico-chimiques dans les sédiments et les eaux de ruissellement. Par Prof. Salvator Kaboneka (FABI-Université du Burundi)	142
<b>THEME 11</b> Valorisation agronomique des résidus de récolte et de la biomasse agroforestière par co-compostage. Par Prof. Salvator Kaboneka (FABI-Université du Burundi)	166
<b>THEME 12</b> Perception et adoption des pratiques de la LAE au Burundi : Etudes de cas comparées menées en communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo. Par Ir Prudence Nsengiyumva (FABI-Université du Burundi)	174
Liste des participants	186
Recommandations du Forum sur l'érosion au Burundi	188

# EQUIPE DE TRAVAIL



## Comité de Parrainage

Recteur de l'Université du Burundi

Responsable du Projet IFDC/PAGRIS

## Comité de Supervision

Directeur de la Recherche et des Innovations (UB)

Doyen de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (UB)

Oscar Nduwimana (IFDC/PAGRIS)

## Comité d'Organisation, de Rédaction et d'Édition du Rapport

Bernadette Habonimana (FABI/UB)

Salvator Kaboneka (FABI/UB)

Théodomir Rishirumuhirwa (Agrobiotech)

Cyrille Hicintuka (ISABU)

Oscar Nduwimana (IFDC/PAGRIS)

## Secrétariat

Soter Ndhokubwayo (FABI/UB)

Zacharie Nzohabonayo (IFDC/PAGRIS)

Pierre Sindyikengera (MINEAGRIE)

## Conférenciers/Présentateurs

Bernadette Habonimana (FABI/UB, Projet Erosion)

Chantal Kwizera (FABI/UB, Projet Erosion)

Salvator Kaboneka (FABI/UB, Projet Erosion)

Séverin Nijimbere (FABI/UB, Projet Erosion)

Prudence Nsengiyumva (Projet Erosion)

Théodomir Rishirumuhirwa (Agrobiotech, Projet Erosion)

Cyrille Hicintuka (ISABU)

Alain Niyungeko (IFDC/PAGRIS)

Athanase Nkuzimana (Fac Lettres-Géographie/UB)

Désiré Kubwimana (Fac Sciences/UB)

Anicet Sindyihubura (Fac Sciences/UB)

Pierre Sindyikengera (MINEAGRIE)

# Discours d'Ouverture du **Pr. Audace MANIRABONA,** Recteur de l'Université du Burundi



Messieurs les Honorables Représentants du Peuple,  
Messieurs les Représentants des Corps Diplomatiques  
et Consulaires,  
Messieurs les Hauts Cadres de la Présidence et du  
Premier Ministère,  
Madame, Messieurs les Directeurs Généraux,  
Messieurs les Professeurs,  
Messieurs les Responsables de Projets et  
d'Organisations Non Gouvernementales,  
Messieurs les Directeurs,  
Mesdames, Messieurs les Membres des Média,  
Mesdames et Messieurs Tout Protocole Observé,

A travers un appui du Projet d'Appui à la Gestion Intégrée et Responsable de la Fertilité des sols (PAGRIS) au Burundi, financé par l'Ambassade des Pays Bas au Burundi via l'International Fertilize Development Company (IFDC), le Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE) de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi, organise un cadre technique d'échanges sur la problématique de l'érosion hydrique au Burundi.

Cet évènement scientifique, auquel collaborent, l'ISABU, le Département du MINEAGRIE en charge de l'aménagement des bassins versants, un ancien cadre scientifique de l'IRAZ, ainsi que trois Facultés de l'Université du Burundi (Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie, Faculté des Sciences, Faculté des Lettres et Sciences Humaines) se tient à la Détente pour une durée de deux jours, du 24 au 25 Janvier 2024.

Sans nul doute que nul n'ignore que le sol constitue le premier capital productif pour une grande majorité des ménages burundais qui vivent essentiellement de l'agriculture. De ce fait, la protection et la gestion durable de ce capital « sol » constitue donc un enjeu prioritaire et majeur pour prétendre augmenter les

rendements, augmenter les revenus et améliorer de manière durable les conditions de vie des ménages ruraux agricoles. La gravité de l'érosion hydrique au Burundi s'explique par une mise sous culture de terres à pentes excessivement élevées sans mesures de lutte antiérosive. Dans un contexte de changements climatiques, différentes formes d'érosion sont observées. Celles-ci incluent l'érosion hydrique en nappe qui constitue la préoccupation des agronomes et des agriculteurs, à laquelle s'ajoutent les érosions linéaires en rigoles et en ravines et les formes les plus spectaculaires que sont les glissements de terrain, les éboulements et les coulées de boue, de plus en plus fréquentes, notamment dans la région du Mumirwa, aux alentours de la ville de Bujumbura et au-delà.

Mesdames et Messieurs, Tout Protocole Observé,

La gestion de ces différentes formes d'érosion hydrique interpelle diverses compétences : agronomes, hydrogéologues, socio-économistes, climatologues, aménagistes et j'en passe. Il nous est agréable de constater que cette diversité des compétences transparait dans l'équipe de présentateurs qui se sont proposés et alignés pour animer le forum sur l'érosion hydrique au Burundi.

Avec l'appui du projet PAGRIS accordé à la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), l'Université du Burundi a été honorée d'être associée aux travaux antérieurs sur la lutte antiérosive dans l'aménagement du territoire. Permettez-moi de retracer dans quelques lignes l'historique de ces travaux.

L'on se rappellera que les premiers travaux de mesures de protection antiérosives au Burundi datent des années 1940 dans le cadre de la "Mission antiérosive" de 1947. Par la suite, les premières recherches sur la conservation des sols à proprement parler ne commencèrent qu'en 1979 dans le Mumirwa Central (Rushubi) sous la première responsabilité du Département des Eaux et Forêts, reprise plus tard par l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

(ISABU). Parallèlement, une station expérimentale fut implantée à Mashitsi (Kirimiro) par l'Institut de Recherche Agronomique et Zootechnique (IRAZ) de la Communauté Economique des Pays des Grands Lacs (CEPGL).

Après plus de 20 ans (1995 à 2015) de mise en veilleuse, il est revenu à l'Université du Burundi à travers la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de relancer la recherche sur l'érosion hydrique au Burundi, via le projet SAdER-VLIR/UOS. Le projet a été implanté dans deux stations expérimentales, l'une installée dans le Buyenzi à Gashikanwa en province de Ngozi et l'autre dans le Mugamba Nord, à Matongo en province de Kayanza. Cette coopération interuniversitaire Nord-Sud a ainsi permis d'étendre les études sur l'érosion hydrique au Burundi à 4 régions naturelles, à savoir : le Mumirwa en raison de sa topographie heurtée et le Kirimiro, le Mugamba Nord et le Buyenzi du fait de leurs pressions démographiques dégradantes des terres agricoles.

Mesdames et Messieurs, Tout Protocole Observé,

Par suite de l'arrêt du financement du projet SAdER-VLIR/UOS, la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi a sollicité et obtenu un appui de l'IFDC à travers le projet PAGRIS pour une durée de 2 ans, afin d'affiner les résultats obtenus à Gashikanwa et Matongo pendant 4-5 ans.

A la fin de l'appui du projet PAGRIS, la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) à travers le CRAVE avait originellement planifié un simple atelier de restitution des travaux de ses recherches menées à Gashikanwa et à Matongo avec les appuis successifs du SAdER-VLIR-UOS et du projet PAGRIS. Par suite des concertations avec les divers intervenants d'hier et d'aujourd'hui est ressorti l'idée consensuelle d'organiser plutôt un cadre plus large d'échanges sur les acquis de la recherche sur l'érosion hydrique au Burundi.

C'est cela toute la genèse du forum sur l'érosion hydrique au Burundi, qui fait suite, après plus de 30 ans au séminaire jubilaire trentenaire des recherches agronomiques de l'ISABU. L'objectif principal du

présent forum est de faire un large état des lieux de tous les travaux ayant été effectués jusqu'à ce jour dans le domaine de la recherche sur l'érosion hydrique au Burundi.

Mesdames et Messieurs, Tout Protocole Observé,

Au niveau de l'Université du Burundi, dotée de 16 autres Centres de Recherche, à côté du CRAVE, cette initiative constitue, à coup sûr, une contribution significative des projets VLIR/UOS et du projet PAGRIS/IFDC à la politique nationale rationnelle de gestion des bassins versants, garante d'une sécurité alimentaire, nutritionnelle et environnementale durable. Aussi, nous sommes persuadés que les résultats de ce forum aboutiront à l'actualisation de nos enseignements, tant techniques qu'universitaires, une retombée de la fructueuse collaboration de la coopération entre l'Université du Burundi et VLIR-UOS dans un premier temps, et entre la même institution universitaire et le projet PAGRIS dans un deuxième temps. .

Ce bel exemple de fructueuse collaboration entre l'IFDC et la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi constitue, pour les deux partenaires que nous sommes, une « success story », comme disent nos amis anglophones. Nous profitons de cette occasion pour réitérer nos remerciements à l'égard de l'IFDC pour ses appuis à la recherche action en matière agronomique et environnementale. Par la même occasion, nous interpellons tous les intervenants en matière de développement rural, d'envisager de suivre le pas à l'IFDC, en les assurant que l'Université du Burundi est grandement ouverte à cette opération et dispose de ressources humaines suffisantes, notamment au niveau de ses programmes de Master et de l'Ecole Doctorale.

Mesdames et Messieurs, Tout Protocole Observé, C'est par ces mots que je déclare ouvert le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi.

Vive la Collaboration interinstitutionnelle pour le Développement Durable du Burundi

Je vous remercie et vous souhaite de fructueux travaux.

*Recteur de l'Université du Burundi*

Pr. Audace MANIRABONA

# Mot d'ouverture de **Mr Micael BEUN,** Responsable du Projet PAGRIS



Mesdames, Messieurs, les Hauts Cadres du Gouvernement et des Ministères ici représentés,

Mesdames, Messieurs, les Représentants des Corps Diplomatiques et Consulaires,

Mesdames, Messieurs, les Directeurs Généraux,

Mesdames, Messieurs, les Représentants de l'Université et les Professeurs,

Mesdames, Messieurs, les Directeurs,

Mesdames, Messieurs, les Membres des Média,

Mesdames et Messieurs, Tout Protocole Observé,

Je tiens tout d'abord par commencer mon mot en vous souhaitant à toutes et tous mes Meilleurs Vœux pour cette année 2024 ! Paix, prospérité et bonheur à toutes et tous !

Je tiens aussi à remercier tous les participants pour avoir répondu favorablement à notre invitation pour ce Forum sur l'érosion hydrique au Burundi. Ce Forum est organisé conjointement par l'Université du Burundi en collaboration avec IFDC, à travers le projet PAGRIS.

Toutefois, il est important de préciser que les présentations et les nombreux résultats qui vous seront partagés ici sont le fruit de plusieurs travaux effectués par différentes institutions au Burundi, ainsi que par plusieurs chercheurs et experts dans ce domaine. La raison donc pour l'Université du Burundi et IFDC de faciliter cette activité repose initialement sur la poursuite de travaux de recherche sur les pertes en terre dans les sites expérimentaux de Matongo et Gashikanwa, initiés à travers le projet VLIR-UOS, et poursuivis par IFDC. A cet effet, il nous

est apparu plus pertinent de présenter les résultats de ce travail de recherche, non pas de manière isolée, mais plutôt de manière complémentaire à d'autres sujets de recherche, anciens et récents, sur la même problématique d'érosion hydrique au Burundi.

En effet, l'érosion hydrique au Burundi constitue de plus en plus un des facteurs les plus limitants à la gestion durable du « capital sol », et donc à la gestion durable des exploitations agricoles et de leur productivité. De plus, l'érosion hydrique est responsable de la perte en vies humaines suite aux éboulements de terrain et inondations qui semblent de plus en plus fréquents, mais aussi occasionnent des dégâts matériels importants au niveau des maisons et des infrastructures du pays ! Cela démontre bien l'importance de cette problématique qui affecte par conséquent la majorité de la population du pays ! Le sol du Burundi est en effet de plus en plus soumis à de multiples pressions de différents types ayant toutes un point commun : l'action de l'homme : déforestation, dégradation des ressources naturelles, agriculture, infrastructures, ...

IFDC a pour vision des Sols sains et des plantes saines. Au Burundi, IFDC intervient depuis plusieurs années dans la promotion d'une agriculture plus résiliente aux effets des perturbations climatiques, plus productives et gérées de manière plus durable. A cet effet, IFDC dispose d'une stratégie globale d'interventions qui repose sur 4 piliers. (1) Au centre de ces actions, IFDC appuie directement les ménages agricoles dans la gestion durable de leur exploitation agricole (approche PIP – Planification Intégrée Participative et l'approche GIFS – Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols), (2) IFDC collabore avec les instituts de recherche

pour le développement de technologies et le développement de système agricole plus adapté, (3) tout en favorisant un environnement d'affaire plus favorable au développement des activités agricoles, (4) à travers un cadre institutionnel approprié.

C'est donc pour cette raison aussi que nous soutenons ce Forum sur l'érosion hydrique afin de partager les résultats de recherche existants dans ce domaine à travers une activité conjointe et la production d'un rapport conjoint, qui vise ainsi à faciliter l'accès aux résultats de recherche pour tout un chacun. D'autre part, nous attendons aussi de cet atelier de pouvoir

formuler des recommandations stratégiques et techniques qui répondent au mieux aux besoins des producteurs agricoles pour améliorer la gestion durable des terres au Burundi, comme facteur prioritaire pour une augmentation durable de la productivité agricole.

Je souhaite donc que cette activité contribue à faciliter l'accès aux résultats de recherche de manière adaptée, pratique et utile, mais aussi de pouvoir faire avancer la réflexion sur ce sujet prioritaire et fondamental pour une agriculture plus productive et plus durable au Burundi.

*Responsable du Projet Pagnis*

Mr Micael BEUN



# NOTE INTRODUCTIVE DE CADRAGE

## Préambule

Le sol constitue le premier capital productif pour une grande majorité des ménages burundais qui vivent essentiellement de l'agriculture. La protection et la gestion durable de ce capital « sol » constitue indéniablement un enjeu prioritaire et majeur pour prétendre augmenter les rendements, augmenter les revenus et améliorer les conditions de vie des ménages agricoles de manière durable. La gravité de l'érosion au Burundi, s'explique par une mise sous culture de terres à pentes excessivement élevées sans mesures de lutte antiérosive. Certains bassins versants sont complètement dégradés par l'érosion et aucune production n'y est possible sans une action de restauration de la fertilité. Des actions de lutte antiérosive (LAE) sont en cours mais restent insuffisantes : elles sont peu diversifiées et ne sont ni maîtrisées ni étendues à toutes les zones à protéger.

## Historique de la lutte contre l'érosion hydrique au Burundi

L'urgence de mettre en place des mesures de protection antiérosives au Burundi date des années 1940 dans le cadre de la "Mission antiérosive" de 1947. Les autorités coloniales belges mirent alors en place une série de mesures susceptibles de réduire les pertes en terres et garantir un maintien de la productivité agricole. Parmi les mesures phares proposées à l'époque peut être cité le creusement des fossés isohypses avec ou sans herbes fixatrices des talus (*Pennisetum purpureum*), la mise en défens contre les feux de brousses et le reboisement. Ces mesures étaient obligatoires et perçues par la population comme des corvées. Les premières recherches sur la conservation des sols à proprement parler ne commencent qu'en 1979 dans le cadre de la « Mission Forestière Crête Zaïre-Nil » du Département des Eaux et Forêts sur financement du Fonds d'Aide et de Coopération (FAC) de la République Française. Elles étaient localisées à la station expérimentale de Rushubi (Mumirwa) gérée par l'ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi). Plus tard, une station expérimentale fut implantée à Mashitsi (Kirimiro) par l'IRAZ (Institut de Recherche Agronomique et Zootechnique), dans le cadre de la Communauté Economique des Pays des Grands Lacs (CEPGL), comprenant le Burundi, le Rwanda et la République Démocratique du Congo (RDC), alors dénommée Zaïre.

Après plus de 20 ans (1995 à 2015) de mise en veilleuse de la recherche sur l'érosion hydrique au Burundi, le projet SADeR-VLIR/UOS a relancé la recherche sur l'érosion hydrique au Burundi, avec la création des stations expérimentales de Gashikanwa (Ngozi) en 2014 et Matongo (Kayanza) en 2016. Avec ce financement, la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi a, à partir de 2015, envisagé une étude qui visait à diagnostiquer les problèmes d'érosion dans les provinces de Ngozi (2014) et de Kayanza (2016) faisant partie des zones densément peuplées du Nord du pays, qui n'avaient pas encore fait objet

d'étude dans le domaine de gestion conservatoire des eaux et des sols. Ces deux études supplémentaires portent à 4 les régions naturelles ayant véritablement fait l'objet d'études sur l'érosion hydrique au Burundi : Mumirwa (Rushubi), Kirimiro (Mashitsi), Mugamba (Matongo) et Buyenzi (Gashikanwa). Ici nous faisons abstraction de quelques autres études de courte durée et quelque peu marginales qui ont eu lieu à Muzinda (Piedmonts du Mumirwa), Bukemba (Moso) et Bukeye (Mugamba) par l'ISABU.

Malgré toutes ces actions de recherche sur la Lutte contre l'Erosion hydrique, une brûlante et légitime question émerge. Pourquoi une si faible adoption des techniques de conservation et de restauration de la fertilité des sols au Burundi ? De notre avis et celui d'un certain nombre de professionnels du domaine, voici quelques éléments de réponse : (i) la difficulté par l'agriculteur d'accepter un travail supplémentaire à sa routine quotidienne sans effet immédiatement visible et surtout rentable ; (ii) la faible formation/sensibilisation des encadreurs de base qui constituent véritablement un leadership technique et administratif solide indispensable à l'adoption et la pérennisation des technologies générées par la recherche ; (iii) la systématisation des aménagements sans considération des particularités physiques et socio-économiques des exploitations bénéficiaires. A cet effet, les aspects de rentabilité des dispositifs antiérosifs doivent être considérés au même titre que leur efficacité technique vis à vis de l'érosion hydrique. Très souvent, la composante socio-économique est négligée dans la plupart des études du genre. En effet, l'adoption de toute technologie ou pratique, quelle qu'elle soit, doit s'appuyer sur 4 critères :

- 1. Efficacité**
- 2. Productivité/diversification des productions**
- 3. Durabilité**
- 4. Reproductivité/Facilité de mise en oeuvre**

Par suite de l'arrêt du financement du projet SAdEr à travers VLIR/UOS, la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi a sollicité et obtenu un appui de l'IFDC (International Fertilizer Development Company) à travers le projet PAGRIS (Projet d'Appui à la Gestion Responsable Intégrée de la Fertilité des Sols) pour une durée de 2 ans, afin d'affiner les résultats obtenus à Gashikanwa et Matongo pendant 4-5 ans de recherche et envisage leur mise à échelle, à travers projets de développement rural. Le présent document partage les résultats de ces recherches appuyées successivement par le projet VLIR/UOS et le projet PAGRIS de l'IFDC.

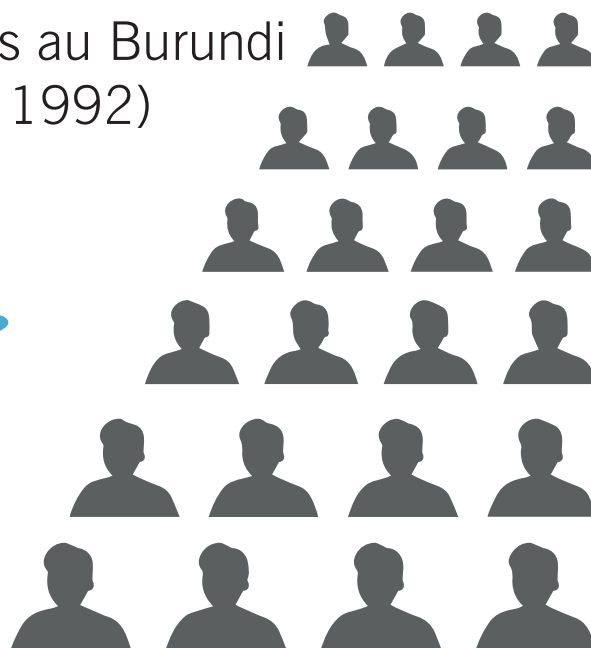
## Document d'Orientation Stratégique d'Aménagement des Bassins Versants (DOSABV) au Burundi

Le Gouvernement du Burundi, via le MINEAGRIE (Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage) s'est récemment doté d'un Document d'Orientation Stratégique d'Aménagement des Bassins Versants au Burundi (DOSABV). A travers ce document, le constat est que la réalisation des travaux de protection des bassins versants (BV) et de lutte antiérosive (LAE) ne se conforme pas à des règles standardisées et, à ce jour, les approches d'intervention des différents partenaires ne sont pas harmonisées.

En tant que document de référence en matière d'aménagement des bassins versants, le DOSABV recommande une synergie d'actions et une collaboration franche et effective des acteurs dans ce domaine. Il définit les meilleures techniques et les approches adaptées au contexte agro-écologique du Burundi, tout en privilégiant une approche d'aménagement des bassins versants communautaire et responsable, concertée, participative et inclusive.

# Séminaire sur l'érosion des sols au Burundi (ISABU, du 26 au 28 Octobre 1992)

En octobre 1992, dans le cadre du jubilé trentenaire des recherches agronomiques, l'ISABU a organisé un séminaire sur l'érosion hydrique au Burundi. Il était centré sur les résultats des expérimentations de Rushubi (Mumirwa). De cet événement scientifique qui a réuni près de 100 chercheurs et professionnels, sont sortis les principaux points saillants et résolutions suivants, qui restent pour la plupart de très grande actualité aujourd'hui.



1. Proposition de création d'un réseau national d'échange d'information sur les problèmes de conservation des eaux et des sols et de restauration de la fertilité. Structure consultative multi-institutionnelle, de concertation et d'échange d'informations sur l'érosion.
2. Baisse de la fertilité des rendements agricoles et dégradation de paysages et ressources naturelles : faits réels observables dans toutes les régions naturelles : Coulées de boues, glissements de terrain, ravinement, inondations, destruction de ponts et de routes.
3. Mauvaise planification et exécution des activités non agricoles : voiries, urbanisme, ramassage des matériaux de construction, feux sauvages.
4. Absence d'une conscience confirmée, planification et manque d'informations techniques suffisantes.
5. Urgente nécessité de disposer d'outils rationnels de gestion des terres : Carte d'agressivité climatique, carte de sensibilité des sols à l'érosion, carte des pentes, cartes d'aptitude des sols à l'agriculture (Résolution majeure du Séminaire).
6. Promotion de la recherche en milieu réel pour un développement et une adoption rapide des technologies générées par la recherche.
7. Intérêt de porter la recherche au-delà des pertes physiques de sols, appréhender aussi et surtout l'érosion chimique (et j'ajoute biologique) qui affecte la fertilité et la productivité des sols.
8. Renforcement des liens entre la recherche et les utilisateurs de technologies (recherche action et participative en milieu rural).
9. Adoption de l'approche bassin versant : effet réel (ouvrages biologiques)
10. Générer des technologies concertées en réponse à des besoins réels et précis, en escomptant des effets rapides de mise en œuvre. Voir les 4 critères d'adoption de toute technologie.
11. La lutte antiérosive ne doit pas être une fin en soi. Elle doit être considérée comme un important paramètre d'intensification agricole (augmentation des rendements et diversification des revenus).
12. Formations continues des encadreurs de terrain pour suivre et assurer l'évolutivité des technologies en adéquation avec les changements techniques et environnementaux (changements climatiques).



## Visée du Forum et Résultats Attendus

A la fin de la période de financement de 2 ans (2023), la FABI, en collaboration avec le projet IFDC/PAGRIS organise, un forum sur les études d'érosion au Burundi qui fait suite, 30 ans après, au seul atelier scientifique du domaine organisé jusqu'à ce jour. Et qui plus est, ne concernait qu'une seule région naturelle, le Mumirwa. L'une des valeurs ajoutées du forum proposé est d'inclure 3 autres régions naturelles, le Kirimiro, le Mugamba et le Buyenzi. Ajoutées à la région naturelle du Mumirwa, elles constituent les zones agro-écologiques les plus affectées et susceptibles à

l'érosion hydrique, de par leurs caractéristiques topographiques, climatiques et surtout socio-économiques (fortes densités des populations et surexploitation des terres agricoles).

L'objectif principal de ce forum était de faire un large état des lieux de tous les travaux ayant été effectués jusqu'à ce jour dans le domaine de l'érosion hydrique au Burundi. En complément à l'atelier sur les acquis de la recherche sur l'érosion organisé par l'ISABU en 1992, une telle initiative synthétique servira d'orientation aux activités futures de lutte antiérosive au bénéfice des projets et programmes de développement rural, plus particulièrement le DOSABV, récemment produit par le MINEAGRIE comme une directive en matière de gestion des bassins versants au Burundi.

De ce forum devraient sortir : (i) un document-synthèse (sous forme d'articles) des travaux de recherche sur l'érosion menés au Burundi jusqu'à ce jour et, (ii) des directives techniques et recommandations consensuelles à mettre au profit de tout projet ou programme agricole opérant au Burundi. De ce fait, l'initiative constitue, à coup sûr, une contribution significative des projets VLIR/UOS et du projet PAGRIS/IFDC à la politique nationale de gestion des bassins versants, telle que matérialisée par le DOSABV. Aussi, au niveau de l'enseignement, tant technique qu'universitaire, cette synthèse permettra l'actualisation des enseignements et comme matière de base pour la production de fiches techniques de vulgarisation (MINEAGRIE, Projets).

Au-delà de cela, l'indéniable valeur ajoutée de ce premier forum sur l'érosion hydrique au Burundi, à l'actif des projets VLIR-UOS et IFDC/PAGRIS en appui à l'Université du Burundi, à travers la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), est la diversité des thèmes abordés. Ceux-ci s'étendent de l'érosion hydrique en nappe (si chère aux agronomes !!), aux autres types d'érosion hydrique, à savoir l'érosion linéaire en rigoles et en ravines et aux glissements de terrain. Une analyse socio-économique au niveau des limites d'adoption des techniques de LAE, de même qu'une analyse des effets climatiques renforcent le paquet des thèmes couverts. Sans oublier les nouvelles technologies à travers une présentation sur l'application des drones dans le suivi des phénomènes d'érosion.

**Prof. Salvator Kaboneka (FABI/UB)**

# Thème 1

## Document d'orientation stratégique d'aménagement des bassins versants et de lutte antiérosive « DOSABV » : approche harmonisée pour son opérationnalisation

Pierre Sindayikengera<sup>1</sup>

1. MINEAGRIE. DGRIDS. B.P. 1 Gitega. psindayikengera@gmail.com

### Résumé

Au Burundi, il est de notoriété publique que, de plus en plus, en raison des effets du changement climatique doublés de la pression démographique sur les terres, l'érosion est la cause principale de dégradation des sols, destruction des champs, des infrastructures hydro-agricoles et d'autres infrastructures publiques ou privées. En même temps, l'analyse de la situation relève une totale absence de règles structurées, d'harmonisation et de coordination des intervenants et des interventions dans le domaine d'aménagement des bassins versants et de lutte antiérosive. La mission du DOSABV est de mettre en place des règles et directives standardisées, dans un but ultime d'harmoniser les techniques et les approches d'interventions, fondées sur la synergie et la collaboration entre acteurs à tous les niveaux, la promotion des meilleures techniques, la cartographie équilibrée et équitable des intervenants et des interventions, qui tiennent compte des réalités socio-économiques, pédologiques (sols), topographiques (pentes), climatiques et hydrogéologiques. A ce titre et à terme, la vision du DOSABV est le développement durable du pays à travers l'intensification agro-sylvo-zootechnique, l'augmentation des revenus des ménages et leur sécurité alimentaire et nutritionnelle. Son ambition est d'aménager 100 % des bassins et sous bassins versants du pays d'ici 2027 (dans 4 ans), en amont et en aval, à travers une approche intégrale et intégrée, communautaire et inclusive, impliquant tous les acteurs du sommet (services techniques et administratifs) à la base (comités de pilotage, bénéficiaires, hommes et femmes). La réussite de cet ambitieux programme devra être ancrée sur l'élaboration largement participative de plans d'aménagement, la formation et la sensibilisation des acteurs, à tous les niveaux. Des supports techniques de mise en œuvre (guide pratique) et législatifs concis et bien élaborés conditionneront la PLEINE réussite du DOSABV.

**Mots clés :** Aménagement, Bassin Versant, coordination, harmonisation, approche communautaire et intégrale, législation.

## Summary

It is of public awareness that, in Burundi, due to climate change effects and population pressure on land, soil water erosion is the key factor of soil and land destruction, accompanied with destruction of fields, hydrological and other public or private infrastructures. At the same time, it is observed and observable a total lack of regulating structured rules in harmonization and coordination of actions and actors in the domain of watershed management and erosion control. In that context, DOSABV mission is to put in place standardized rules and regulations, aiming at harmonizing techniques and approaches of intervention, based on wide synergy and collaboration between actors at all levels, promotion of research based best erosion control practices, mapping of actors and actions, while taking into full account varied socio-economic realities, soil related factors, topography and hydrogeology. Hence and in the short run, DOSABV vision is the country sustainable development, through agricultural, (agro)forestry and animal production intensification, increase in smallholders' economy together with their food and nutrition security. DOSABV envisions to manage 100 % of the country watersheds, big and small, upper and down streams, by the year 2027, via an integral and integrated, community-based and inclusive approach, with a total involvement of all actors top (public technical and administrative services) down (local committees, beneficiaries, men and women). The full success of this ambitious programme is based on widely participative elaboration and production of watershed management plans, enhanced by training and sensitization of all actors, at all levels. To that end, availability of DOSABV precise and elaborate technical (guides and directions) and legislative tools is the KEY to its adoption, implementation and success.

**Key Words :** Management, watershed, coordination, harmonization, global and community-based approach, legislation.

## 1. INTRODUCTION

Le sol burundais est soumis à une forte érosion liée essentiellement au climat pluvieux sur des collines aux pentes fortes et aux pratiques culturales des fois inappropriées sur des sols fragiles et facilement érodés par les eaux pluviales de ruissellement. Depuis plusieurs années et dans le souci de résoudre ce problème d'érosion récurrente, beaucoup d'investissements ont été consentis dans l'aménagement des bassins versants par le Gouvernement, les Partenaires Techniques et Financiers ainsi que les différentes organisations nationales et internationales partenaires. Pourtant et malgré tous ces efforts, les phénomènes d'érosion, de ruissellement, de glissement de terrain et d'inondation persistent toujours avec comme conséquences : la dégradation des sols, la destruction des champs, inondations des marais aménagés et la destruction des infrastructures hydro-agricoles et autres infrastructures publiques et privées. Il a été constaté un manque d'harmonisation des approches d'intervention et des techniques appropriées dans le domaine des aménagements liés à la lutte antiérosive et à la protection des bassins versants qui est aussi un autre défi majeur.

C'est pour essayer de répondre à cet impératif que le Gouvernement a voulu se doter d'un Document d'Orientations Stratégiques d'Aménagement des Bassins Versants et de Lutte Anti Erosive « DOSABV » qui a pour ambition d'orienter les travaux d'aménagement suivant des règles standardisées et une approche d'intervention sur terrain harmonisée. Pour rappel, le Gouvernement du Burundi, via le MINEAGRIE s'est doté d'un Document d'Orientations Stratégiques d'Aménagement des Bassins Versants au Burundi (DOSABV). A travers ce document, le constat est que la réalisation des travaux de protection des bassins

versants (BV) et de lutte antiérosive (LAE) ne se conforme pas à des règles standardisées et, à ce jour, les approches d'intervention des différents partenaires ne sont pas harmonisées. Il s'ajoute une absence d'un document de référence pour orienter les interventions sur terrain. Le DOSABV a pour ambition de corriger les erreurs du passé pour avoir des règles standardisées et approches d'interventions sur terrain harmonisées. Le DOBASV recommande une synergie d'actions et une collaboration franche et effective des acteurs en matière d'aménagement des bassins versants. Il définit les meilleures techniques et les approches adaptées au contexte agro-écologique du Burundi, tout en privilégiant une approche d'aménagement des bassins versants communautaire, participative et inclusive. L'ultime visée de cette approche étant l'optimisation des productions agro-sylvo-pastorales et la gestion durable des ressources naturelles.

## 2. CONTEXTE ET JUSTIFICATION DU DOSABV

Le sol étant le capital productif le plus précieux pour l'homme, l'aménagement des bassins versants et la lutte antiérosive sont plus qu'une nécessité pour sa gestion durable. La réalisation des travaux de protection des bassins versants et de lutte antiérosive ne se conforme pas à des règles standardisées et les approches d'intervention des différents partenaires ne sont pas harmonisées. Cette diversité des techniques d'aménagement, une multiplicité des approches d'intervention ajoutées à une insuffisance dans la coordination des intervenants et des interventions rendent la situation plus complexe.

Un autre défi jusque là était une absence d'un document de référence pour orienter les interventions sur terrain en matière d'aménagement des bassins versants et de lutte antiérosive. Le Document d'Orientation Stratégique d'Aménagement des Bassins Versants et de Lutte Anti Erosive « DOSABV » a pour ambition de corriger les erreurs du passé pour avoir des règles standardisées et une approche d'intervention sur terrain harmonisée.

C'est un cadre idéal d'opérationnalisation de la politique sectorielle du MINEAGRIE en matière de lutte antiérosive telle que décrite dans le DOPEAE et de mise en œuvre du Projet National d'Aménagement Durable des Bassins Versants et de Lutte Antiérosive au Burundi. Le DOSABV recommande une synergie d'actions et une collaboration franche et effective des différents intervenants en matière d'aménagement des bassins versants et à tous les niveaux. De plus, le DOSABV définit les rôles et les responsabilités des parties prenantes et la redevabilité des administrations publiques et des communautés de base en cette matière.

Le DOSABV définit également les meilleures techniques et une approche harmonisée adaptée à notre pays en tenant compte des réalités de terrain ainsi que des réalités socio-économiques locales.

Le DOSABV propose enfin une harmonisation des normes et des techniques d'aménagement ainsi qu'une approche d'intervention associée à une coordination efficace du fait que tous intervenants s'aligneront derrière les mêmes principes convenus, adopteront les mêmes techniques proposées pour des sites présentant les mêmes caractéristiques et exposés aux mêmes aléas, utiliseront la même approche communautaire, participative et inclusive.

Ce document va inverser, on l'espère, la tendance et conduire toute la communauté burundaise à entreprendre, d'une manière efficace et efficiente, des actions concrètes et durables dans le domaine d'aménagement des bassins versants et de lutte antiérosive.

### 3. ETAT DES LIEUX DES AMENAGEMENTS AU BURUNDI

Le Burundi fait face à une dégradation continue et accélérée, entre autres en raison du changement climatique, de son environnement naturel dont les effets néfastes se traduisent en particulier par la baisse des capacités de production du secteur agricole, alors que 90% de la population vit en milieu rural. Les menaces qui influent négativement sur les bassins versants sont interdépendantes, souvent concomitantes et l'impact est d'autant plus important qu'il y a conjonction de plusieurs facteurs. Quatre facteurs principaux influencent l'érosion : le sol, la topographie, le couvert végétal et les techniques culturales.

La réalité est que les principales menaces sur les bassins versants persistent, qu'il existe encore des intervenants divers aux approches multiples et souvent contradictoires, qu'il s'observe une cartographie des intervenants déséquilibrée, qu'il subsiste des techniques d'aménagement des bassins versants qui ne tiennent pas compte des caractéristiques des sols, de la pente, de l'agressivité du climat et autres facteurs favorisants. On constate également qu'il y a des dispositifs antiérosifs mis en place de façon peu professionnelle, mal entretenus et souvent détruits par les bénéficiaires pour des raisons de spéculation. De plus, les enjeux et les défis à relever restent multiples et multiformes et sont notamment liés :

- ✓ **Aux usages** : urbanisation, agriculture, défrichement, artisanal, exploitation minière et des carrières, tourbe, or, argile.
- ✓ **A la qualité de la ressource eau** : pollutions diverses, éboulement des berges des rivières et des cours d'eau, exploitation des mines dans les zones humides, sable, moellons.
- ✓ **A la quantité de la ressource eau** : inondations, étiage, érosion.  
A la biodiversité et au paysage : disparition de la biodiversité et modification du paysage.

### 4. VISION ET AMBITION

Le Plan National de Développement du Burundi « PND-2018 » en son Programme 1 : Protection et amélioration du capital productif prévoit la réduction des pertes en terre par l'érosion, la restauration de la fertilité, l'initiation de la gestion rationnelle des exploitations agricoles, la protection des terres agricoles et l'utilisation rationnelle des ressources en eaux. Dans le domaine sectoriel d'aménagement des bassins versants et de la lutte antiérosive, la vision se décline de la manière suivante : « **l'aménagement et la gestion des terres et des eaux génère un développement prospère et durable à travers une intensification agro-sylvo-zootechnique garantissant une augmentation des revenus et une sécurité alimentaire durable des ménages ruraux d'ici 2027** ».

L'ambition précise quant à elle qu'**à l'horizon 2027, le Burundi a pour objectif l'aménagement et la gestion rationnelle de 100 % des bassins versants pour augmenter la productivité et la production agro-sylvo-zotechnique ainsi que la conservation et la gestion durable des ressources naturelles** ».

## 5. OBJECTIFS ET ORIENTATIONS STRATÉGIQUES DU DOSABV

### 5.1 Objectif global

L'objectif global est de promouvoir une gestion intégrale et intégrée des bassins versants et sous-bassins versants pour la restauration et la gestion durable des terres dégradées et de la fertilité des sols en vue d'améliorer significativement les conditions de vie des ménages.

### 5.2 Objectifs stratégiques

Les objectifs stratégiques du DOSABV se décrivent de la manière suivante :

1. Assurer une bonne gouvernance institutionnelle et réglementaire, pérenne et inclusive dans le secteur de l'aménagement des bassins versants ;
2. Mettre en place des mécanismes de participation et de responsabilisation des parties prenantes impliquées dans l'aménagement et la gestion des bassins versants ;
3. Assurer une gestion rationnelle, efficiente et durable de la ressource « eau » ;
4. Développer et utiliser des technologies innovantes dans l'aménagement des bassins versants adaptées aux différentes zones agro écologiques du pays ;
5. Mettre en place des mécanismes de financement durables pour une gestion durable des terres ;
6. Améliorer la coordination des interventions, le suivi-évaluation, la documentation et la communication des impacts des aménagements et de la gestion des bassins versants.

## 6. APPROCHE COMMUNAUTAIRE, PARTICIPATIVE ET INCLUSIVE DE MISE EN ŒUVRE DU DOSABV.

Cette approche est basée sur les principes suivants :

1. Le bassin versant ou sous bassin versant est pris dans son entièreté de l'amont jusqu'à l'aval ;
2. L'aménagement doit être intégral et intégré ;
3. Les activités de planification et d'aménagement des bassins versants impliquent toute la communauté entière habitant ou travaillant dans le bassin versant ;
4. Assurance qualité et quantité pour l'atteinte des objectifs de protection des bassin versants ;
5. Une sensibilisation même musclée par des techniciens et les membres de la communauté pour s'imprégner des phénomènes de dégradation des terres et des bienfaits de la protection des bassins versants.
6. Élaboration d'un plan d'aménagement du bassin versant ou sous bassin versant, conçu d'une manière participative avec toutes les parties prenantes et les communautés bénéficiaires.
7. Validation du plan d'aménagement et son calendrier d'exécution par toutes les parties prenantes ;
8. Mise en place d'un comité bassin versant multidisciplinaire pour le suivi des dispositifs installés (service technique, administration, représentant de la communauté, CCDC) ;
9. Responsabilisation des services techniques, de l'administration territoriale et de la communauté bénéficiaire dans la mise en œuvre du plan.

Cette approche proposée, pour être opérationnelle, sera soutenue par les actions prioritaires suivantes :

1. Harmoniser et institutionnaliser l'approche d'aménagement des bassins versants ;
2. Sensibiliser les bénéficiaires sur les phénomènes de dégradation des bassins versants et des ressources y afférentes ;
3. Élaborer les plans d'aménagement des bassins versants et sous bassins versants de manière participative ;

## 7. AMENAGEMENT INTEGRAL ET INTEGRE DES BASSINS VERSANTS

Un accent particulier sera mis sur les différentes mesures de lutte antiérosives adaptées à chaque zone agro-écologique. Les activités à développer sont : le reboisement des sommets de montagnes, l'agroforesterie, l'amélioration des parcours, la mise en place des dispositifs antiérosifs sur des terres cultivables, la protection des marais par des canaux de ceinture, l'aménagement des marais, la mise en défens des zones humides, la gestion et valorisation des eaux de pluie, la protection des sources et des cours d'eau tout en y associant une bonne gestion pour des fins de durabilité

Tout aménagement intégral et intégré des bassins versants se basera sur les principes suivants :

1. Une vision globale des problèmes ;
2. Un encadrement important des populations locales ;
3. Des techniques de conservation des sols et des eaux qui partagent les logiques paysannes de rentabilité globale à court terme basé sur l'amélioration des techniques culturelles traditionnelles et intégrées dans les systèmes des cultures.

## 8. NORMES ET TECHNIQUES RECOMMANDEES

Suivant les différents facteurs d'érosion tels qu'évoqués plus haut, des mesures correctrices sont préconisées suivant des normes et techniques recommandées.

En fonction de la pente du terrain, les normes suivantes seront appliquées :

**Tableau 1. Distance entre les lignes marquant les courbes de niveau piquetées**

<b>PENTE (%)</b>	<b>DISTANCE INCLINEE (m)</b>
2	30,5
4	19,0
6	15
8	13,5
10	12,5
12	10,5

Pour des sites appropriés à la mise en place des fossés antiérosifs, les courbes de niveaux doivent être :

1. Esthétiquement tracées conformément aux techniques de creusement ;
2. Avoir une largeur à la surface et au fond de 50 cm et une profondeur de 50 cm (50 cm \* 50 cm \* 50 cm) ;
3. Avoir la chaise de l'agronome d'une largeur de 50 cm installée chaque fois après 6 m de longueur linéaire.

De plus, le choix d'une technique appropriée pour l'aménagement et la gestion d'un bassin versant est guidé par une étude de faisabilité technique tenant compte de tous les facteurs liés à l'érosion notamment : la pente, la couverture végétale, la nature et la profondeur du sol. Une proposition de nomes est présentée dans le tableau ci-après :

Technique de protection des sols adaptée à chaque type de terre.

**Tableau 2. Proposition de techniques d'aménagement de bassins versants en fonction de la pente (%) et de la profondeur du sol.**

<b>Profondeur du sol</b> <b>Pente</b>	> 100 cm	< 100 cm
	<b>0-6%</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haies vives agroforestières + labour en courbe de niveau ;</li> </ul>
<b>6-25%</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terrasses progressives + haies vives agroforestières ;</li> <li>• Cultures pérennes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terrasses progressives + haies vives agroforestières ;</li> <li>• Cultures pérennes ;</li> <li>• Afforestation quand la profondeur du sol est limitée.</li> </ul>
<b>25-40%</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terrasses radicales (option acceptable seulement si le matériau géologique parental n'engendre pas des risques de glissement de terrain) ;</li> <li>• Terrasses progressives + haies vives agroforestières en transition vers une afforestation ou vers des cultures pérennes ;</li> <li>• Cultures pérennes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terrasses progressives + haies vives agroforestières en transition vers une afforestation ou vers des cultures pérennes ;</li> <li>• Afforestation quand la profondeur du sol est limitée ;</li> <li>• Cultures pérennes.</li> </ul>

Profondeur du sol Pente	> 100 cm	< 100 cm
<b>40-60%</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Micro-terrasses radicales (option acceptable seulement si le matériau géologique parental n'engendre pas des risques de glissement de terrain) ;</li> <li>• Terrasses progressives + haies vives agroforestières en transition vers une afforestation ou vers des cultures pérennes ;</li> <li>• Cultures pérennes ;</li> <li>• Afforestation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afforestation ;</li> <li>• Terrasses progressives + haies vives agroforestières en transition vers une afforestation ou vers des cultures pérennes, si pression foncière trop importante.</li> </ul>
<b>&gt; 60%</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afforestation ;</li> <li>• Cultures pérennes ;</li> <li>• Boisements familiaux à usages multiples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afforestation ;</li> <li>• Couvert végétal naturel.</li> </ul>

Source : Etude de faisabilité validée –PRRPB Mars 2021

## 9. LES CHANGEMENTS ATTENDUS

Les changements majeurs attendus sont notamment les suivants :

1. Des normes d'aménagement des B.V standardisées ;
2. Une approche d'intervention harmonisée pour tous les acteurs sur terrain ;
3. Des orientations stratégiques bien définies (5 au total) ;
4. Des mécanismes de participation et de responsabilisation des parties prenantes impliquées dans l'aménagement et la gestion des bassins versants mis en place ;
5. Un guide pratique simplifié de mise en œuvre du DOSABV élaboré et utilisable par tous les acteurs sur terrain ;
6. Des comités à tous les niveaux (national, provincial, communal, collinaire, bassins versants, S/B.V) ;
7. Une législation spécifique aux bassins versants aménagés mise en place.

Tous ces changements doivent concourir à :

1. La restauration de la fertilité des sols et des exploitations agricoles en particulier ;
2. La protection et la conservation des ressources naturelles ;
3. L'augmentation de la productivité et de la production agricoles ;
4. L'amélioration de la sécurité alimentaire et nutritionnelle de la population ;
5. L'augmentation des revenus des ménages.

## 10. CONCLUSION

La mise en œuvre du DOSABV est un engagement du Gouvernement qui constitue une valeur ajoutée dans le développement intégral du Burundi. Le processus de l'opérationnalisation du DOSABV a besoin des appuis des Partenaires Techniques et Financiers pour l'atteinte de l'objectif global, des objectifs spécifiques et les résultats attendus. D'autre part, les parties prenantes impliquées dans l'opérationnalisation qui sont le Gouvernement, les structures de mise en œuvre, les partenaires techniques et financiers (PTFs) ainsi que l'administration locale et les communautés surtout les agriculteurs doivent travailler en synergie et apporter leurs contributions en assumant pleinement leurs rôles et responsabilités.

Une communication active entre les différentes parties prenantes est aussi une condition de succès de la mise en œuvre du DOSABV et les activités de communication doivent viser quatre grands objectifs à savoir : (i) Former; (ii) Informer; (iii) Mobiliser et (iv) Valoriser. Conscient des différences qui existent entre les différentes couches sociales en terme de besoins, de rôles, de responsabilités et de problèmes dans leur vécu quotidien, le présent DOSABV reconnaît que les différents acteurs participent activement au processus de développement mais qu'ils ont des intérêts et des besoins spécifiques. Pour ce faire, il s'engage à intégrer dans sa mise en œuvre l'aspect genre qui est un principe fondamental et transversal pour un développement socio-économique durable.

L'approche par « bassin versant » soutient les systèmes d'aménagement des bassins versants par la conservation de zones définies et appelées « microenvironnements », grâce à la participation active des communautés qui y vivent. Elle a été identifiée pour obtenir des impacts techniques et sociaux plus rapides que les mesures précédentes qui ciblaient les paysans à titre individuel. L'accent est mis sur les mesures structurelles – surtout les terrasses progressives mais les systèmes végétatifs sont aussi promus. Les autres activités soutenues sont : la réalisation des études spécifiques d'aménagement des BV (S-BV) sur base de l'existant pour permettre un aménagement approprié et durable, la protection des sources, l'amélioration des cultures et de l'élevage, l'agroforesterie, la production du fourrage, les étangs piscicoles, etc. L'objectif spécifique est de favoriser la mise en œuvre d'une série de mesures d'aménagement des bassins versants qui apportent par la même occasion une amélioration de la production et de la productivité.

La mise en place du cadre institutionnel et politique créant un environnement favorable à l'adoption de l'aménagement des bassins versants nécessite un renforcement des capacités institutionnelles ainsi qu'une collaboration et un travail en réseau. Il est nécessaire d'établir des règles, des régulations et des statuts qui doivent être respectés. Un point clé de l'adoption et de la vulgarisation de l'aménagement des bassins versants est d'assurer une véritable participation des exploitants agricoles et des professionnels, à tous les stades de la mise en œuvre, afin d'intégrer leurs points de vue et d'assurer leur engagement.

Les clés du succès de la transposition à grande échelle de la gestion durable des terres résident dans l'élaboration d'un pool commun et standardisé de connaissances sur les technologies et approches de gestion durable des terres afin de les mettre en œuvre et de les diffuser. La mise à disposition de ces connaissances et des outils de comparaison, la sélection et la mise au point des pratiques de gestion durable des terres en fonction des environnements, des conditions écologiques, économiques, sociales et culturelles représentent une autre exigence.

## REMERCIEMENTS

L'auteur reconnaît les contributions des cadres du MINEAGRIE suivants, membres de l'équipe de rédaction du DOSABV : Cyrille Hicintuka (ISABU), Népomucène Bukuru (DGA), Justin Uwawe (Cabinet), Médiatrice Tumukunde (DGPATI&PPF), Placide Mugisha (DGPATI&PPF), Cyriaque Sakubu (DGPEAE), J. Berchmans Ngendakumana (DGMVAE), Anicet Nkurikiye (DGA), Benoît Barakamfitye (IGEBU) et Balthazar Barutwanayo (DGEREA). Il remercie également le Projet PAGRIS de l'IFDC pour avoir accepté la présentation du DOSABV durant le forum sur l'érosion hydrique au Burundi.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. 2ème Partie Bonnes pratiques de GDT adaptées à l'Afrique subsaharienne. GROUPES DE TECHNOLOGIES DE GDT ET ETUDES DE CAS.
2. Carte d'occupation du sol, IGEBU/2016.
3. Carte de dégradation des terres, IGEBU/2014.
4. Code de l'eau du Burundi. Burundi, Mars 2012, Burundi.
5. Code de l'environnement du Burundi. Burundi, Mai 2021, Burundi.
6. Code foncier du Burundi. Burundi, Août 2011, Burundi.
7. Code forestier du Burundi. Burundi, Juillet 2016, Burundi.
8. Contribution à la connaissance des régions naturelles du Burundi : données de superficie et de population par colline de recensement, Dirk W. Brgrn, Juillet 1992, ISABU.
9. Directives et bonnes pratiques de gestion durable des terres au Burundi. Cyrille Hicintuka & Astère Baragwandika, Mars 2016, MEEATU et MINAGRIE.
10. Directives et bonnes pratiques de gestion durable des terres au Burundi. MEEATU, MINEAGRIE/ Bujumbura, Septembre 2015, DGMVAE.
11. Enquête Nationale Agricole du Burundi 2019- 2020. MINEAGRIE. Gitega, 2019-2020.
12. Etude d'élaboration de la stratégie nationale d'utilisation durable des terres et des schémas régionaux d'aménagement, PRASAB, Novembre 2006, MATTE.
13. Etude d'impact environnemental et social dans la zone d'intervention du PRRPB. PRRPB, Février 2021, PRRPB.
14. Etude d'impact environnemental et social et un plan de gestion environnemental et social dans la zone d'intervention du PIPARV-B. PIPARV-B, Octobre 2020, PIPARV-B
15. Etude de proposition d'actions visant l'augmentation de l'impact de la lutte antiérosive dans la zone du PAPAB. Ferdinand Nderagakura, Juin 2016, PAPAB.
16. Etude sur les coûts de l'inaction contre la dégradation des sols au Burundi. Gahimbare Arthémon, Ruzima Salvator & Ndabirorere Salvator, Novembre 2010, MEEATU
17. Etude sur les coûts de l'inaction contre la dégradation des sols au Burundi. PNUD/Bujumbura. Bujumbura Août 2011, MEEATU.
18. 18. Gestion par bassin versant Volet 4 : Planification stratégique. Gestion par bassin versant : guide pratique pour une gestion intégrée des eaux en Suisse OFEV 2012.
19. Guide d'aide à la décision en agroforesterie, Tome 1, Fabienne Mary & François Besse, Avril 1996, CTA.
20. Guide de la Méthodologie d'Évaluation des Opportunités de Restauration des paysages forestiers (MEOR). Gland, Suisse : UICN. 125pp. 2014.
21. Guide de traitement des ravins à l'usage des acteurs communautaires. Préparé par : Ali Blali ; expert consultant en aménagement des bassins versants et en conservation des sols, Mai 2011
22. Guide pratique sur la gestion de l'eau par bassin versant à l'intention des industries minière et métallurgique. International Council on Mining and Metals,
23. L'aménagement participatif des bassins versants et l'augmentation de la production. Décembre 1998, MEEATU
24. La pratique de la gestion durable des terres. Directives et bonnes pratiques pour l'Afrique subsaharienne. Applications sur le terrain. Préparé par WOCAT. Coordination FAO de l'ONU. Publié en partenariat avec TerrAfrica, 2011.
25. Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. Editeurs scientifiques Eric Roose, Hervé Duhaufour et Georges De Noni. IRD EDITIONS Marseille, 2012

26. Manuel de formation sur les pratiques de gestion durable des sols. Cyrille Hicintuka, Octobre 2012, MEEATU & PNUD.
27. Module de formation des formateurs des personnels des ministères impliqués dans la gestion des terres (MINEAGRIE, MEEATU) sur « Les pratiques forestières, agroforestières et gestion de l'eau. Baragwandika Astère. Septembre 2012. MEEATU.
28. Note sur les standards pour l'aménagement, la réhabilitation et l'entretien des marais, bas-fonds et plaines (SAREM), adoptée le GSADR en juin 2017.
29. Note sur les standards d'aménagement, de réhabilitation et d'entretien des bassins versants (SAREB)-Draft 2 – VERSION DE 2017.
30. Orienter les interventions futures pour répliquer à grande échelle la gestion durable des terres, FAO & TerraFrica, Avril 2016, FAO & TerraAfrica.
31. Plan National d'Aménagement des bassins versants. Résumé et conclusions du rapport synthèse. Maroc. Non daté.
32. Politique nationale de l'eau. MEEATU/Bujumbura, Décembre 2009.
33. Programme d'action national d'adaptation (PANA) au Burundi. Sous-secteur : Les paysages, Stanislas Nsabimana, Mai 2006, MATTE.
34. Programme d'action national d'adaptation au changement climatique, MATTE, Janvier 2007, MATTE.
35. Programme d'action national de lutte contre la dégradation des terres 2011- 2016. Benoît Nzigidahera, Octobre 2010, MEEATU.
36. Programme de gestion transfrontière des agro-écosystèmes du bassin de la Kagera au Burundi. Projet TAMP. Plan d'action communautaire du micro bassin versant de KIBOGOYE. Novembre 2011
37. Protocole pour la lutte antiérosive au Burundi et son plan d'action de 2016. MINAGRIE, 2016.
38. PTBA, 2008. Programme de relance et de développement du monde rural (PRDMR, prêt FIDA N° 500-&BDI, prêt fonds OPEP N° 801P). République du Burundi/MEEATU.
39. Rapport final des travaux exécutés PABVARC. PABVARC /Bujumbura, Juillet 2018, MEEATU.
40. Rapport final des travaux exécutés par le projet GCRCCC au Burundi. GCRCCC/Gitega, 2020, IGEBU.
41. Schéma Directeur d'Aménagement et de mise en valeur des marais. PNUD/FAO/ Bujumbura, Septembre 2000, MEEATU.
42. Schéma provincial d'aménagement du territoire de Muyinga (existe pour toutes les provinces). MEEATU / Muyinga Décembre 2008, MEEATU.
43. Séminaire sur l'érosion des sols au Burundi, ISABU, Octobre 1992, ISABU.
44. Stratégie d'investissement et plan de financement du plan d'action nationale de lutte contre la dégradation des sols. PUNUD-MEEATU.
45. Stratégie Nationale et Plan d'Action Contre la Dégradation des sols. MINEAGRIE/Bujumbura, Juin 2011, MINEAGRIE.
46. Stratégie nationale et plan d'action de lutte contre la dégradation des sols, 2011-2016. Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme. Bujumbura, Juin 2011.
47. Stratégie nationale et plan d'action de lutte contre la dégradation des sols 2011-2016. MEEATU/Bujumbura, Avril 2011.
48. Stratégie sous sectorielle d'aménagement des marais et de protection des BV « Guide d'intervention ». MINEAGRIE/MEEATU. Bujumbura, Octobre 2011.
49. Terres et vivres. Robert Delleré, Avril 1989, CTA.
50. Troisième Communication Nationale sur les Changements Climatiques. MINEAGRIE/Bujumbura, Octobre 2019, MINEAGRIE.
51. Watershed management. Professeur T.I. Eldho, pas de date d'édition

# Thème 2

## Réurrence des extrêmes climatiques et mécanismes associés en Afrique de l'Est : Cas du Burundi

A. Nkuzimana<sup>1\*</sup>, B. Shuoben<sup>2</sup>, J.F.R. Sindayihebura<sup>1</sup> et J.M. Ndayiragije<sup>3</sup>

1. Département des Sciences Géographiques, de l'Environnement et de la Population, Centre de Recherche et d'Études sur le Développement dans des Sociétés en Reconstruction (CREDSR), Université du Burundi, B.P 5142
2. Department of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Ningliu Road 219, P.O.Box, 210044, China
3. Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université du Burundi

**\*Auteur pour Correspondance : Email :[athanase.nkuzimana@ub.edu.bi](mailto:athanase.nkuzimana@ub.edu.bi),**

## Résumé

Le Burundi, comme la plupart des pays des régions tropicales a enregistré de dégâts humains, socio-économiques et environnementaux liés aux inondations dévastatrices causées par de fortes précipitations. Cette étude a pour but de diagnostiquer la variabilité des extrêmes pluviométriques, leur intensité et leur survenance ainsi que l'identification des mécanismes associés au Burundi. Divers types de données ont été utilisées, notamment les données issues de l'IGEBU, les données réanalysées ainsi que des données modélisées. Différentes méthodes ont servi au diagnostic et analyses de fréquences et tendance des extrêmes pluviométriques. Les principaux résultats ont montré que le nombre de jours à pluies intenses (entre 30 mm et 50 mm) et pluies extrêmes ( $\geq 50$  mm) a sensiblement augmenté à partir de 2006. 64% des pluies extrêmes sont enregistrés durant la saison culturale A (SOND) alors que la saison culturale B (MAM) n'a enregistré que 36 %. De 1990 à 2010, le nombre de jours de pluie a diminué de 30 % et légèrement augmenté depuis 2014 principalement dans les plateaux centraux et la zone de la crête Congo-Nil. Le nombre de jours consécutivement humides, de pluies intenses et celui des pluies extrêmes varie selon les zones éco-climatiques du Burundi. A l'Ouest, trois jours consécutivement humides peuvent déclencher des inondations d'un côté et des mouvements de masse de l'autre côté et causer de pertes en terre énormes dans les Mirwa. Plus de 97 % de perte en terre sont liées aux pluies intenses. Les facteurs associés à la survenance des pluies extrêmes diffèrent selon la topographie, l'origine des masses d'air humides et l'influence des facteurs climatiques tels qu'ENSO, IOD et MJO. 73 % des précipitations très fortes et extrêmes se sont produites au cours des années liées au phénomène ELNINO et à la phase positive du Dipôle de l'Océan Indien (IOD).

**Mots clés : Extrêmes climatiques, extrêmes précipitations, Jours consécutivement pluvieux, Facteurs climatiques, Burundi.**

## Summary

Burundi, as most tropical countries, recorded human, socio-economic and environmental damage linked to devastating floods caused by heavy and extreme rainfall. This study aims to diagnose the variability of rainfall extremes, their intensity and their occurrence as well as the identification of the mechanisms associated across Burundi. Various types of data were used, such as dataset from IGEBU, reanalyzed data as well as modeled data. Different methods were used to diagnose and analyze frequencies and trends in rainfall extremes. The main results showed that the number of days with heavy rainfall (between 30 mm and 50 mm) and extreme rainfall ( $\geq 50$  mm) increased significantly from 2006. 64% of extreme rains were recorded during the grow season A (SOND) while grow season B (MAM) recorded only 36%. From 1990 to 2010, the number of rainy days decreased by 30% and has increased slightly since 2014, mainly in the central plateaus and the Congo-Nile ridge area. The number of consecutively wet days, intense rains and extreme rains varies according to the eco-climatic zones of Burundi. In the West, three consecutive wet days can trigger floods on one side and mass movements on the other side and cause enormous land losses. More than 97% of soil loss is linked to heavy rains. The factors associated with the occurrence

of extreme rainfall differ depending on topography, the origin of humid air masses and the influence of climatic factors such as ENSO, IOD and MJO. 73 % of very heavy and extreme rainfall occurred during the years linked with the ELNINO phenomenon and the positive phase of the Indian Ocean Dipole (IOD).

**Key words : Climate Extremes, Extreme rainfall, Consecutive wet days, Climatic drivers, Burundi.**

## 1. INTRODUCTION

Le changement climatique est un phénomène qui touche tous les secteurs de la vie socio-économique des pays du monde et ses effets varient d'une région à l'autre selon la capacité d'adaptation ou stratégies de résilience dont disposent les pays et les communautés de base (Ngoma et al., 2022; Ongoma & Chen, 2017; Zhang et al., 2019). Les extrêmes météorologiques deviennent de plus en plus intenses et leur récurrence inquiète l'humanité. Des conditions climatiques extrêmes et des conditions météorologiques extrêmes ont été observées depuis 1950 et ont eu une incidence sur la vie socio-économique de nombreux pays, dont le Burundi (Indeje et al., 2000; Muhire et al., 2015; Nkunuzimana et al., 2019). Dans l'étude menée par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), Lanza et al. (2005) ont révélé que les événements avec des intensités de précipitations extrêmement élevées affectent tous les secteurs de la vie notamment l'agriculture, le transport, l'énergie, le domaine de l'infrastructure etc. La destruction des cultures et de la végétation dans de nombreux pays (Limbu & Guirong, 2019; Nkunuzimana et al., 2020b; Ogwang, Chen, et al., 2015; Stott et al., 2016).

Des rapports récents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont indiqué que la fréquence et l'intensité des extrêmes météorologiques deviennent de plus en plus inquiétantes et emportent plusieurs vies humaines et causent de sérieuses pertes socio-économiques et environnementale (Prabhakar, 2010) (Field et al., 2012) (IPCC, 2018). La fréquence des épisodes de précipitations extrêmes est susceptible d'augmenter à l'avenir et affectera considérablement l'environnement humain, social et physique (Nkunuzimana et al., 2019) (Prabhakar 2010).

Tous les pays d'Afrique de l'Est dépendent en grande partie de l'agriculture pluviale, et leurs économies dépendent en grande partie de la variabilité saisonnière des précipitations. Depuis quelques décennies, les inondations constituent une grave menace pour le Burundi (Ongoma et al., 2016) (Ngarukiyimana et al., 2018) (Ngoma et al., 2021).

Les extrêmes pluviométriques sont parmi les causes majeures des inondations et des mouvements de masse (glissements de terrains, coulées boueuses, éboulements, effondrements etc.) observés dans plusieurs localités du globe spécialement dans les pays en voie de développement. A l'échelle régionale, ces phénomènes ont enregistré plusieurs dégâts aussi bien humains que matériel sans oublier l'environnement. A titre d'exemple, les récentes fortes pluies (du 2 au 4 Mai 2023) ont provoqué le décès de 438 personnes et des centaines d'habitants portés disparus à l'Est de la RDC, la mort de 130 personnes, plus de 5 100 maisons détruites à l'Ouest du Rwanda. (<https://www.africanews.com>: 15 Mai 2023; <https://www.rfi.fr/fr/afrique/> : 16 Mai 2023). Depuis 2020, la population de Gatumba est sous la menace permanente des inondations causées par le débordement de la Rusizi et la remontée des eaux du Lac Tanganyika (environ 30.000 sinistrés climatiques)

Plusieurs centaines de milliers se sont retrouvés sans abris, spécialement dans la zone Gatumba et les quartiers riverains du lac Tanganyika comme Kibenga rural et Kajaga (Nsabimana et al., 2023).

Les glissements de terrain se sont intensifiés ces dernières années. Depuis 2014, l'Ouest du Burundi a enregistré beaucoup de cas de glissements de Terrain. Les glissements meurtriers de décembre 2019 qui ont fait 28 morts et 11 portés disparus dans la localité de Nyempundu en commune Mugina, laissant derrière beaucoup de sinistrés. Une partie de ces sinistrés de trouvent dans le site de Nyamakarabo (environ 1280 personnes). Glissements de terrain dans la zone Kibuye en Commune Isale (Mars 2023), Glissements de terrain à Rugombo; Kamesa, Nyaruhongoka, Kijejete, etc. (Polyakov et al., 2023).

Dans le contexte actuel de pression démographique qui est à la base de la dégradation des terres suite à l'absence ou mauvaises pratiques d'activités agricoles ou d'autres types d'aménagement, les pluies extrêmes entraînent de pertes en terre énormes. Selon Ndayiragije (2021), la perte en terres est estimée à 4 tonnes par ha et par an à l'Est du Burundi, 8 tonnes par ha et par an au centre du pays, 100 tonnes par ha et par an à l'Ouest du Burundi (dans région naturelle des Mirwa)(<https://burundi-eco.com/reboisement-mirwa-priorite-des-priorites/>)

La présente étude a pour but de faire une investigation sur les extrêmes pluviométriques permettant de comprendre différents risques notamment les risques d'inondation, mouvement de masse, l'érosion hydrique, perte en terre etc. au Burundi et permettre aux décideurs politiques et partenaires au développement de prendre de mesures préventives ou d'adaptation pour le bien-être de la population et le développement durable du Burundi.

## 2. LOCALISATION, DONNEES ET METHODOLOGIE

### 2.1 Présentation de la zone d'étude

Le Burundi est l'un des pays de la Communauté Est Africaine situé entre 2°15' et 4°30' de latitude sud et entre 28°58' et 30°53' de longitude Est (Figure 1). La diversité du paysage coïncide avec la diversité due microclimats de l'Est à l'Ouest. Le Burundi connaît généralement deux saisons des pluies par an (Nkunzimana et al., 2021) (Ndayiragije & Li, 2022).

Deux saisons humides avec une période de transition de courtes périodes sèches caractérisent la climatologie du Burundi. La saison courte commence à partir de septembre et se termine en décembre (SOND) tandis que la saison longue couvre Mars-Avril-Mai (MAM). La transition entre les deux saisons est caractérisée par une courte période semi-sèche couvrant les mois de janvier et février et est généralement observé dans les régions de l'est, du nord et de l'ouest du Burundi.

D'une manière générale, la climatologie du Burundi est caractérisée par un régime pluviométrique bimodal qui correspond au déplacement de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT) du Sud vers l'hémisphère Nord et vice-versa(Nkunzimana et al., 2020a).

Le Burundi connaît généralement deux saisons humides, à savoir MAM et SOND, une saison relativement sèche connue localement sous le nom de « Umukubezi » (JF) et une longue saison sèche (JJA).

D'après les recherches menées par de nombreux scientifiques, il a été constaté que la plupart des pays d'Afrique de l'Est vivent de l'agriculture pluviale et moindre excédent ou décalage affecte la vie socio-économique de la population et des pays en général.

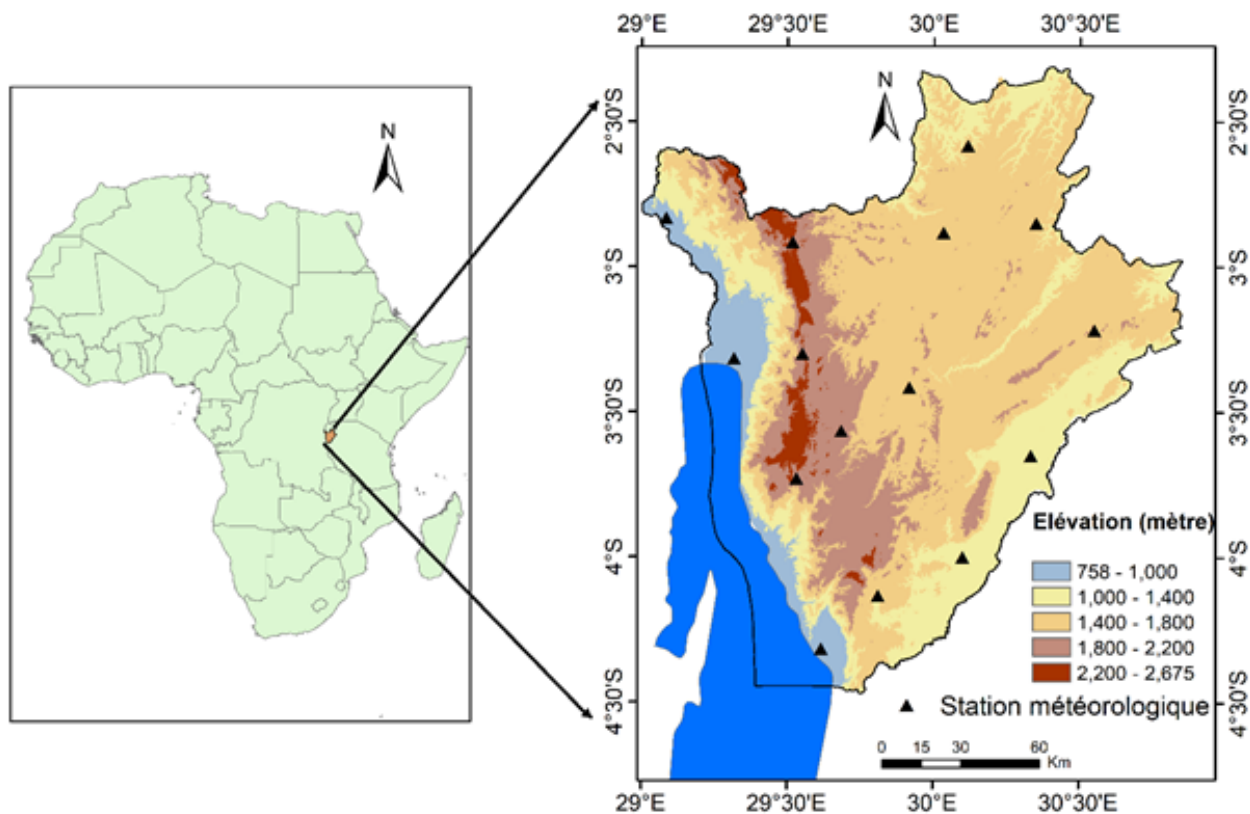


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

## 2.2 Données et méthodologie

Pour mener à bien cette étude, des données de différentes sources ont été collectées. Les données issues de l'Institut Géographique du Burundi sur la période 1981 à 2020, les données rebanalisées issues de ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) et des données issues de différents modèles pour les analyses de changements futurs en terme de précipitations.

Cette étude a utilisé les indices climatiques initiés par ETCCDI (Groupe d'experts sur la détection et les indices du changement climatique).

Table 1. Tableau des indices de calcul des extrêmes pluviométriques.

IDENTIFICATION	APPELATION	DEFINITION	UNITE
<b>SDII</b>	Indice simple de l'intensité des Pmm	Moyenne de Pmm de jour de pluie	mm/J
<b>CWD</b>	Jours consécutivement pluvieux	Nombre de jours consécutifs avec Pmm $\geq$ 1mm	Jours
<b>R10mm</b>	Nombre de jours avec Pmm $\geq$ 10mm	Le nombre annuel de jours ayant enregistré Pmm $\geq$ 10mm	Jours
<b>R20mm</b>	Nombre de jours à fortes précipitation	Le nombre annuel de jours ayant enregistré Pmm $\geq$ 20mm	Jours
<b>R50mm</b>	Nombre de jours d'extrême précipitations	Le nombre annuel de jours ayant enregistré Pmm $\geq$ 10mm $\geq$ 50mm	Jours

<b>IDENTIFICATION</b>	<b>APPELATION</b>	<b>DEFINITION</b>	<b>UNITE</b>
<b>Rxl1day</b>	Maximum de Pmm en une journée	Volume maximal de précipitation en une journée calculé par mois	mm
<b>Rx5day</b>	Précipitations maximales sur cinq jours pendant un mois donné	Volume maximum de précipitations enregistré en 5 jours consécutifs	mm
<b>R95p</b>	Jours très pluvieux	Total annuel de Pmm lorsque Pmm > 95e percentile (R95pTOT)	mm
<b>R99p</b>	Jours extrêmement pluvieux	Total annuel de Pmm lorsque Pmm > 99e percentile (R99pTOT)	Jours
<b>PRCPTOT</b>	Total annuel des jours de précipitations	Total du volume annuel des Pmm des jours dont Pmm ≥ 1mm	Jours

D'autres méthodes ont été également utilisées à savoir la Fonction orthogonale Empirique (Empirical Orthogonal Function : EOF), l'Indice Standardisées de précipitation, etc.

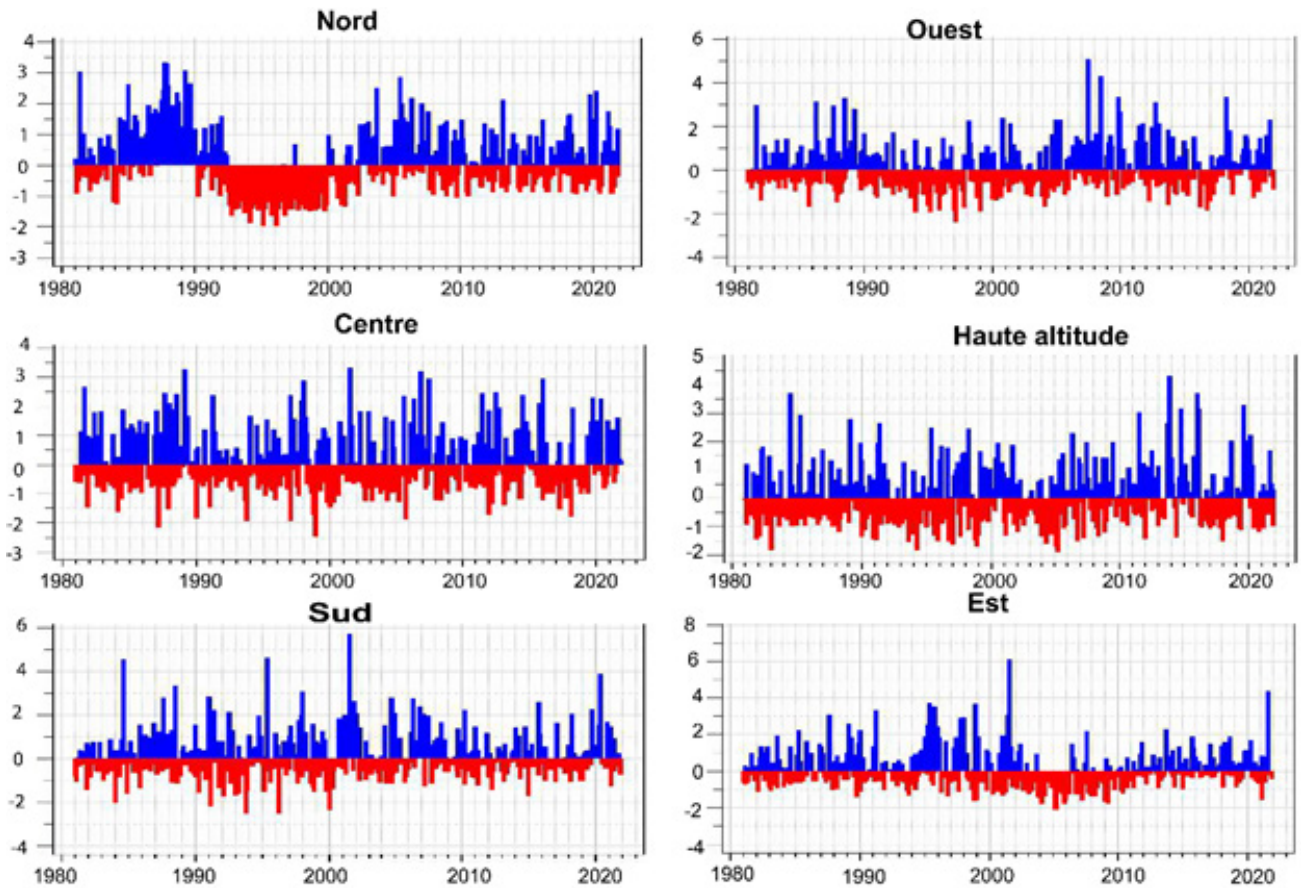
### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour comprendre la survenance des extrêmes précipitations, la première étape a consisté à l'analyse de l'anomalie pluviométrique 1981 à 2022. Les résultats d'analyse ont montré la variabilité interannuelle spécialement dans la région Nord où la décennie 1990 était caractérisée par une diminution sensible des précipitations accompagnée par une période de pluies comme représenté dans la Figure 2. Le même phénomène est observable dans d'autres localités du pays, mais sur des périodes différentes (Figure 2). À l'Est du Burundi, le décalage pluviométrique a été beaucoup plus sensible depuis 2005 de même que la région sud du Burundi.

L'ouest du Burundi a connu des fluctuations climatiques notamment durant les décennies 1990 et 2000. Les fluctuations pluviométriques ont été également enregistrées dans la zone à haute altitude (Zone de crête Congo-Nil) mais relativement basses comparativement à d'autres localités.

Selon cette analyse d'anomalies standardisées, il a été observé que la période 1990-2007 a enregistré moins de précipitations excepté l'année 1997 dont l'abondance des pluies est liée au phénomène El-Nino (Limbu & Guirong, 2019; Ngarukiyimana et al., 2017) et l'année 2006 liée au Dipôle de l'Océan Indien (King'uzza & Tilwebwa, 2019; Nkunuzimana et al., 2020). L'année 1993 a été l'année la plus sèche de la période étudiée, une année qui n'a pas enregistré de cas d'extrêmes précipitations. La période 1990-2007 a enregistré moins de précipitations et a été caractérisée par de mauvaises récoltes et la famine dans de nombreuses régions du Burundi spécifiquement la province de Kirundo au Nord. La période 2000-2007 a été caractérisée par une sécheresse agricole, en particulier dans la partie nord et orientale du Burundi (Nkunuzimana et al., 2021). De fortes précipitations ont été enregistrées durant les années 1984, 2000, 2007, 2008, 2014, 2016. Il faut rappeler que l'année 2015-2016 a enregistré de fortes pluies ce qui coïncide avec la phase positive du Dipôle de l'Océan Indien (Ngarukiyimana et al., 2017; Ogwang, Ongoma, et al., 2015).

À côté des fluctuations interannuelles, il faut ajouter les variabilités intra saisonnières entre la petite saison de pluie (SOND) et la grande saison de pluie (MAM). La grande saison de pluie a enregistré une baisse significative des précipitations depuis 1990.



**Figure 2. Anomalies standardisées dans les six régions éco-climatiques du Burundi durant la période 1981-2020**

L'analyse des extrêmes pluviométriques calculées à base des indices établies par ETCCDI pour la région ouest (Station synoptique de Bujumbura) sur la période de 1935 à 2020 montre des épisodes d'extrêmes pluies et des épisodes de déficits hydriques permettant de déceler l'influence des changements climatiques d'un côté et des activités anthropiques de l'autre.

La figure 3 montre à suffisance que les épisodes d'extrêmes pluviométries commencent avec les années 1955 avec le maximum de 142 mm par le 11 Novembre 2009 (Figure 3 et Figure 4). Les précipitations minimales enregistrées en 1 jours se sont multipliées depuis 1985. Il est a constaté que la période pendant laquelle a été enregistrée la récurrence des extrêmes pluies correspond à la période ayant enregistré les précipitations maximales et les précipitations dont 95% ont enregistré 1 mm et plus durant la période 1935 à 1980.

L'analyse des jours consécutivement pluvieux est un indice très important dans l'identification de risque d'inondation ou des mouvements de masse (mouvement de terrain, éboulement, effondrement, coulées boueuses, etc.). L'analyse sur le période 1935 à 2018 montre que le nombre de jours consécutivement pluvieux a diminué. Toutefois, c'est durant la même période où a été enregistré la fréquence élevée des jours d'extrêmes pluies (Figure 4). Bien que la tendance soit décroissante on distingue une variabilité durant cette période, durabilité qui justifie les épisodes des années pluvieuses et celle des années sèches ainsi que le nombre total de jours de pluies. Les jours de fortes pluies ont été enregistrés dans la décennie 1960 période qui coïncide avec la remontée des eaux du lac Tanganyika qui a causé beaucoup de dégâts matériels, sociales et environnementales au niveau du littoral du Lac Tanganyika. Depuis cette période le nombre des jours consécutivement pluvieux et ceux de forte précipitation a sensiblement diminuée mais émaillée de forte variabilités spécialement durant la période d'après 1990.

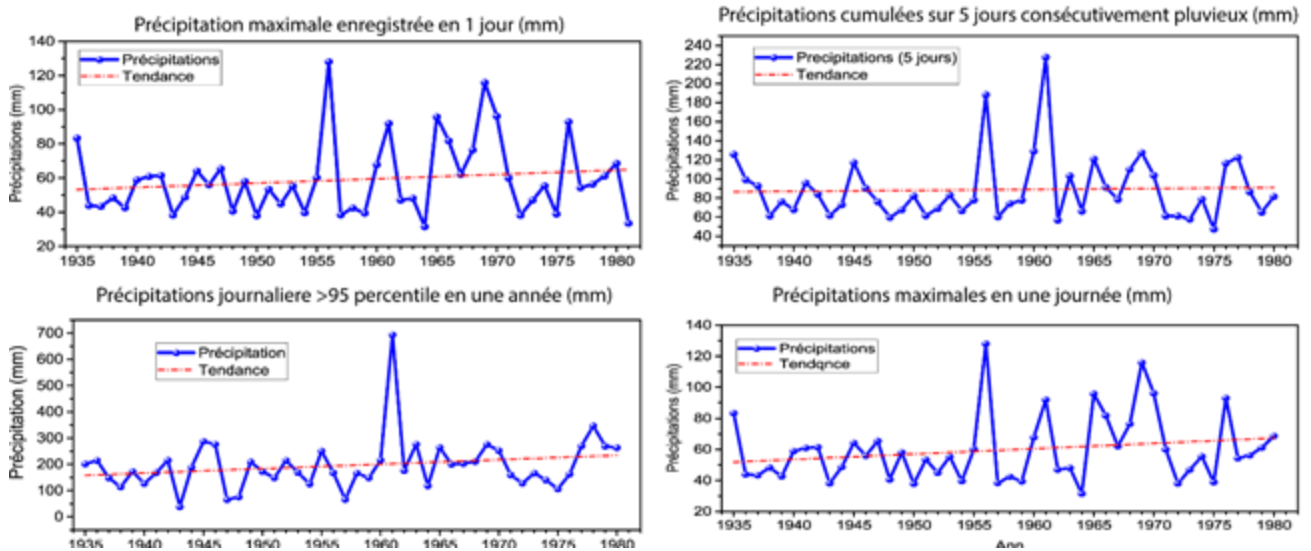


Figure 3. Fréquence des fortes précipitations à l'Ouest du Burundi (1935 à 1980)

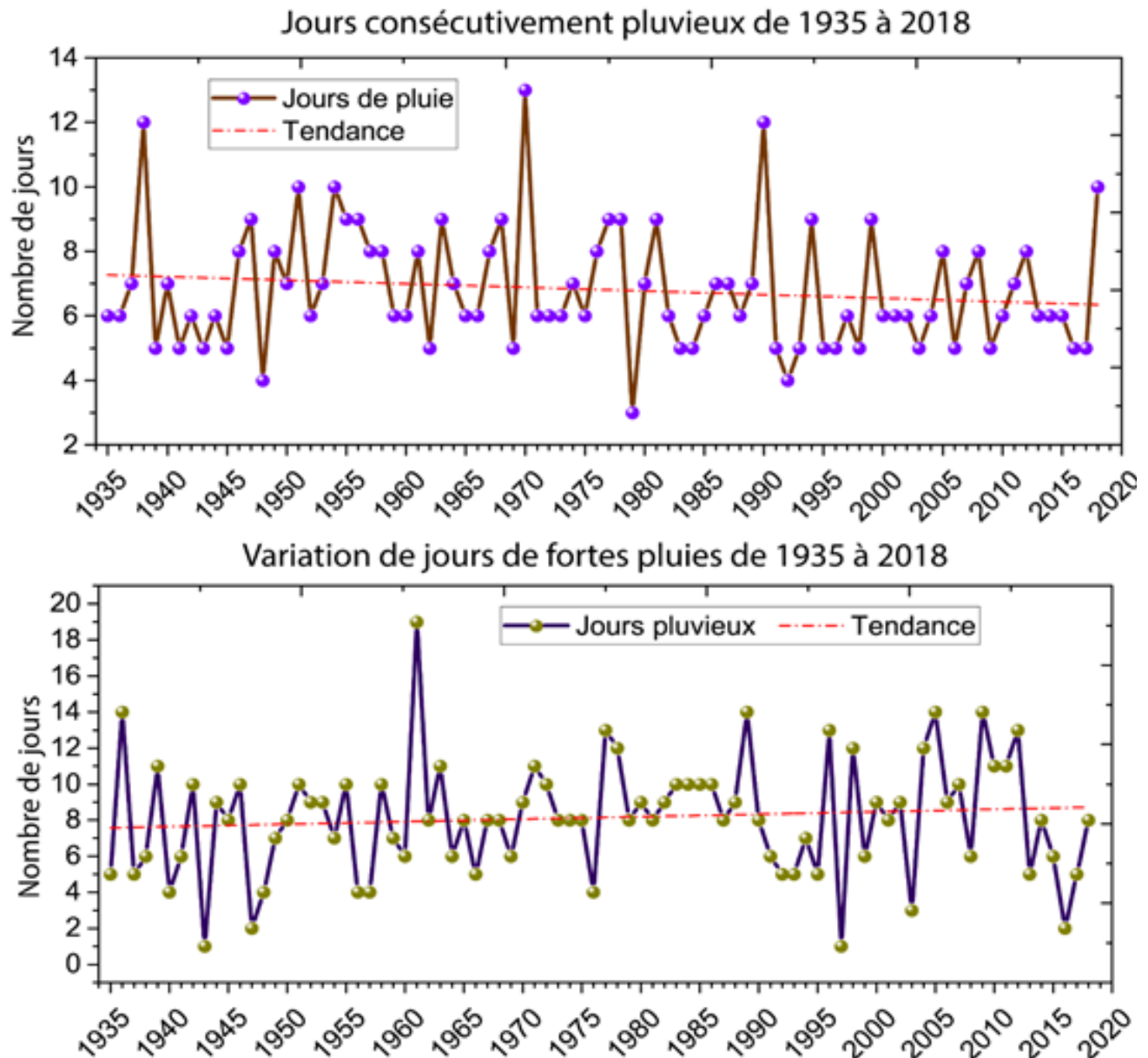
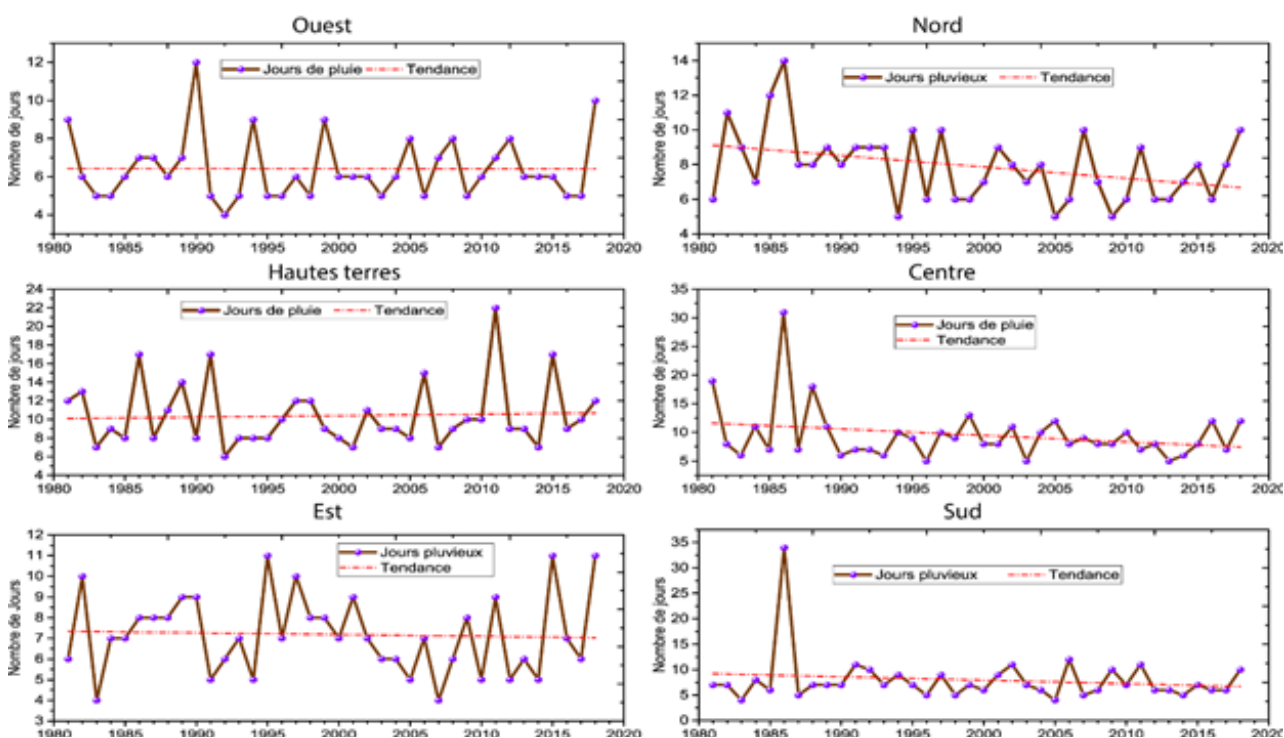


Figure 4. Comparaison entre la variabilité des jours consécutivement pluvieux et de celle de fortes pluies de 1935 à 2018 à Bujumbura

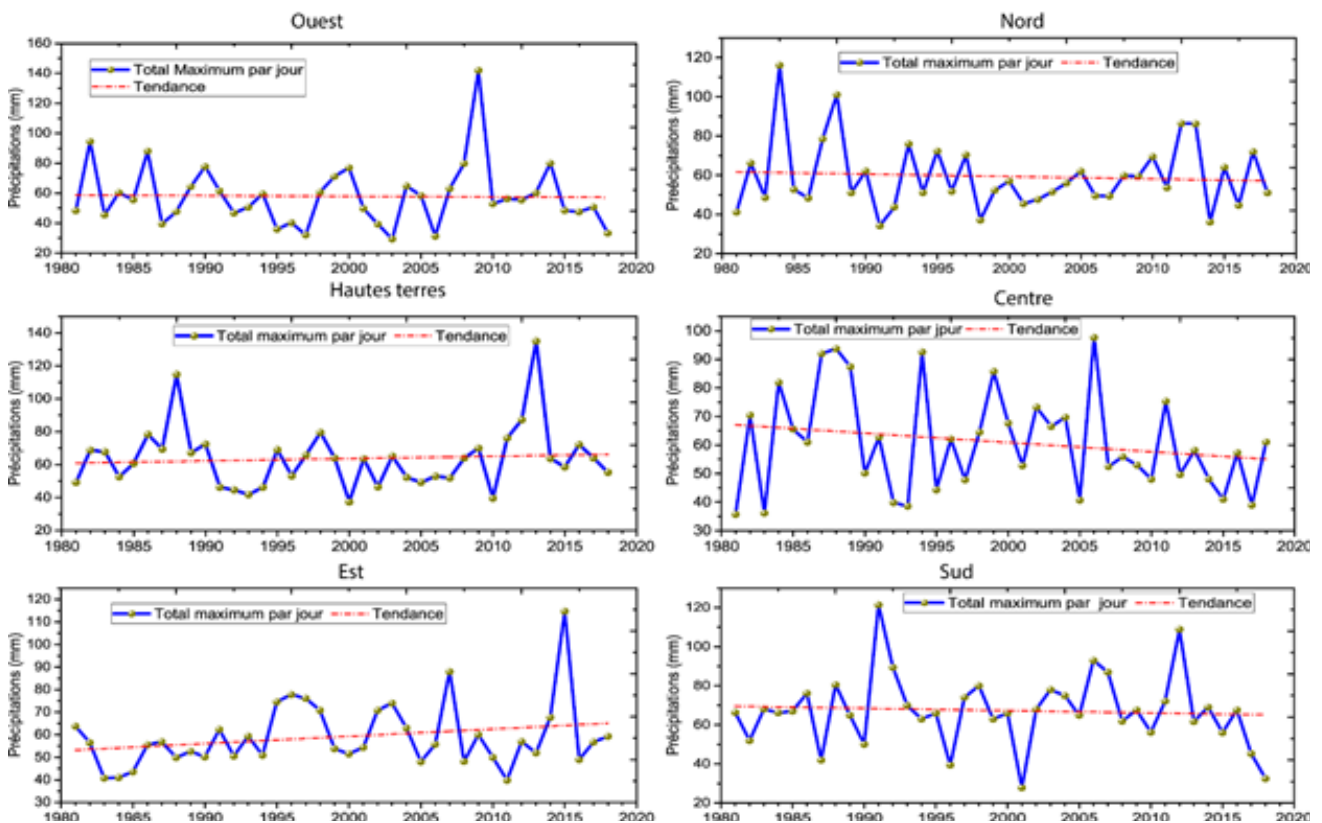
L'analyse des jours consécutivement pluvieux dans les 6 zones éco-climatiques du Burundi sur la période 1980-2018 a montré la diversité de survenance dans ces différentes zones (Figure 5). Les jours consécutivement pluvieux contribuent à l'intensification de l'érosion hydrique et de la perte en terre. Bien que la tendance soit décroissante pour toute les 6 zones éco-climatiques, certaines régions ont enregistré le nombre relativement élevé alors que les autres en connu une diminution sensible. L'ouest, les hautes terres, l'Est et le Nord ont enregistré des jours consécutivement pluvieux avec de fluctuations interannuelle tandis que le Sud, le centre sont caractérisées par une diminution sensible des jours consécutivement pluvieux avec une courbe significativement décroissante. Les périodes de récurrence des jours consécutivement pluvieux change d'une région à l'autre. Alors que le nombre de jours consécutivement pluvieux a diminué durant la période 1995 à 2006 à l'Ouest, il a relativement augmenté en à l'Est avec un décalage relativement faible vers 2000. Les jours consécutivement pluvieux ont connu une tendance significativement décroissante de 1987 à 2016 ce qui confirme le déficit pluviométrique enregistré dans cette région depuis les années 1990 spécialement dans les commune Busoni, Bugabira (Figure 5). De plus, les 3 régions caractérisées par la diminution des jours consécutivement pluvieux ont en commun le nombre élevé de ces jours durant la période 1984-1988 avec un maximum de 33 au centre, 14 au Nord et 34 au sud. Ce nombre a sensiblement chuté au sud passant de 34 en 1986 à moins de 10 sur toutes les années suivantes. Les pertes en terre varient d'une région éco climatique à l'autre en fonction de l'intensité des précipitation, de la topographie et du couvert végétale.



**Figure 5. Jours consécutivement pluvieux dans les six régions éco-climatiques du Burundi**

La comparaison du volume total de pluie enregistrée par jour dans les six zones éco-climatiques du Burundi a révélé que l'Ouest du Burundi est la seule région ayant enregistré un total de précipitations journalières le plus élevé, soit 142 mm enregistré en 2009. C'est depuis cette année qu'ont commencé les inondations dévastatrices au Nord de la ville de Bujumbura. C'est le cas des crues causées par la rivière Mutimbuzi qui a inondé une grande partie de la zone Nord de la ville de Bujumbura et une partie de l'Aéroport international de Bujumbura. Il faut souligner que les fortes pluies qui s'abattent dans les contreforts des Mirwa sont à la base de l'intensification de l'érosion hydrique et de la perte en terre énorme, ce qui se justifie par des matériaux charriés par ces rivières à caractère torrentiel en provenance des montagnes à longues et fortes pentes à vallées encaissées et structures géologiques malléables (Figure 6).

Les résultats ont révélé que la région de hautes montagnes connue pour enregistrer des précipitations régulières comparativement à d'autres régions n'a pas le nombre élevé de jours dont le volume diurne est élevé exceptée l'année 1987 (118 mm) et 2013 (138 mm), pendant le reste des années le volume total journalier reste inférieur à 80 mm. De même, les plateaux centraux, visiblement dont le régime pluviométrique est régulier a enregistré des jours de pluies n'atteignant pas 100 mm (Figure 6). Depuis 2007, le volume de précipitations journalières a sensiblement diminué. L'Ouest, la zone de hautes terres et l'Est ont en commun la survenue des jours de fortes pluies durant la période d'après 2005 contrairement au Nord, centre et sud qui ont vu le volume total de précipitations journalières diminuer (Figure 6).

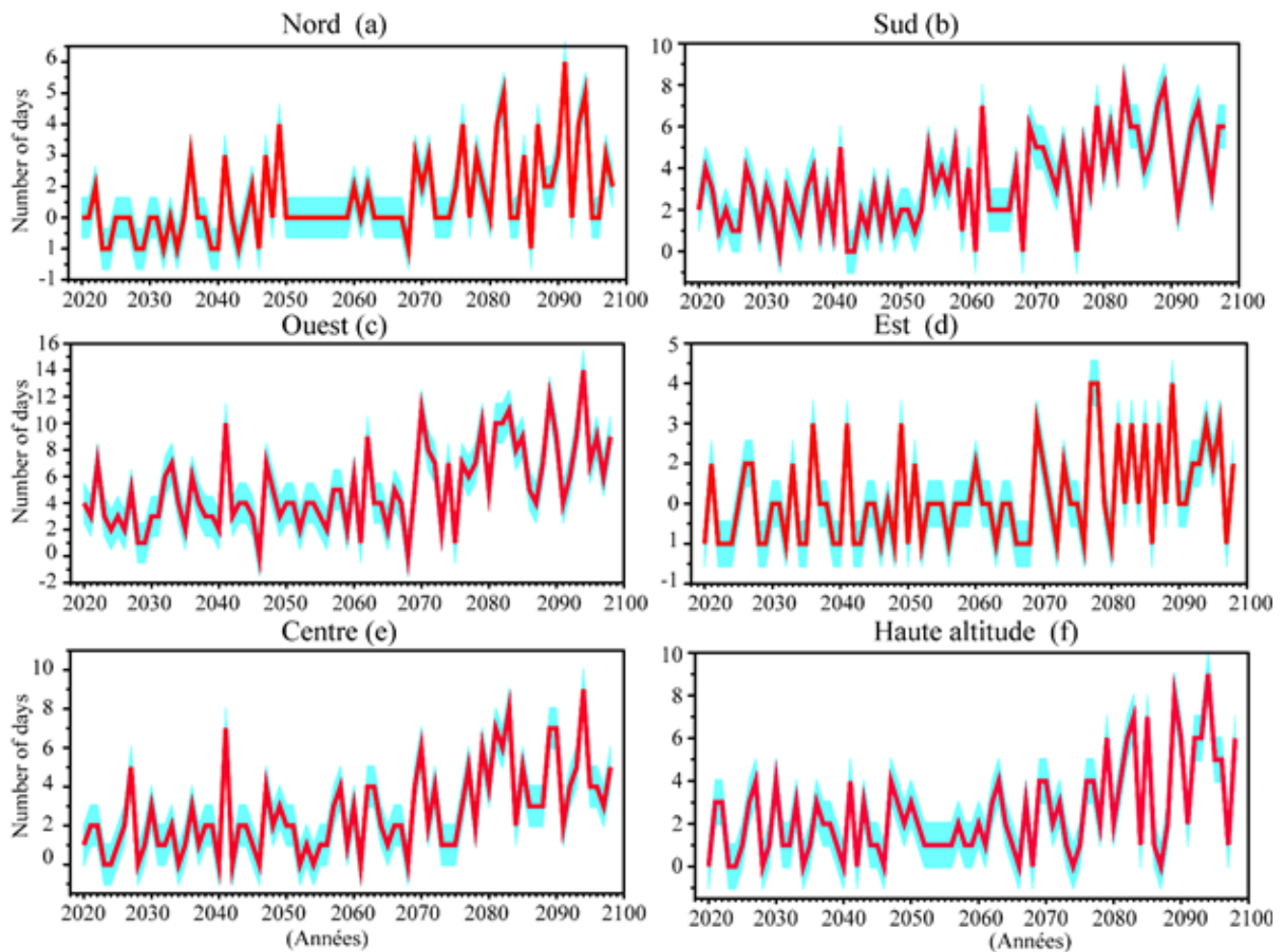


**Figure 6. Précipitations maximum par jour entre six régions éco climatiques du Burundi**

L'analyse saisonnière des extrêmes pluviométriques a révélé que 64% des pluies extrêmes sont enregistrés durant la saison culturale A (SOND) alors que la saison culturale B (MAM) n'a enregistré que 36 %. De 1990 à 2010, le nombre de jours de pluie a diminué de 30 % et légèrement augmenté depuis 2014 principalement dans les plateaux centraux et la zone de la crête Congo-Nile.

L'investigation des principales causes de la récurrence des extrêmes climatique a montré que la survenue des pluies extrêmes résulte d'une combinaison de différents facteurs. Ainsi, la survenue de jours d'extrêmes précipitations à l'Ouest du Burundi résulte des facteurs locaux (existence du Lac Tanganyika dans le Rift Valley occidental de l'Afrique orientale) renforcée par les masses d'air chargées d'humidité en provenance du Bassin du Congo. Les conditions de formation de la condensation se font dans une atmosphère perturbée exigeant une ascendance forcée de l'air. Dans la plupart de cas, la survenue des pluies extrêmes est liée aux facteurs climatiques dont le fameux EL-Nino, phénomène existant au niveau de l'Océan Pacifique et dont les effets affectent la pluviométrie de l'Afrique orientale et du Burundi en particulier. L'autre facteur justifiant les fortes précipitations au Burundi c'est l'Indice de l'Océan Indien (IOD) qui, durant sa phase positive génère des masses d'air chargées d'humidité et arrose l'Afrique de l'Est avec des pluies intenses. Il existe une nette corrélation entre les phénomènes El-Nino et IOD et la fréquence des pluies extrêmes au Burundi. On doit rappeler que les fortes précipitations de la petite saison de pluies (SOND) de 2023 étaient directement associée au phénomène El-Nino (Lenssen et al., 2024)(Latif et al., 1999)(Ogwang, Chen, et al., 2015)(Karanja et al., 2024). La même situation a été observe en 1997 et en 2016 ou le Burundi a enregistré de fortes précipitations. Alors que la phase positive de El-Nino et de IOD correspondent a de forte précipitation en Afrique de l'Est, la phase négative de chacun de deux correspond au déficit hydrique dans la sous-région.

S'agissant des projections futures, les résultats montrent que le nombre de jours de pluies varierait d'une région à l'autre. Une étude comparative de la récurrence des jours à très fortes précipitations et des extrêmes a montré que toutes les 6 zones éco-climatiques enregistreraient des fluctuations au cours de la période 2020-2100 (Figure 7). Les périodes de survenance de fortes précipitations seront suivies par de diminutions relatives puis de nombreux jours de fortes précipitations. La situation est plus inquiétante surtout pour la période allant de 2070 à 2090. La situation peut changer en fonction de la réussite ou échec d'atténuation des émissions des gaz a effet de serre qui sont à la base de l'augmentation du réchauffement planétaire.



**Figure 7. Comparaison de récurrence de jours de pluies supérieures ou égales à 25 mm projetée sur la période 2020-2100**

## 4. CONCLUSION

Les principaux résultats ont montré qu'il existe une corrélation entre la fréquence des fortes pluies et la survenance des inondations, intensification de l'érosion hydrique ainsi que des pertes en terre dans différentes régions du pays. L'analyse des jours consécutivement humides, des fortes et extrêmes pluies a montré que la fréquence des pluies extrêmes a significativement augmenté au cours de ces dernières décennies bien que le total annuel montre une relative diminution. Il a été démontré que trois journées consécutivement humides peuvent déclencher des inondations d'un côté et des mouvements de masse de l'autre côté. Les facteurs associés à la survenance des pluies extrêmes diffèrent principalement selon la topographie et l'origine des masses d'air humides.

Le Burundi a enregistré des extrêmes pluviométriques avec une tendance significativement croissante au Nord du pays et à l'Est du Burundi. Bien que les précipitations aient connu une diminution dans presque toutes les zones éco climatiques du Burundi, la région d'Ouest a enregistré plusieurs cas de fortes et extrêmes précipitations ces dernières décennies alors que c'est la région enregistrant le volume annuel très faible. La fréquence et l'intensité des pluies extrêmes dépend principalement des facteurs météorologiques mais également des facteurs climatiques notamment ELNSO, etc. 73 % des précipitations très fortes et extrêmes se sont produites au cours des années liées au phénomène ELNINO et à la phase positive du Dipôle de l'Océan Indien. Les projections montrent que le Burundi sera victime des épisodes d'extrêmes pluviométriques dans le proche avenir et surtout dans la période 2030 - 2050 et vers la fin de la deuxième moitié du 21ème siècle (2070-2090).

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement l'Institut Géographique du Burundi pour avoir mis à notre disposition les données sur les précipitations au Burundi. Nos sentiments de gratitude vont également à l'endroit du projet PAGRIS de l'IFDC pour avoir accepté la présentation de nos travaux de recherche durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Al Mamun, A., Islam, A. R. M. T., Alam, G. M. M., Sarker, M. N. I., Erdiaw-Kwasie, M. O., Bhandari, H., & Mallick, J. (2023). Livelihood vulnerability of char land communities to climate change and natural hazards in Bangladesh : an application of livelihood vulnerability index. In *Natural Hazards* (Vol. 115, Numéro 2). <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05599-y>
2. Brian Ayugi, Victor Dike, Hamida Ngoma, Hassen Babauosmail, V. O. (2021). Future changes in precipitation extremes over East Africa based on CMIP6 projections. January, 1 34. <https://doi.org/10.20944/preprints202101.0112.v1>
3. Field, V. Barros, T. Stocker, & Q. D. (Eds.). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. <https://doi.org/doi:10.1017/CBO9781139177245.008>
4. CITEPA. (2021). 6e rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) 1er volume : les sciences physiques du changement climatique ? Synthèse du Résumé à l'intention des décideurs du Giec. 1 32.
5. Driessen, P. P. J., Hegger, D. L. T., Kundzewicz, Z. W., van Rijswick, H. F. M. W., Crabbé, A., Larrue, C., Matczak, P., Pettersson, M., Priest, S., Suykens, C., Raadgever, G. T., & Wiering, M. (2018). Governance strategies for improving flood resilience in the face of climate change. *Water (Switzerland)*, 10(11), 1 16. <https://doi.org/10.3390/w10111595>
6. Hartmann, D. L., Tank, a. M. G. K., & Rusticucci, M. (2013). IPCC Fifth Assessment Report, *Climatic Change 2013 : The Physical Science Basis*. In IPCC.
7. IPCC. (1995). IPCC 1995 : Second Assessment : Climate Change. *Environmental Science & Technology*, 48(8), 4596 4603. <https://archive.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf%0Ahttps://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/2nd-assessment-en-1.pdf>
8. King'uzi, P., & Tilwebwa, S. (2019). Inter-annual variability of March to May rainfall over Tanzania and its association with atmospheric circulation anomalies. *Geographica Pannonica*, 23(3), 147 161. <https://doi.org/10.5937/gp23-22430>
9. Les, S. U. R., Climatiquesleurs, C., & Futures, V. (2019). 5 Ème Rapport Du Giec Sur Les Changements Climatiques Et Leurs Évolutions Futures Partie 2 : Impact, Adaptation Et Vulnérabilité Introduction. 1 12.
10. Limbu, P. T. S., & Guirong, T. (2019). Relationship between the October-December rainfall in Tanzania and the Walker circulation cell over the Indian Ocean. *Meteorologische Zeitschrift*, 28(6), 453 469. <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0939>
11. Ngarukiyimana, J. P., Fu, Y., Yang, Y., Ogwang, B. A., Ongoma, V., & Ntwali, D. (2017). Dominant atmospheric circulation patterns associated with abnormal rainfall events over Rwanda, East Africa. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.5169>
12. Nkuzimana, A., Bi, S., Abdallah, M., Alriah, A., Zhi, T., Awan, N., & Kur, D. (2020). Diagnosis of meteorological factors associated with recent extreme rainfall events over Burundi. *Atmospheric Research*, 244(December 2019), 105069. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105069>
13. Nkuzimana, A., Bi, S., Jiang, T., Wu, W., & Abro, M. I. (2019). Spatiotemporal variation of rainfall and occurrence of extreme events over Burundi during 1960 to 2010. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4335-y>
14. Nsabimana, J., Henry, S., Ndayisenga, A., Dewitte, O., Kervyn, F., & Michellier, C. (2023). *Assessment in a Sprawling City*.
15. Ongoma, V., Chen, H., & Omony, G. W. (2016). Variability of extreme weather events over the equatorial East Africa, a case study of rainfall in Kenya and Uganda. *Theoretical and Applied Climatology*, 1 14. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1973-9>

16. Polyakov, V., Baffaut, C., Ferro, V., & Van Pelt, S. (2023). Advances in soil erosion research : Mechanisms, modeling and applications - A special issue in honor of Dr. Mark Nearing. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 589-591. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.08.006>
17. Prabhakar, S. V. R. K. (2010). Climate change-proof disaster risk reduction : Prospects and challenges for developing countries. *Natural and Anthropogenic Disasters : Vulnerability, Preparedness and Mitigation*, 2, 449-468. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2498-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2498-5_20)
18. Zin Mie, Mie Sein, Xiefei Zhi, Irfan Ullah, Kamran Azam, Hamida Ngoma, Farhan Saleem, Yun Xing, Vedaste Iyakaremye, Sidra Syed, Saadia Hina, A. N. (2021). Recent variability of sub-seasonal monsoon precipitation and its potential drivers in Myanmar using in-situ observation during 1981–2020. *International Journal of Climatology*.

# Thème 3

## Caractérisation des glissements de terrain et des processus d'érosion associés en périphérie de la ville de Bujumbura

D. Kubwimana<sup>1\*</sup>, L. Ait Brahimi<sup>2</sup>, T. Bahaj<sup>2</sup>, A. Sindayihebura<sup>1</sup>, A. Abdelouafi<sup>2</sup> et O. Dewitte<sup>3</sup>

1. Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement (CRSNE), Faculté des Sciences, Université du Burundi, Avenue de l'UNESCO 2, 1550 Bujumbura, Burundi
2. Département des Sciences de la Terre, Musée Royal d'Afrique centrale, Leuvensesteenweg 13, 3080 Tervuren, Belgique.

\* **Auteur pour correspondance : [desire-kubwimana@ub.edu.bi](mailto:desire-kubwimana@ub.edu.bi)**

### Résumé

Un inventaire multi-temporel précis et détaillé des glissements de terrain et des processus d'érosion associés et leur caractérisation sont essentiels pour l'évaluation de l'aléa et la mise en œuvre des stratégies de réduction des catastrophes. De telles informations sont cependant rares dans de nombreuses régions montagneuses d'Afrique tropicale à forte densité de population comme les collines surplombant Bujumbura où la recherche sur les mouvements de terrain est à l'état embryonnaire et non adaptée aux besoins locaux. Une compilation multi-temporelle des mouvements de terrain a été réalisée en combinant une enquête minutieuse de terrain et une analyse visuelle d'images satellitaires, de données topographiques à très haute résolution spatiale et de photographies aériennes historiques. Nous avons identifié ~1300 mouvements de terrain dont nous avons analysé les caractéristiques morphométriques, spatiales et temporelles. Les processus identifiés sont très différents en termes de taille, profondeur, âge, mécanisme et niveau d'activité notamment. Certains processus, notamment les grands mouvements de masse, ont des causes purement naturelles (géomorphologie, incision rapide des rivières, géologie); d'autres, principalement les glissements superficiels/érosion sont influencés par des éléments anthropiques (agriculture sur pente, exploitation des carrières, construction de nouvelles routes, ravinement). Ces mouvements de terrain occupent plus

de 20% de l'ensemble des collines surplombant Bujumbura. Les résultats fournissent un jeu de données beaucoup plus précis des mouvements de terrain et de leurs impacts dans la région. Les résultats de cette recherche apportent des informations nécessaires à l'élaboration de stratégies de réduction des risques et des catastrophes.

**Mots Clés : Mouvements de terrain, inventaire multi-temporel, incision des rivières, photos aériennes historiques, Afrique**

## Abstract

Accurate and detailed multi-temporal inventories of landslides and their process characterization are crucial for landslide hazard assessment and the implementation of disaster risk reduction strategies. Such investigations are however rare in many regions of the tropical African highlands such hillslopes of Bujumbura where landslides research is often at its infancy and not adapted to the local needs. Here, we produce a comprehensive multi-temporal investigation of the landslide processes in the hillslopes of Bujumbura. We inventory ~1,300 landslides by combining careful field investigation and visual analysis of satellite images, very-high resolution topographic data and historical aerial photographs. The causes are natural (geomorphology, rapid river incision, geology) and anthropic (agriculture on slopes, exploitation, quarrying and gullyng). More than 20% of the hillslopes of Bujumbura are affected by landslides. Our results provide a much more accurate record of the landslide processes and their impacts in the region. The results of this research provide necessary information for the development of risk and disaster reduction strategies.

**Key Words: Landslides, Multi-temporal inventory, river incision, historical aerial photographs, controlling factors, Africa**

# 1. INTRODUCTION

Les glissements de terrain et des processus d'érosion (GTE) existent un peu partout dans le monde. Leur évolution joue un rôle important dans la dynamique des paysages terrestres. En interférant avec les activités humaines, les GTEs restent un danger, parfois important, et souvent permanent dans plusieurs régions du monde (Highland and Bobrowsky, 2008; Stanley & Kirschbaum, 2017). Les GTEs engendrent des conséquences socio-économiques néfastes qui restent largement sous-estimées dans la mesure où les dégâts occasionnés sont souvent associés à leurs facteurs de déclenchement tels que les averses, les tempêtes et séismes (Schuster, 1996). Les GTEs sont en effet des phénomènes complexes de la géomorphologie et peuvent être actifs, inactifs ou dormants (McCalpin, 1984).

Les GTEs affectent des surfaces réduites à des versants entiers de plusieurs dizaines de km<sup>2</sup> (p.ex., Kirschbaum et al., 2010; 2015a,b; Crosta et al., 2013). Les plus grands GTEs connus dans le monde sont des grandes déformations de montagnes (p.ex., Crosta et al., 2013). La vitesse de déplacement des GTEs varie de quelques millimètres par an à des dizaines de mètres par seconde (Hungry et al., 2014). La profondeur au niveau de la surface de rupture des GTEs peut varier de quelques centimètres à des centaines de mètres (Terzaghi, 1960; Sidle & Bogaard, 2016).

La profondeur relative des GTEs est évaluée par l'analyse de la zone d'arrachement au niveau de l'escarpement principal sur terrain ou à base des images satellitaires à très haute résolution spatiale comme celles disponibles dans Google Earth (par ex., Depicker et al., 2020). Pour les glissements peu profonds, la profondeur de la rupture ne doit pas dépasser quelques mètres (Sidle & Bogaard, 2016; Depicker et al., 2021a). La différenciation des processus est très importante pour évaluer les interactions liées à l'anthropisation. Par exemple, l'enlèvement et/ou la réduction de la couverture végétale rend les pentes plus sensibles aux ruptures de pente car le dépérissement des racines des arbres réduit la résistance du sol (Sidle & Bogaard, 2016); ce qui augmente l'occurrence des processus superficiels telles que les érosions (p.ex., Sidle & Bogaard, 2016; Depicker et al., 2021b, Maki Mateso et al., soumis). D'autre part, les modifications de la morphologie des pentes peuvent également être préjudiciables aux GTEs: la construction de nouvelles routes entraîne le sapement des pentes et la concentration des eaux de ruissellement (Sidle et al., 2014; McAdoo et al., 2018; Dewitte et al., 2021; Tanyaş et al., 2022, Depicker et al., 2024), et l'activité minière ou de carrières perturbent la texture des pentes et la surface. Les activités agricoles telles que l'irrigation peuvent augmenter la pression de l'eau interstitielle et accroître également l'occurrence des glissements de terrain (Lacroix et al., 2020). En Afrique, particulièrement dans la zone intertropicale, les GTEs sont nombreux et leur déclenchement est le plus souvent associé à l'existence des fortes précipitations (p.ex., Monsieurs et al., 2018). Leur étude tant à échelle régionale que locale est souvent au stade embryonnaire et le continent reste fortement sous-représenté dans la recherche sur les GTEs (Gariano & Guzzetti, 2016; Kirschbaum et al., 2015, 2010; Maes et al., 2017; Nadim et al., 2006; Reichenbach et al., 2018).

Les recherches approfondies d'inventaire ou de l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa restent faibles et se concentrent à l'échelle du rift au nord du lac Tanganyika jusqu'au lac Kivu, le rift NTK (Monsieurs et al., 2018, Depicker et al., 2020, 2021, Dewitte et al., 2021) et démontrent que la région est hautement prédisposée aux GTEs. En effet, le rift est africain est naturellement exposé à des taux élevés de mobilisation des sédiments (Depicker et al., 2024). Outre les pluies importantes qui déclenchent les GTEs, les conditions d'humidité importante et de température élevées sont aussi favorable à l'altération des roches et à la formation du sol dont les épaisseurs peuvent être aisément supérieures à plusieurs mètres (Dille et al., 2019). En outre, la zone est caractérisée par une activité sismotectonique élevée notamment en relation avec la formation du rift et le soulèvement de la région, dont une des expressions est l'activité volcanique au niveau des montagnes des Virunga (Delvaux, 2001; Ebinger & Furman, 2003; Smets et al., 2016). Outre le déclenchement des GTEs, cette activité sismotectonique à plusieurs rôles sur leur occurrence. Primo, la sismicité peut influencer le contrôle des GTEs car elle joue un rôle sur l'altération et la formation du sol (Depicker et al., 2021). Secundo, la formation du rift et la présence de failles sont responsables d'une topographie surdéveloppée avec la présence d'escarpements. A partir de ces escarpements se forment des incisions importantes au niveau des rivières qui sont liées à la propagation de knickpoints. Cela entraîne un rajeunissement de la topographie avec des pentes qui sont généralement plus fortes; c'est-à-dire des facteurs favorisant l'instabilité des pentes (Larsen & Montgomery, 2012). Cette région du Rift est aussi fortement peuplée et la croissance de la population y est importante (Michellier et al., 2016). Dans de tels environnements, les facteurs naturels et humains qui conduisent à la dégradation du sol sont étroitement liés et il est parfois difficile de démêler leurs contributions.

Au Burundi, plus particulièrement dans les reliefs du rift occidental africain, des dommages liés aux glissements de terrain et à des processus d'érosion associés sont élevés et sont en relation notamment avec la saisonnalité

des précipitations (Monsieurs et al., 2018; Dewitte et al., 2021). Sur les versants, les catastrophes liées aux impacts directs sont parfois minimales et très localisées en proximité des zones de départ des glissements. C'est à mettre en opposition par rapport aux dégâts importants qui peuvent être observés en aval des zones de départ de coulées de boues et de débris dont la mobilité est forte et la distance de parcours parfois importante, atteignent dans certains cas plusieurs kilomètres. Des glissements de terrain peuvent aussi être associés à la présence de crues rapides. Les GTEs dans la région sont aussi associés à de grandes érosions/ravinements, la dynamique des rivières et la géodynamique régionale (Moeyersons & Trefois, 2012; Dewitte et al., 2021). L'érosion étant un déplacement de sol ou de roches sous l'action combinée de la gravité et des éléments naturels tels que le vent, la pluie, le ruissellement de l'eau ou les vagues. Ce phénomène entraîne le transfert progressif des débris depuis l'amont des versants vers l'aval. L'érosion plus importante du sol par les eaux de ruissellement étant désignée par ravinement.

La ville de Bujumbura, capitale économique Burundi, est sujette à une forte demande foncière en raison de la croissance démographique élevée, obligeant son extension vers les collines en périphérie. Dans cette zone, les GTEs entraînent des destructions considérables aussi bien sur le plan matériel qu'humain (ensevelissements et destructions de maisons, de ponts, de routes, dérangement de la production agricole, destruction de réseaux électriques, barrages hydro-électriques, etc. (Moeyersons & Trefois, 2012). Ces GTEs se présentent sous forme de processus variés (glissements profonds, coulées de boues ou de débris, petits glissements superficiels, effondrements, etc. (Kubwimana 2018, 2021a,b, Moeyersons & Trefois, 2012; Nibigira et al., 2015).

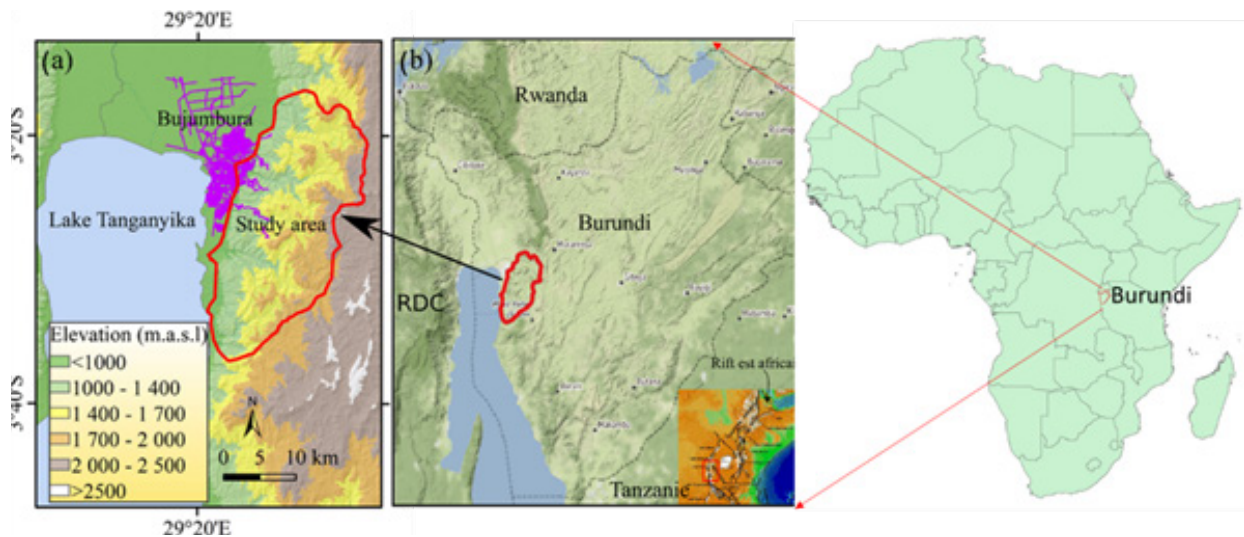
L'objectif de cette recherche est de réaliser une caractérisation spatiale multi-temporelle détaillée des GTEs au niveau régional en relation avec l'occupation du sol, le ravinement et la dynamique des rivières dans un contexte d'anthropisation d'un environnement tropical à forte croissance urbaine.

En plus de la connaissance fondamentale des processus que cette recherche va apporter, l'objectif est aussi d'apporter des résultats qui permettront la mise en place de stratégies plus efficaces de gestion du territoire dans le cadre du développement durable dans cette partie du Burundi.

## 2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

La périphérie de Bujumbura sélectionnée pour cette étude est localisée dans la partie occidentale du rift est africain, à l'ouest de la République du Burundi sur une superficie totale de 490 km<sup>2</sup> (Figure 1). Le rift occidental est africain à la direction structurale NW-SE (Delvaux et al., 2012) appelée tanganyikienne et croise la direction albertienne à une trentaine de kilomètres au NW de Bukavu (Ilunga, 1991). Selon les mêmes auteurs, la branche occidentale peut être considérée comme un bon modèle de rift continental jeune, tandis que la branche orientale est représentative d'un système de rift continental mature "raté". Les deux sont caractérisés par de grands systèmes graben remplis de sédiments fluvio-deltaïques et lacustres, et/ou de roches volcaniques et volcanoclastiques (Morley et al., 1999).

La population est élevée (moyenne > 500 habitants au kilomètre carré) et plus concentrée à l'ouest de la zone d'étude. L'altitude varie entre 800 m et plus de 2400 m au-dessus du niveau de la mer sur une distance moyenne de ~ 20 km, ce qui explique la topographie abrupte avec des pentes pouvant atteindre 70°.



**Figure 1. Localisation de la zone d'étude : a – Zoom sur les reliefs avec la zone urbanisée de la ville de Bujumbura, b – Position de la zone d'étude par rapport à la branche occidentale du rift est africain. L'ombrage des collines est dérivé du modèle numérique de terrain SRTM à 1 arc seconde de résolution spatiale (Farr et al., 2007). Le réseau routier (en violet) vient de 'OpenStreetMap aerial'. La carte de base en (b) provient de © Stamen Terrain-USA/OSM.**

### 3. METHODOLOGIE

Notre méthodologie est basée sur une approche multidisciplinaire (télédétection, SIG, géologie, géomorphologie, hydrologie, climatologie, etc) sur les facteurs justifiant la présence des GTEs. La première étape consiste à la revue de la littérature, la collecte et la synthèse des données existantes. Nous possédons des mémoires de licence qui ont été consacrés sur cette problématique dans la région. Pour élaborer des cartes d'inventaires dynamiques des GTEs, nous avons utilisé des observations directes, des publications antérieures et l'analyse des documents telles que les cartes historiques complétées et enrichies d'informations récentes (Open-StreetMap et imagerie ©Google Earth). En outre, une approche clé de levé et enquête de terrain a été utilisée. Cette approche est primordiale pour les raisons suivantes :

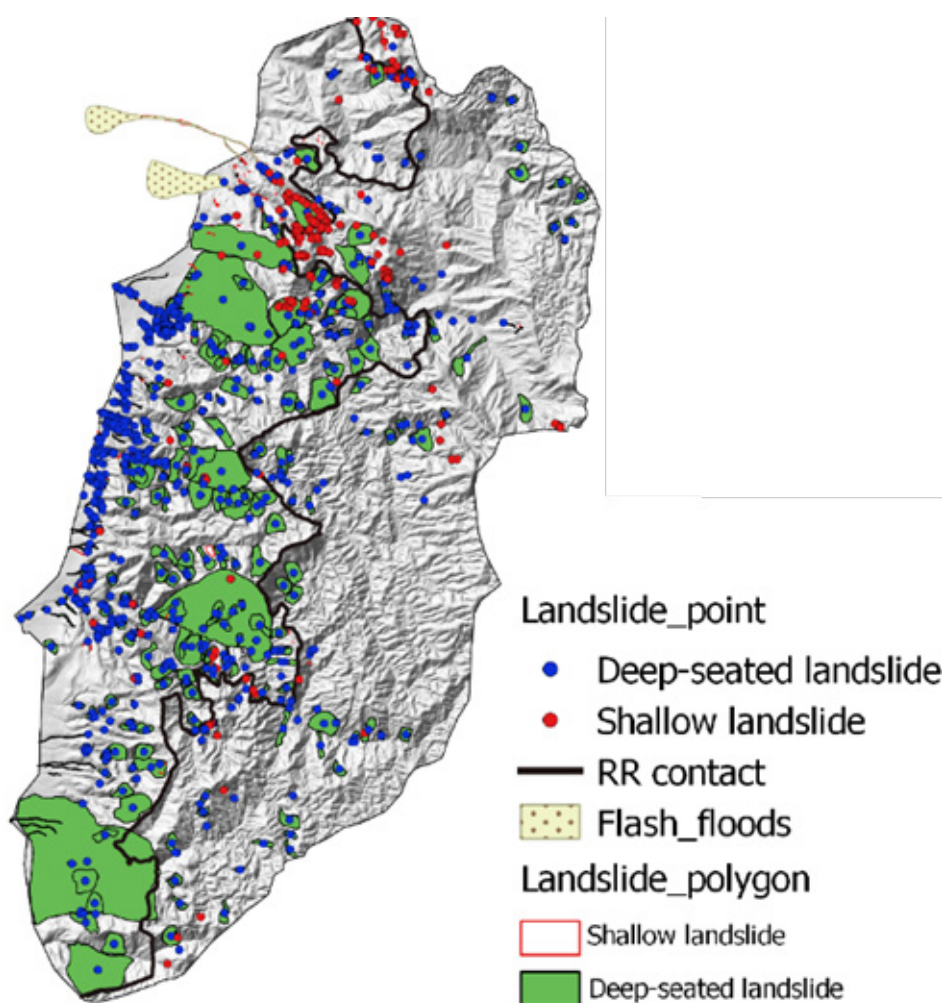
1. Elle est le moyen de valider toutes les informations qui sont récoltées à l'aide des images satellitaires, des photographies aériennes anciennes et des archives (Guzzetti et al., 2012). Pour les événements récents responsables de dégâts importants, il peut y avoir des articles de presse par exemple (Monsieurs et al., 2018), mais la description des événements y est souvent confuse et peu précise. Sans validation, il est difficile voire impossible d'apporter des réponses clés liées aux conséquences de l'anthropisation.
2. Elle permet d'augmenter la précision et le détail des recherches : beaucoup de processus ne sont pas identifiables via la télédétection en raison de leur taille et/ou de la couverture végétale étant donné qu'on est en milieu tropical à forte couverture nuageuse.
3. Elle permet de récolter des informations sur les caractéristiques temporelles des processus : quand a eu lieu un glissement ? Après quel type de pluie ? Combien de temps après un changement d'affectation du sol ? Ces questions restent en grande majorité sans réponse en l'absence d'une enquête de terrain.
4. Elle permet de récolter des informations précises sur l'affectation du sol, la nature des sols et la lithologie : éléments très difficiles à cerner via des images satellitaires notamment, surtout dans des paysages aussi morcelés que ceux de la zone d'étude. De plus, les photos aériennes de l'époque coloniale disponible sont trop anciennes dans la plupart des cas.

Dans ce contexte d'absence de données sur les occurrences spatiales et temporelles des GTEs où la carte géomorphologique et/ou morpho-dynamique n'existe pas, il est utile de réaliser des études bien approfondies du phénomène.

## 4. RESULTATS

### 4.1 Types et caractéristiques des mouvements de terrain

Nous avons inventorié 1 286 GTEs regroupés en GTEs profonds et superficiels (Figure 2). Ces deux grands groupes ont été cartographiés et classés en six catégories présentant des caractéristiques similaires en fonction des mécanismes de rupture de pente et des matériaux de déclenchés (Tableau 1). La différenciation entre les glissements, coulées et avalanches n'a pas toujours été possible pour les Les GTEs plus anciens dont les morphologies fraîches n'ont pas pu être observées avec précision. La différenciation entre coulées de boue et coulées de débris était également parfois complexe, et nous les avons donc ici toutes considérées comme des coulées de débris.

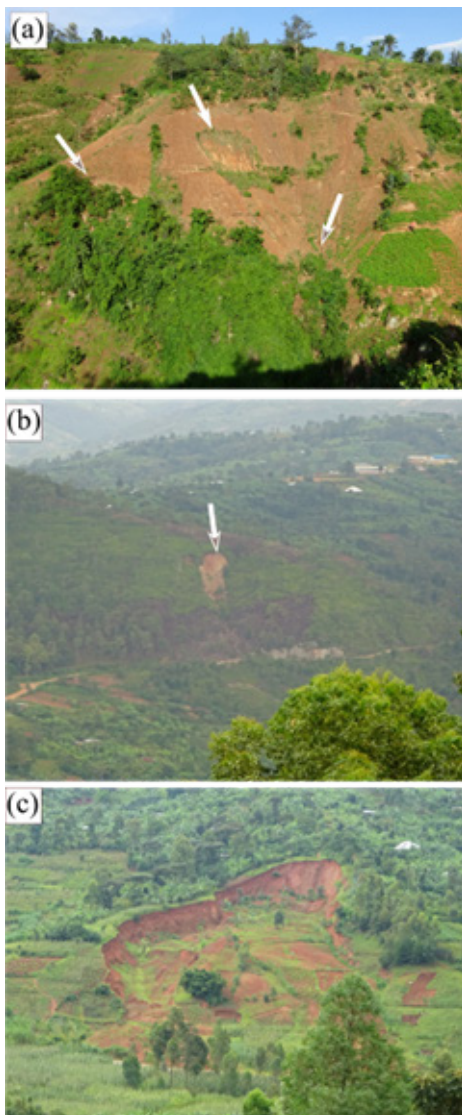


**Figure 2.** GTEs cartographiés classés en fonction de la profondeur de leur surface de rupture. L'ombrage (hillshade) provient du MNE de 10 m de résolution (Tableau V-1). Les GTEs < 14 000 m<sup>2</sup> sont représentés par un point afin qu'ils soient visibles à l'échelle des cartes (Kubwimana et al., 2021b).

Un grand nombre des GTEs peu profonds inventoriés sont des déclenchements dans les débris (debris slides) et des avalanches relativement petits (Figure 3). La signature des GTEs peu profonds a tendance à disparaître rapidement du paysage, parfois déjà après quelques mois (Figure 3a,b). Par conséquent, tous les GTEs peu profonds cartographiés ont été détectés sur des images satellites récentes à haute résolution et/ou sur le terrain, leur identification sur les photographies aériennes historiques étant difficile en raison de leur qualité faible. Les plus petits GTEs observés sur le terrain n'étaient pas non plus visibles sur les images satellites, en particulier lorsqu'ils se produisaient le long des talus de routes ou de berges de rivières.

Nous avons collecté des GTEs superficiels en groupe qui se produisaient après de fortes précipitations. On y a observé des processus en cascade où les glissements de débris et les avalanches sont reliés aux coulées de débris. Un exemple clair d'un tel amas d'événements en cascade qui y sont liés s'est produit le 9 février 2014 et a touché la route nationale RN1 et les quartiers Nord de Bujumbura dont Gatunguru, l'épicentre des dégâts. Un inventaire précis sur le terrain, réalisé quelques semaines après la catastrophe et complété par une analyse d'images satellite, a permis de cartographier 307 GTEs récents et peu profonds. La plupart des ruptures étaient des glissements de débris et des avalanches, beaucoup étant liés à des coulées de débris et au réseau fluvial. Les matériaux apportés par ces GTEs ont contribué aux crues rapides riches en débris longues de plusieurs kilomètres qui ont été associées à cet événement pluvieux intense. Il faut noter que quelques GTEs profonds se sont également produits à ce moment. Un glissement de terrain, en partie associé aux activités d'extraction minière et à la mobilisation des résidus, a été suffisamment important pour créer un barrage temporaire sur la rivière Gasenyi qui s'est rompu et a exacerbé les crues éclairées, entraînant des impacts dramatiques dans la ville de Bujumbura.

A noter que nous avons identifié aussi des grands glissements de terrains qui se produisent dans des champs de cultures dont leur occurrence ne montre aucun facteur de déclenchement (par exemple la Figure 3c).



**Figure 3. Quelques GTEs inventoriés dans la zone d'étude. (a) Amas de glissements de débris peu profonds et d'avalanches déclenchés par les pluies dans les champs agricoles (foulaards localisés avec des flèches blanches). Photo prise en janvier 2019 (-3,382°; 29,369°) dans la localité de Kimina – Mutambu; (b) Glissement plan peu profond au-dessus d'une route. Photo prise en janvier 2019 (-3,355°; 29,492°). Le glissement est localisé sur la colline Rushubi à approximativement 1km au sud du centre de la province Bujumbura rural; (c) Glissement rotationnel récent dans le régolithe recouvrant le gneiss dans le paysage relique. Photo prise en janvier 2019 (-3,381°; 29,494°) à Sagara, commune Isale à environ 2km sud du centre de la province Bujumbura rural.**

**Tableau 1. Principales caractéristiques des mouvements de terrain et des ravines inventoriés.**

**CRI** : GTE en contact à la rivière, **CRo** : GTE en contact à la route, **R** : réactivation, **MR**: GTE lié à la berge de la rivière/à la route, **Tot** : total, **RAJ** : paysage rajeuni, **REL** : paysage relique, **TA** : GTE très ancien, **A** : Ancien, **Re** : GTE récent, **MP** : GTE profond, **MS** : GTE peu profond, **MA** : GTE actif, **MN** : GTE non actif, **O** : oui, **N** : non, **NA** : Non applicable.

Types	Nombre			Superficie (km <sup>2</sup> )			Age			Profondeur		Activité		CRI		CRo		R	MR
	Tot	RAJ	REL	Tot	Rej	Rel	TA	A	Re	MP	MS	MA	M N	O	N	O	N		
Coulées des débris	10	7	3	0,5	0,51	0,01	0	0	10	7	3	10	0	10	0	4	6	0	0
Debris slide, debris avalanche, flowslides	919	773	146	7,1	5,5	1,6	0	181	738	558	361	866	53	706	213	89	830	76	385
Earthflow and slide – earthflows	64	45	19	12	8,9	2,7	0	58	6	64	0	26	38	60	4	14	50	6	0
Rock slides and rock avalanches	189	142	47	38	31,5	6,7	5	138	46	189	0	124	65	183	6	29	160	0	5
Déformations des montagnes	11	10	1	48	31,5	16,4	11	0	0	11	0	0	11	11	0	5	6	0	0
Ravines et MTs associés	93	83	10	1,9	1,79	0,07	0	38	55	54	39	79	14	62	31	15	78	0	0
<b>Total</b>	<b>1286</b>	<b>1060</b>	<b>226</b>	<b>107</b>	<b>79,6</b>	<b>27,4</b>	<b>16</b>	<b>415</b>	<b>855</b>	<b>883</b>	<b>403</b>	<b>1105</b>	<b>181</b>	<b>1032</b>	<b>254</b>	<b>156</b>	<b>1130</b>	<b>82</b>	<b>494</b>

Nous avons observé 82 réactivations d'anciens GTEs qui ont été classées comme des processus récents et actifs. Ces réactivations concernent 76 glissements et six earthflows. Bien que seulement 0,03% des GTEs actifs soient des coulées de terre lente, elles constituent plus de 34% des zones de glissement de terrain active. Comme toutes les coulées de terre lente sont déjà présentes dans les années 1950 et que 44% d'entre elles sont actives, cela montre qu'elles peuvent facilement rester actives sur une période de plusieurs décennies. L'observation de terrain confrontée aux interviews permet de déduire une déformation du sol de ~1 m/an. D'autres grands glissements de types slide-earthflows montrent des schémas de déformation qui attestent de mouvements plus actifs. Dans ce cas, nous pouvons certainement supposer que certaines parties du glissement de terrain ont des déplacements de plusieurs mètres par an. La grande majorité des coulées de terre lente sont connectées à des rivières, elles contribuent donc activement à fournir des sédiments aux systèmes fluviaux. Les tronçons de rivière situés en aval des coulées de terre lente sont en effet généralement riches en débris ; ce qui explique l'abondance des sédiments chariés par les grandes rivières qui traversent la ville de Bujumbura.

## 4.1 Causes et déclencheurs des glissements de terrain et des érosions associés

Nos données montrent que la pente est le principal facteur de contrôle des GTEs (Tableau 2). Ce contrôle est particulièrement important pour les GTEs peu profonds. Ils ont tendance à se concentrer sur des pentes > 25° et cet effet est légèrement plus marqué dans le paysage ancien. Dans l'ensemble, les GTEs profonds se produisent sur des pentes moins abruptes, cependant, ce contrôle est plus important pour les GTEs actifs, généralement plus petits. Les sédiments du rift et le gneiss sont tous deux favorables aux GTEs. Ces deux lithologies sont les roches dominantes dans le paysage rajeuni (la lithologie des sédiments du Rift ne se trouve que dans cette région). Globalement, le contrôle de l'angle de pente est plus important dans ces deux lithologies. L'exposition des versants n'est pas significative pour les GTEs profonds et, à cette échelle spatiale de cette étude, un lien entre la présence des failles et les types et caractéristiques des glissements de terrain ne peut être mis en évidence. Pour les processus actifs, une petite association est observée pour les pentes orientées sud à sud-ouest.

La zone d'étude s'étend sur 490 km<sup>2</sup>, dont 237 km<sup>2</sup> et 253 km<sup>2</sup> se trouvent respectivement dans les paysages rajeunis et anciens. Près du cinquième de la zone d'étude (98,3 km<sup>2</sup>) est affecté par des glissements de terrain. En outre, de nombreux GTEs se sont développés dans des ruptures de pente préexistantes. Lorsque les GTEs sont considérés séparément (c'est-à-dire sans superposition), leur superficie totale cumulée est de 107 km<sup>2</sup>, ce qui signifie que 8,7 km<sup>2</sup> de ruptures de pente sont situés dans des GTEs antérieurs.

Il existe une différence importante dans le pourcentage du paysage affecté par les GTEs dans les paysages rajeunis (79,6 km<sup>2</sup>, 34% de la superficie totale) et relictuels (27,4 km<sup>2</sup>, 11%). Si l'on ne tient pas compte des déformations des pentes des montagnes, les zones de glissement de terrain représentent 48 km<sup>2</sup> et 11 km<sup>2</sup> (23 % et 5 %) pour les paysages rajeunis et reliques, respectivement.

Depuis les années 1950, la zone bâtie et le réseau routier se sont largement étendus, notamment à la périphérie de la ville. Les GTEs qui sont directement liés au réseau routier sont généralement de petits glissements/avalanches/coulées de débris et des chutes de pierres, généralement observés après de fortes pluies. Ils sont observés le long des coupures de routes ainsi qu'au niveau des caniveaux routiers et autres zones de concentration des eaux de ruissellement associées

aux surfaces imperméables. Des GTEs sont également observés le long des berges des cours d'eau (fréquemment de type slide) et sur les sites d'exploitation de carrières et de mines. Au cours des dernières décennies, l'extraction de matériaux du lit des rivières a augmenté (parallèlement à la croissance de la ville). En conséquence, les schémas sédimentaires des rivières sont fortement perturbés et donc le débit des rivières. Une vague d'incision accrue des rivières est observée en de nombreux endroits. Cela conduit à une érosion locale et à un sapement des berges, ce qui peut provoquer des glissements de terrain, en particulier dans les alluvions.

**Tableau 2. Association entre l'occurrence des mouvements de terrain (GTEs) et les facteurs de contrôle.**

**MP** : GTE profond, **MS** : GTE peu profond, **MA**: GTE actif, **MN**: GTE non actif, **MPA**: GTE profond actif profond, **MSA**: GTE peu profond actif, **RR**: différenciation du relief en paysages rajeunis et reliques (Kubwimana et al., 2021b).

Facteur de contrôle	Type	Zone concernée	Nb des GTEs	Degré de liberté	Chi-2	Valeur critique (p=0.05)
RR	GTE	Zone d'étude	792	1	213,2	3,8
RR	MP	Zone d'étude	598	1	262,8	3,8
RR <sup>a</sup>	MS	Zone d'étude	194	1	1	3,8
Lithologie	MP	Zone d'étude	598	5	119,3	11,1
Lithologie	MP	Paysage rajeuni	487	5	27,7	11,1
Lithologie <sup>a</sup>	MP	Paysage relique	111	5	8,2	11,1
Lithologie	MA	Zone d'étude	409	5	164,4	11,1
Pente	NL	Zone d'étude	189	5	10,6	11,1
Pente	MP	Zone d'étude	490	8	72,2	15,5
Pente	SL	Zone d'étude	194	8	374,4	15,5
Pente	GTE	Paysage rajeuni	588	8	146,	15,5
Pente	MP	Paysage rajeuni	487	8	76,6	15,5
Pente	MS	Paysage rajeuni	111	8	83,9	15,5
Pente	MP	Paysage relique	111	8	33,7	15,5
Pente	GTE	Paysage relique	204	8	166,5	15,5
Pente	MS	Paysage relique	93	8	176,4	15,5
Pente	MP	Gneiss	332	8	54,5	15,5
Pente	MP	Granite	156	8	26,7	15,5
Pente	MP	Quartzite	64	8	34,8	15,5
Pente	MP	Rift sediments	32	7	58,9	14,1
Pente	GTE	Zone d'étude	792	8	231,1	15,5
Pente	MA	Zone d'étude	599	8	251	15,5
Pente	MN	Zone d'étude	193	8	45,1	15,5
Pente	MPA	Zone d'étude	409	8	208,9	15,5
Pente	MSA	Zone d'étude	190	8	547,4	15,5
Exposition	MA	Zone d'étude	599	7	16,4	14,1
Exposition <sup>a</sup>	MN	Zone d'étude	193	7	3,3	14,1

**a Facteur de contrôle des GTEs non significatif (niveau de confiance = 95%)**

## 5. DISCUSSION

### 5.1. Inventaire des GTEs et fiabilité des données

Avec un inventaire de plus de 1200 glissements de terrain, nous avons identifié quatre fois plus de ruptures de pente que l'étude à l'échelle régionale de Depicker et al. 2020. Si l'on compare avec les études locales précédentes qui ont identifié quelques dizaines de GTEs (Nibigira et al., 2015 ; Shirambere et al. 2018), le contraste est encore plus grand. Une telle amélioration de l'inventaire montre clairement qu'avec des moyens limités (travail de terrain, entretiens, © images Google Earth), il est possible de collecter des connaissances à l'échelle locale très explicites sur le plan spatial. L'utilisation de photographies aériennes historiques était importante pour déterminer davantage la chronologie des GTEs. L'accès à ces photographies, pour autant qu'elles existent, est plus difficile car les institutions auprès desquelles elles peuvent être obtenues ne sont pas toujours faciles à identifier.

Bien que notre inventaire fournisse un ensemble de données unique, il souffre encore d'incomplétude. La part réelle des GTEs peu profonds est sous-estimée car ils ont tendance à disparaître assez rapidement après leur déclenchement, un processus qui est également observé dans d'autres régions tropicales (Broeckx et al., 2018 ; Jacobs et al., 2017). En outre, de nombreux GTEs sont trop petits pour être identifiés dans © Google Earth. L'imagerie © Google Earth couvre 20 ans dans les reliefs de Bujumbura, avec parfois jusqu'à 20 images sur cette période (Depicker et al., 2021). Cependant, la plupart de ces images couvrent les 5 dernières années, ce qui introduit un biais temporel supplémentaire dans l'inventaire. Bien qu'une telle fenêtre temporelle de 20 ans reste relativement étroite par rapport à ce qui peut être réalisé dans des régions où plusieurs couvertures de photographies aériennes de bonne qualité sont disponibles et où le travail de terrain a été systématiquement mené pendant plusieurs décennies (p.ex., Samia et al., 2017)), notre ensemble de données de 403 GTEs peu profonds est suffisamment robuste pour analyser les modèles spatiaux des ruptures de pente (Depicker et al., 2020). Pour les GTEs profonds, nous manquons certainement certains des éléments les plus anciens/petits dont la morphologie se modifie avec le temps, en particulier en ce qui concerne l'altération profonde qui est présente dans cet environnement tropical (Dille et al., 2019). Les GTEs de type avalanche, dont la signature topographique est généralement moins prononcée que celle des types slides, sont certainement sous-représentés aussi. Malgré ces problèmes d'exhaustivité de l'inventaire, si l'on considère les données auxiliaires utilisées dans cette recherche ainsi que les investigations de terrain qui ont été menées, on peut affirmer que cet inventaire multi-temporel est suffisamment exhaustif et précis pour comprendre comment les GTEs profonds se produisent en périphérie de Bujumbura.

Les visites de terrain ont permis d'identifier des GTEs actifs dont les déformations du sol étaient trop limitées pour être cartographiés visuellement à partir d'images © Google Earth. Cependant, une telle évaluation n'a pas pu être effectuée de manière exhaustive partout dans la zone d'étude et plusieurs GTEs actifs ont probablement été manqués. En théorie, une meilleure compréhension des déformations lentes du sol et de l'état d'activité des GTEs pourrait être évaluée par télédétection radar (Dini et al., 2019), une technique qui a été appliquée avec succès dans la ville voisine de Bukavu (Jacobs et al., 2018).

Cependant, le nombre relativement faible de zones naturelles cohérentes telles que les affleurements rocheux par rapport aux environnements moins altérés et l'orientation dominante Nord-Sud de nombreuses collines sont des facteurs limitant pour une telle approche. De plus, bien que reliefs soient peuplés, l'environnement bâti n'est pas aussi dense qu'à Bukavu (Nobile et al., 2018). Ces raisons expliquent pourquoi une analyse quantitative de l'activité des GTEs basée sur le radar est restée jusqu'à présent difficile dans les reliefs de Bujumbura (Dille et al., 2019).

## 5.2. Processus de glissement de terrain: causes et déclencheurs

Le paysage des pentes des collines de Bujumbura est fortement dominé par les processus de destruction massive. Même si l'on ne tient pas compte des mountain et rock slope deformation, 12 % du paysage est affecté par des glissements de terrain. Cette densité est comparable à celle d'autres régions fortement exposées aux GTEs dans des contextes climatiques différents (p.ex, Samia et al., 2017; Handwerger et al., 2019). Le rajeunissement du paysage est clairement un facteur important dans l'apparition des GTEs profonds, leur densité étant particulièrement élevée dans cette partie du paysage. L'importance de la migration des knicpoints sur la distribution des GTEs est fréquemment mise en évidence dans les pentes de seuil (Larsen & Montgomery, 2012). Notre étude met clairement en évidence que, même au niveau local, la caractérisation des processus de glissement de terrain doit tenir compte du contexte géomorphologique associé à l'évolution à long terme du paysage. Contrairement à ce qui est démontré par Depicker et al. (2021) à l'échelle du Rift NTK, le rajeunissement du paysage ne semble pas avoir d'impact sur la distribution en taille des glissements peu profonds dans les collines de Bujumbura. Cette différence doit probablement être recherchée dans l'étendue plutôt limitée de notre zone d'étude qui ne présente pas un grand gradient d'activité sismique, alors que la fracturation sismique des versants a été identifiée par Depicker et al. 2021 comme un mécanisme important pour expliquer les différences dans les distributions de taille entre les paysages rajeunis et anciens.

La distribution non-homogène des types de roches et de leur altération dans la zone d'étude explique certaines des différences dans les modèles de glissement de terrain. Par exemple, le gneiss offre ici des conditions plus favorables aux GTEs que le granite, ce qui pourrait être lié aux différences de résistance des masses rocheuses. Le rôle du gneiss a également été mis en évidence dans un environnement similaire, juste au nord du rift NTK, dans les montagnes Rwenzori (Jacobs et al., 2017). Le contexte sismo-tectonique et la variété des âges et des expositions des lithologies sont des facteurs qui sont pris en compte dans les différences de résistance des masses rocheuses (Clarke & Burbank, 2011). En outre, l'altération climatique et le développement associé d'un régolithe épais ne peuvent pas être ignorés. La formation du régolithe peut dépendre fortement de conditions géologiques et topographiques très locales (Dille et al., 2019). Les eartflows sont des processus lents qui dépendent de la disponibilité de matériaux mobiles tels que le régolithe. Leur distribution et leur dynamique en sont certainement influencées.

La différence significative de taille des GTEs observée entre les GTEs actifs (généralement récents) et les GTEs profonds non actifs pourrait être due au fait que la période d'observation est trop courte pour saisir l'impact d'événements déclencheurs de grande magnitude tels que les grands tremblements de terre (Dewitte et al., 2021; Marc et al., 2019). En outre, nous savons que les conditions climatiques ont changé au cours des dernières dizaines de milliers d'années (Felton et al., 2007; Wassmer et al., 2013), le climat étant également un facteur clé agissant comme cause et déclencheur des GTEs profonds (Dille et al., 2019; LaHusen et al., 2020). Il est important de noter que la taille des anciens glissements de terrain, comme par exemple le glissement de terrain d'Ikoma dans la région voisine de Bukavu en R.D. Congo (Dille et al., 2019), reflète une histoire d'accumulation de phases de déformation de la pente (Tanyaş et al., 2018). En d'autres termes, la taille réelle d'un ancien glissement de terrain n'est pas nécessairement la conséquence d'une seule rupture de pente associée à un événement déclencheur de forte magnitude. Les nombreuses réactivations que nous avons détectées dans la région de Bujumbura soutiennent ce scénario de dépendance où la taille des GTEs augmente avec le temps (Temme et al., 2020).

Notre étude atteste que presque tous les GTEs récents sont déclenchés par les pluies. Ceci est cohérent avec l'analyse régionale de (Dewitte et al., 2021; Monsieurs et al., 2018). Ces glissements/avalanches/coulées de débris, généralement de petite taille, sont également observés le long des coupures de routes, des caniveaux et d'autres zones de concentration des eaux de ruissellement. Ainsi, ces interventions humaines dans le paysage exacerbent l'impact des précipitations sur les glissements de terrain. L'analyse des photographies historiques révèle que l'étendue de la forêt sur les pentes des reliefs de Bujumbura était déjà limitée dans les années 1950. La déforestation ne peut donc pas être invoquée comme un facteur de glissement de terrain peu profond (Dewitte et al., 2021).

L'exploitation incontrôlée de matériaux de construction dans les lits/flancs des rivières modifie profondément la dynamique et la morphologie de ces dernières. Dans de nombreux endroits, l'incision accrue des rivières déclenche l'apparition ou l'accélération des glissements de terrain. Les modifications de l'hydrologie de surface et de subsurface associées à l'extension des zones bâties et du réseau routier, ainsi que les modifications de la dynamique fluviale liées à l'exploitation des matériaux, seraient également à l'origine de l'émergence de nouveaux ravins. Le développement rapide et continu des ravines et les processus de glissement de terrain associés suggèrent que la plupart d'entre elles n'ont pas encore atteint leur équilibre

## 6. CONCLUSION

Un inventaire exhaustif des glissements de terrain et des processus d'érosion en périphérie de Bujumbura en particulier a été mené en utilisant des interprétations visuelles des images satellitaires de très haute résolution, des photographies aériennes actuelles et historiques dès les années 1950s ainsi que des investigations de terrain. La périphérie visée par cette recherche est caractérisée par une forte densité de GTEs. Le secteur d'étude a été sélectionné grâce à la disponibilité d'un jeu de données indispensable pour décrire, comprendre et évaluer le processus de rupture des pentes dans la région.

Pour répondre aux objectifs de cette recherche, une méthodologie basée sur l'inventaire et la caractérisation de la distribution spatiale et temporelle des GTEs a été établie. L'évaluation des mouvements de terrain constitue une étape nécessaire pour l'aide à la prise de décision, et aussi pour le bien-être des habitants de la région. La zone d'étude connaît une variation géologique, géomorphologique et climatique. Il en ressort que ce secteur met en évidence des formations géologiques variées avec de fréquentes lithologies diversifiées (colluvion, gneiss, granites, pegmatites, quartzites, et méta quartzites) sous un climat tropical humide favorisant une altération rapide avec formation du sol épais susceptible aux ruptures de pente. La tectonique est justifiée par la localisation de la zone d'étude dans le domaine d'effondrement du rift est africain, branche occidentale. Tectoniquement, la région est caractérisée par l'effet du rifting qui affecte les roches en place, et provoquant un rajeunissement du paysage favorable aux GTEs. Cette position particulière au rift se traduit actuellement par une sismicité et du volcanisme associé. De ce fait, les différentes unités géologiques s'y trouvant sont fragilisées par la réactivation et l'intensification de la fracturation et deviennent très susceptibles aux GTEs. L'inventaire, la cartographie, la classification et la caractérisation des mouvements de terrain, correspondent à des éléments cruciaux pour mener à bien notre recherche. Cette étape a permis de mettre en place un catalogue et une base de données cartographique détaillée de 1286 mouvements de terrain. Ces GTEs ont été reclassés en six grandes familles de mouvements de versant, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit notamment des glissements, des avalanches, des coulées, des sapements de berges/bord de routes, des GTEs complexes ainsi que des érosions par ravinement. Les GTEs sont inventoriés en distinguant la profondeur, l'âge et l'état d'activité. L'analyse du processus âge des GTEs s'est réalisé à base des photographies aériennes historiques depuis les années 1950 et ont permis de faire une analyse de l'activité sur une période assez grande du moins à l'échelle humaine (environ 70ans). Les GTEs profonds sont généralement anciens et dominant en taille et en nombre tandis que les GTEs peu profonds sont récents, actifs et essentiellement déclenchés en groupe lors des évènements extrêmes liés aux fortes pluies. Géomorphologiquement, les GTEs actifs sont plus importants dans le paysage rajeuni qu'ancien. Généralement de petite taille à moyenne, les GTEs actifs englobent aussi des GTEs larges tels que coulées de terres lentes et les GTEs complexe glissement-coulées qui restent actifs pendant une longue période dans la nature. L'inventaire élaboré est de bonne qualité comparativement aux autres disponibles à l'échelle de Bujumbura. L'échelle d'analyse, la qualité et la résolution des données de base, le temps de réalisation et la qualité de l'outillage mis à disposition, sans oublier le degré d'expérience de la personne menant l'étude et son encadrement, sont les facteurs les plus importants qui ont influencé la qualité et la pertinence de l'inventaire produit.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants au Projet IFDC/PAGRIS pour leur avoir donné l'opportunité de partager les résultats de leur recherche durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Clarke, B. A., & D.W. Burbank. 2011. Quantifying bedrock-fracture patterns within the shallow subsurface: Implications for rock mass strength, bedrock landslides, and erodibility. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4). <https://doi.org/10.1029/2011JF001987>.
2. Crosta, G.B., P. Frattini and F. Agliardi. Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 605, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.028>
3. Delvaux, D. 2001. Tectonic and palaeostress evolution of the Tanganyika-Rukwa-Malawi rift segment, East African rift System. *Peri-Tethys Memoir*, 6, 545-567.
4. Delvaux, D., F. Kervyn, A. S. Macheyeke and E.B. Temu. 2012. Geodynamic significance of the TRM segment in the East African Rift (W-Tanzania): Active tectonics and paleostress in the Ufipa plateau and Rukwa basin. *Journal of Structural Geology*, 37, 161-180.
5. Delvaux, D., F. Kervyn, A.S. Macheyeke and E.B. Temu. 2012. Geodynamic significance of the TRM segment in the East African Rift (W-Tanzania): Active tectonics and paleostress in the Ufipa plateau and Rukwa basin. *Journal of Structural Geology*, 37, 161-180.
6. Depicker, A. G. Govers, L. Jacobs, B. Campforts, J. Uwihirwe and O. Dewitte. 2021. Interactions between deforestation, landscape rejuvenation, and shallow landslides in the North Tanganyika–Kivu rift region, Africa. *Earth Surface Dynamics*, 9(3), 445–462. <https://doi.org/10.5194/esurf-2020-87>.
7. Depicker, A., G. Govers, L. Jacobs, M. Vanmaercke, J. Uwihirwe, B. Campforts and O. Dewitte. 2024. Mobilization rates of landslides in a changing tropical environment : 60-year record over a large region of the East African Rift. *Geomorphology*, 109156.
8. Depicker, A., L. Jacobs, D. Delvaux, H.B. Havenith, J.C.M. Mateso, G. Govers and O. Dewitte. 2020. The added value of a regional landslide susceptibility assessment: The western branch of the East African Rift. *Geomorphology*, 353, 106886. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106886>.
9. Depicker, A., L. Jacobs, N. Mboga, B. Smets, A. Van Rompaey, M. Lennert and G. Govers. 2021. Historical dynamics of landslide risk from population and forest-cover changes in the Kivu Rift. *Nature Sustainability*, 4(11), 965-974.
10. Désiré, K., A.B. Lahsen, B. Mahfoud, D. Olivier, A. Abdallah, and B. Tarik. 2018. Landslides susceptibility assessment using AHP method in Kanyosha watershed (Bujumbura-Burundi): Urbanisation and management impacts. In *MATEC web of conferences* (Vol. 149, p. 02071). edp sciences.
11. Dewitte, O., A. Dille, A. Depicker, D. Kubwimana, J.C.M. Mateso and T.M. Bibentyo et E. Monsieurs. 2021. Constraining landslide timing in a data-scarce context: from recent to very old processes in the tropical environment of the North Tanganyika-Kivu Rift region. *Landslides*, 18(1), 161–177. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01452-0>.
12. Dille, A., F. Kervyn, T.M. Bibentyo, D. Delvaux, G.B. Ganza, G.I. Mawe and O. Dewitte, O. 2019. Causes and triggers of deep-seated hillslope instability in the tropics—Insights from a 60-year record of Ikoma landslide (DR Congo). *Geomorphology*, 345, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106835>.
13. Dini, B., S. Daout, A. Manconi and S. Loew. 2019. Classification of slope processes based on multitemporal DInSAR analyses in the Himalaya of NW Bhutan. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111408. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111408>.
14. Ebinger, C. and T. Furman. 2003. Geodynamical setting of the Virunga volcanic province, East Africa. *Acta Vulcanologica*, 14(1/2), 9.
15. Felton, A. A., J.M. Russell, A.S. Cohen, M.E. Baker, J.T. Chesley, K.E. Lezzar and J.J. Tiercelin. (2007). Paleolimnological evidence for the onset and termination of glacial aridity from Lake Tanganyika, Tropical East Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(3-4), 405–423. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.04.003>.
16. Gariano, S. L. and F. Guzzetti. 2016. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.

17. Handwerger, A. L., E.J. Fielding, M.H. Huang, G.L. Bennett, C. L. Liang and W.H. Schulz. 2019. Widespread initiation, reactivation, and acceleration of landslides in the northern California Coast Ranges due to extreme rainfall. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(7), 1782–1797. <https://doi.org/10.1029/2019JF005035>.
18. Highland, L. M. and P. Bobrowsky. 2008. *The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
19. Hungr, O., S. Leroueil and L. Picarelli. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
20. Ilunga, L. 1991. Morphologie, volcanisme et sedimentation dans le rift du Sud-Kivu. *Bull - Soc Geogr Liege*, 27, 209–228.
21. Jacobs, L., O. Dewitte, J. Poesen, J. Maes, K. Mertens, J. Sekajugo, M. Kervyn. 2017. Landslide characteristics and spatial distribution in the Rwenzori Mountains, Uganda. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 917–930. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.05.013>.
22. Kirschbaum, D., T. Stanley and Y. Zhou. 2015a. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>.
23. Kirschbaum, D.B., R. Adler, Y. Hong et al. 2010. A global landslide catalog for hazard applications: Method, results, and limitations. *Nat Hazards*, 52, 561–575. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9401-4>.
24. Kirschbaum, D.B., T. Stanley and J. Simmons. 2015b. A dynamic landslide hazard assessment system for Central America and Hispaniola. *Nat Hazards Earth Syst. Sci*, 15, 2257–2272. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2257-2015>.
25. Kubwimana, D., L. Ait Brahim, P. Nkurunziza, A. Dille, A. Depicker, L. Nahimana and O. Dewitte. 2021. Characteristics and distribution of landslides in the populated hillslopes of Bujumbura, Burundi. *Geosciences*, 11(6), 259.
26. Kubwimana, D., L.A. Brahim and A. Abdelouafi. 2021. A new approach in the development and analysis of the landslide susceptibility map of the hillslopes of Bujumbura, Burundi. *EUREKA: Physics and Engineering*,(3), 26-34.
27. Lacroix, P., A.L. Handwerger and G. Bièvre. 2020. Life and death of slow-moving landslides. *Nat Rev. Earth Env*, 1, 404–419. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0072-8>.
28. LaHusen, S. R., A.R. Duvall, A.M. Booth, A. Grant, B. A. Mishkin, D.R. Montgomery and J. Wartman. 2020. Rainfall triggers more deep-seated landslides than Cascadia earthquakes in the Oregon Coast Range, USA. *Science advances*, 6(38), eaba6790. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba6790>.
29. Larsen, I. J. and R. Montgomery. 2012. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision. *Nature Geoscience*, 5(7), 468–473. <https://doi.org/10.1038/ngeo1479>.
30. Marc, O., R. Behling, C. Andermann, J.M. Turowski, L. Illien, S. Roessner and N. Hovius. 2019. Long-term erosion of the Nepal Himalayas by bedrock landsliding: the role of monsoons, earthquakes and giant landslides. *Earth Surface Dynamics*, 7(1), 107–128. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-107-2019>.
31. McAdoo, B., M. Quak, K. Gnyawali, B. Adhikari, S. Devkota., P. Rajbhandari and K. Sudmeier. 2018. Brief communication: Roads and landslides in Nepal: How development affects risk, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 18, 1–6, <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-461>.
32. McCalpin, J. 1984. Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. In *Proceedings 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium* (pp. 5–6).
33. Michellier, C., Pigeon, P., Kervyn, F., & Wolff, E. (2016). Contextualizing vulnerability assessment: a support to geo-risk management in central Africa. *Natural hazards*, 82(1), 27–42. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2295-z>.
34. Moeyersons, J and P. Trefois. 2012. La protection du site CURGO - Kabezi -Bujumbura contre les risques hydrologiques dans le bassin de la riviere Nyabage Etude de formulation d'une operation de conservation. Turvuren, Belgium. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:3e6a844d-e90e-4234-b83e-6215846ca652?collection=research>. Accessed on 16 June 2021.

35. Monsieurs, E., D.B. Kirschbaum, J. Tan, J.C. Maki Mateso, L. Jacobs, P.D. Plisnier, W. Thiery, A. Umutoni, D. Musoni, T.M. Bibentyo, G.B. Ganza, G.I. Mawe, L. Bagalwa, C. Kankurize, C. Michellier, T. Stanley, F. Kervyn, M. Kervyn, A. Demoulin and O. Dewitte. 2018. Evaluating TMPA Rainfall over the Sparsely Gauged East African Rift, *J. Hydrometeorol.*, 19(9), 1507–1528. DOI:10.1175/JHM-D-18-0103.1. Morley, C.K., Ngenoh, D.K., & Ego, J.K. (1999). Introduction to the East African Rift System, in C.K.
36. Morley ed., *Geoscience of Rift Systems—Evolution of East Africa: AAPG Studies in Geology No. 44*, p. 1–18.
37. Nadim, F., O. Kjekstad, P. Peduzzi, C. Herold and C. Jaedicke. 2006. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, 3, 159-173.
38. Nibigira, L., S. Draidia and H. Havenith. 2015. Landslide Susceptibility Mapping in the Great Lakes Region of Africa, Case Study of Bujumbura Burundi. In: Lollino G. et al. (eds.) *Engineering Geology for Society and Territory/ Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, Volume 2*, pp. 985–988. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3\\_172](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_172).
39. Nobile, A., A. Dille, A. E. Monsieurs, J. Basimike, T.M. Bibentyo, N. d'Oreye and O. Dewitte. 2018. Multi-temporal DInSAR to characterise landslide ground deformations in a tropical urban environment : Focus on Bukavu (DR Congo). *Remote Sensing*, 10(4), 626. <https://doi.org/10.3390/rs10040626>.
40. Reichenbach, P., M. Rossi and B.D. Malamud. 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>.
41. Samia, J., A. Temme and A. Bregt. 2017. Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory. *Landslides* 14 :547–558. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0739-x>.
42. Schuster, R.L. 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. In: *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Washington (DC): National Academy Press, 12–35.
43. Shirambere, G., M.O. Nyadawa and Nyomboi, T. 2018). Comparative assessment of landslide susceptibility by logistic regression and first order second moment method: Case study of Bujumbura Peri-Urban Area, Burundi. *J Eng Res Appl*, 8, 28–37. <https://doi.org/10.9790/9622-0808022837>.
44. Sidle, R. C. and T.A Bogaard. 2016). Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides. *Earth-science reviews*, 159, 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.05.013>.
45. Smets, B. Delvaux and K. Ann. 2016. The role of inherited crustal structures and magmatism in the development of rift segments : Insights from the Kivu basin, western branch of the East African Rift. *Tectonophysics*, 683, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.022>.
46. Stanley, T. and D.B. Kirschbaum. 2017. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Nat. Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y>.
47. Tanyaş, H., K. E. Allstadt and C.J. van Westen. 2018. An updated method for estimating landslide-event magnitude. *Earth Surf Process Landforms*, 43, 1836–1847. <https://doi.org/10.1002/esp.4359>.
48. Temme, A., Guzzetti, F., Samia, J., & Mirus, B. B. (2020). The future of landslides' past—a framework for assessing consecutive landsliding systems. *Landslides*, 17(7), 1519–1528. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01405-7>.
49. Terzaghi, K. 1960. *Mechanism of Landslides. From theory to practice in soil mechanics*. New York, Wiley, pp. 202–245.
50. Wassmer, P, D. Schwartz, C. Gomez., S. Ward and P. Barrere. 2013. Geomorphology and sedimentary structures of Upper Pleistocene to Holocene alluvium within the Nyabarongo valley (Rwanda). *Palaeoclimate and palaeo-environmental implications*. *Geogr. Fis. Din. Quat*, 36, 199–210. <https://doi.org/10.4461/GFDQ.2013.36.17>.

# Thème 4

## Estimation des pertes en terre par l'érosion linéaire en rigoles : application de la méthode ACED

A. Niyungeko<sup>1\*</sup>, D. Nduwimana<sup>2</sup> et S. Kaboneka<sup>3</sup>

1. Responsable de la composante Bassin Versant, Projet PAGRIS, IFDC, B.P. 1955 Bujumbura
2. Candidat doctorant, Projet PAGRIS.
3. Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). B.P. 2940. Bujumbura.

\* **Auteur de correspondance : [aniyungeko@ifdc.org](mailto:aniyungeko@ifdc.org)**

### Résumé

Les pertes en terre par érosion est très répandue au Burundi et réduit la productivité agricole. L'absence d'évaluation de l'érosion linéaire en rigoles des terres cultivées est une contrainte qui entrave la quantification de l'érosion des bassins versants au Burundi. Dans le souci d'appuyer le suivi de la stratégie nationale d'aménagement des sols, cette méthode peut être d'une utilité inestimable. La présente étude a été menée pour estimer les pertes en terre dues à l'érosion en rigoles en utilisant la méthode ACED (Assessment Current Erosion Damage) basée sur la mesure de la longueur, de la largeur et de la profondeur des rigoles résultant du volume de sol érodé des rigoles formées. Ces dernières ont été mesurées et le volume d'érosion du sol a été évalué sur quatre sites en 2022 et trois sites en 2023. Les résultats obtenus ont révélé que le volume de pertes en terre était estimé à 14,55 T ha<sup>-1</sup> par an<sup>-1</sup>. Le volume de pertes en terre (0,55 T ha<sup>-1</sup> et 82,40 T ha<sup>-1</sup>) augmente avec l'augmentation du degré de la pente (5-10%, et ≥ 71%), respectivement. Une bonne gestion intégrée et appropriée des bassins versants avec des pratiques adéquates de gestion de la fertilité du sol pourraient combattre l'érosion des sols.

**Mots clés : Pertes en terre, bassin versant, ACED, érosion en rigoles, fertilité du sol, Burundi**

## Abstract

Soil loss from farmlands through erosion is widespread and reduces crop productivity. Lack of linear field erosion assessment is a constraint impeding to predict soil erosion in a watershed in Burundi. In order to support the monitoring of the national land use strategy, this method can be invaluable. This study was conducted to estimate the soil losses due to rill erosions using an Assessment Current Erosion Damage Method (ACED) which is based on measuring the length, width, and depth of rills resulting from the volume of eroded soil in a given field. Dimensions of the rills were measured at different slopes and rills volume of rill erosions were assessed in four sites in 2022 and three sites in 2023. Obtained results revealed that the volume of soil loss was estimated to 14,55 T ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Volume soil losses (0,55 T ha<sup>-1</sup> and 82,40 T ha<sup>-1</sup>) were significantly influenced by slope degrees (5-10% and ≥ 71%). The interaction slope\* site and slope\* rainfall has a significant effect on soil erosion. Linear soil erosion in form of rills was impacted by soil fertility et crop production in the study watershed. However, an appropriate integrated watershed management interventions and an effective soil fertility management practices could combat soil erosion.

**Keys words: ACED, soil loss, rill erosion, watershed, soil fertility, Burundi.**

# 1. INTRODUCTION

L'érosion des sols est considérée comme l'un des problèmes environnementaux les plus critiques au monde (Schonbrodt-Stitt et al., 2014). C'est une menace majeure pour la ressource sol, la fertilité, de la productivité des sols et de la production d'aliments et des pâturages au Burundi (MINEAGRIE, 2022). L'érosion enlève une partie considérable de la couche arable. Mais le problème n'est pas seulement la quantité de sol perdue en tant que telle. Il s'agit également de la perte de qualité du sol, qui compromettra à long terme la production si les minéraux argileux, la matière organique et les nutriments sont emportés par l'érosion.

La dégradation des sols dans les bassins versants résulte de l'eau de ruissellement, de l'érosion des sols et de processus anthropogéniques qui entraînent une grave détérioration environnementale de la couche arable, des changements des propriétés physiques des sols et la perte de la productivité biologique ou économique des terres (PNUE, 1984). Le processus de dégradation des sols a été accéléré par une mauvaise gestion et des pratiques d'utilisation des sols, telles que les pratiques agricoles inappropriées et le labourage des sols marginaux (MoEnv, 2006).

La dégradation des terres, en particulier par l'érosion des sols, est le principal défi à la durabilité de l'agriculture au Burundi. Il perd son capital naturel à un rythme alarmant en raison du changement climatique. Le pays est sculpté de collines verdoyantes où 90 % de la population vit et se développe. L'analyse environnementale nationale de 2017 a révélé que le pays perdait chaque année 1,6 % de son PIB à cause de la dégradation des sols. Un nouveau rapport conjoint de la Banque mondiale et du Gouvernement du Burundi (GoB) intitulé « Tackling Climate Change, Land Degradation and Fragility » constate que le Burundi perd chaque année 5,2 % de sa superficie en raison de la dégradation des sols suite à l'érosion hydrique depuis 2020.

Tout compte fait, la dégradation continue des terres cultivées et l'exiguïté des terres menacent la sécurité alimentaire des communautés rurales. Les pertes en terres sont beaucoup affectées par les pratiques culturales et d'élevages. Ces pratiques occupent la plus grande partie des sols exploitables, 1 210 000 ha (soit 43.4%) pour les cultures vivrières et 775 510 ha (soit 28.7 %) pour les pâturages (INECN, 2013).

Des mesures de gestion de sols sont en effet proposées par le Document d'Orientation Stratégique d'Amenagement des Bassins Versants (DOSABV) validé par une commission scientifique et le Conseil des Ministres en 2022. Ce document propose des pratiques sur des gradients de pentes (0-6%, 6-25%, 25-40%, 40-60 %, > 60 %) et la profondeur du sol (< ou > 100 cm). Les pratiques suivantes sont proposées pour l'aménagement des sols en pentes : Haies vives agroforestières + labour en courbe de niveau ; Cultures pérennes ; Terrasses progressives + haies vives agroforestières ; Terrasses radicales ; Terrasses progressives + haies vives agroforestières en transition vers une afforestation ou vers des cultures pérennes ; Micro-terrasses radicales ; Boisements familiaux à usages multiples ; Couvert végétal naturel ; Afforestation (MINEAGRIE, 2022).

En dépit de cette dégradation, et du fait que l'érosion linéaire en rigoles est susceptible d'être un contributeur majeur à la perte de fertilité du sol, l'absence d'évaluation de l'érosion linéaire en rigoles des terres cultivées est une contrainte qui entrave la quantification de l'érosion des bassins versants au Burundi. Les seules mesures de pertes en terre faites au Burundi sont les mesures par l'équation universelle des pertes en terre (USLE) de Wischmeier et Smith dans les stations de Rushubi (Mumirwa), de Mashitsi (Kirimiro), de Gashikanwa (Buyenzi) et de Matongo (Mugamba Nord). Cette méthode présente cependant deux principales limites au Burundi. Elle est appliquée sous monoculture alors que la plupart des exploitations sont en polyculture, elle est peu applicable dans les conditions tropicales avec des valeurs très élevées surtout en zones de haute pluviométrie et topographie abrupte

Une étude a été menée par IFDC (International Fertilizer Development Center) et en collaboration avec la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), dans le cadre du projet PAGRIS (Projet d'Appui pour une Gestion Responsable et Intégrée de Sols), dans le but d'estimer les pertes en terre dues à l'érosion linéaire en utilisant une méthode appelée « ACED » (Assessment of Current Erosion Damage). Cette méthode est basée sur la mesure des volumes de sols emportés par l'érosion linéaire en rigoles basée par de la longueur, la largeur et la profondeur

des rigoles formées. Les pertes de terre exprimées en masse sont calculées en multipliant les volumes érodés par les masses volumiques du sol établis sur base d'échantillons prélevés autour du champ ayant fait l'objet de mesures d'érosion. Ces champs appartenaient aux agri-chercheurs choisis parmi les nombreux agriculteurs associés au projet PAGRIS. Le principal objectif est d'estimer les pertes de sol à cause de l'érosion hydrique afin d'établir des plans d'action et de lancer des programmes d'utilisation durable des ressources foncières.

### **Pourquoi évaluer les dommages causés par l'érosion ?**

Les projets de développement, les consultants et les vulgarisateurs sont confrontés à des défis de conservation des sols et de l'eau dans le cadre de leurs activités régulières. Une approche de la conservation des sols et de l'eau doit être différenciée et axée sur les problèmes. Pour une zone spécifique, il est nécessaire de déterminer quand, où et comment commencer la conservation des sols et de l'eau. Si l'on comprend la base des processus qui conduisent aux dommages causés par l'érosion, on dispose déjà de nombreuses indications sur la conservation de l'eau et du sol.

Comment évaluer l'érosion, quelle est la gravité des dégâts, quelles en sont les causes et comment lancer la conservation de l'eau du sol ? La question est de savoir comment obtenir les informations sur l'érosion dans un délai raisonnable.

L'objectif de cette étude basée sur la méthode ACED est de combler les lacunes existantes en matière d'appréhension des effets de l'érosion linéaire en rigoles et de présenter une méthode d'évaluation rapide de la situation au niveau de l'exploitation, et d'indiquer les options de conservation des sols et de l'eau. L'évaluation de l'érosion n'est pas un objectif en soi ; elle doit conduire à la conservation des sols et de l'eau. La principale différence entre les rigoles et les ravines réside dans leur profondeur et largeur. Une classification est donnée par la méthode de collecte de données ACED sur terrain. Un exemple d'une telle différenciation entre les rigoles et les ravines est proposée par Harweg (1996).

**Tableau 1. Classification différentielle des rigoles et des ravines.**

	Largeur (cm)	Profondeur (cm)
Rigoles peu profondes	< 25	< 15
Rigoles peu profondes à larges	25-200	< 15
Profondes rigoles	< 50	15-100
Profondes et larges rigoles	50-200	15-100
Larges rigoles	> 200	< 100
Ravines	Aucun	> 100

## 2. MATERIELS ET METHODES

L'étude basée sur l'estimation des pertes en terre dues à l'érosion linéaire en utilisant la méthode ACED a été menée dans quatre sites : Gatura en province Bubanza ; Mubondo en province Makamba ; Mubimbi en province Bujumbura et Kibere en province Gitega en 2022. Elle a été reprise en 2023 dans les trois sites de Kizunga en province Bujumbura ; Rwezamenyo en province Gitega et Mubondo en province Makamba.

Pour chaque commune, 10 ménages ont été échantillonnés pendant 2 saisons culturales A et B. Au total, 70 champs ont été suivis pour les deux années. Durant les deux ans, les mesures de pertes en terre ont été prises par les Etudiants Stagiaires de la Faculté d'Agronomie et Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi. Ils ont au préalable suivi une formation sur la méthode ACED, ses potentiels, ses limitations et son applicabilité. La formation était centrée sur la façon de mesurer les récentes rigoles formées par l'érosion hydrique dans les IPP démos des Agri-chercheurs, bénéficiaires du projet PAGRIS. Les mesures effectuées étaient la longueur, la largeur et la profondeur de rigole en

utilisant un matériel simple constitué de mètre ruban, latte, stylo ou crayon et une fiche de collecte à compléter par les données collectées. La superficie de chaque terrain érodé a été mesurée à l'aide d'un mètre-ruban tandis que la pente a été déterminée par un clinomètre. Les mesures des densités apparentes (masses volumiques) ont été effectuées avec des cylindres métalliques introduits à différents endroits autour du champ étudié pour échantillonnage du sol.

Les mesures de longueur de rigoles, leur largeur et leur profondeur permettent d'en estimer les volumes qui sont transformés en masses de terre érodées en multipliant les volumes obtenus par la masse volumique moyenne du site. Lorsque plusieurs rigoles sont présentes dans un champ, leurs volumes sont sommés et leurs masses estimées en les rapportant à l'hectare.

### **Protocole d'évaluation des dégâts dus à l'érosion (ACED) par le projet PAGRIS**

Dans le cadre de la recherche sur les parcelles de démonstration IPP, des enquêtes sur l'érosion des sols ont été menées pour quantifier les pertes de sol. En répétant les enquêtes au fil du temps, il a été possible de voir les effets des plantes et mesurer les IPP sur l'érosion des sols. À cette fin, la méthode d'évaluation des dégâts actuels dus à l'érosion (ACED) a été utilisée. La méthode ACED est une enquête sur l'érosion conçue pour des zones de la taille d'un champ qui permet de quantifier les pertes de sol sur la base d'observations et de mesures des caractéristiques d'érosion visuelle, qui sont les rigoles et les ravins exposés (Herweg, 1996).

### **Calendrier de l'enquête**

Les études d'érosion sur les parcelles de démonstration IPP ont été menées deux fois par saison des pluies. La première enquête a été effectuée avant le début des pluies, un jour sec où il n'y a pas d'érosion. Deux situations sont alors possibles : 1) le champ ne présente pas de caractéristiques d'érosion, soit parce qu'elles ont été éliminées par le travail du sol (Fig. 1A), soit parce que le champ n'est pas du tout soumis à l'érosion ; et 2) des caractéristiques d'érosion évidentes sont visibles et n'ont pas été éliminées par le travail du sol (Fig. 1B).

Cette première enquête vise à obtenir une mesure de référence qui peut être utilisée pour comparer avec la deuxième enquête. Cette seconde enquête a été effectuée peu après le début de la saison des pluies, lorsque les caractéristiques d'érosion du sol sont généralement plus visibles sur le terrain (Fig. 1C). Ainsi, le second calendrier dépend des quantités et des intensités de pluie déjà tombées et de la quantité d'érosion générée. Il est important que cette deuxième étude soit effectuée avant que l'agriculteur ne procède à une opération de labour, comme le désherbage, qui pourrait à nouveau éliminer les éléments d'érosion. Cela se fera généralement environ 4 semaines après le début de la saison des pluies et le semis/plantation des cultures.



**Figure 1. Exemples de champs pour les relevés d'érosion. A - Champ labouré propre juste avant le début de la saison des pluies ; B - Champ présentant des caractéristiques d'érosion juste avant le début de la saison des pluies ; C - Champ présentant des rigoles formé quelques semaines après le début de la saison des pluies.**

## Matériels et méthodes-Délimitation du champ

En utilisant la méthode ACED, la perte de sol est d'abord exprimée en volume de perte de sol (en m<sup>3</sup>) ou en masse (Tonne) par unité de surface (m<sup>2</sup>). Cette perte de sol peut provenir de l'ensemble du champ, mais il arrive que l'érosion du sol ne se produise que sur une partie du champ. Une raison de l'érosion spécifique à un lieu peut être le type de culture qui est cultivé sur une partie du champ qui offre moins de protection. D'autres raisons peuvent être des différences d'angle de pente sur une partie du champ ou le sol peut être moins érodable dans certaines parties par rapport à d'autres. Il est donc important que pour chaque relevé, une carte du champ soit établie qui montre schématiquement la répartition des caractéristiques d'érosion.

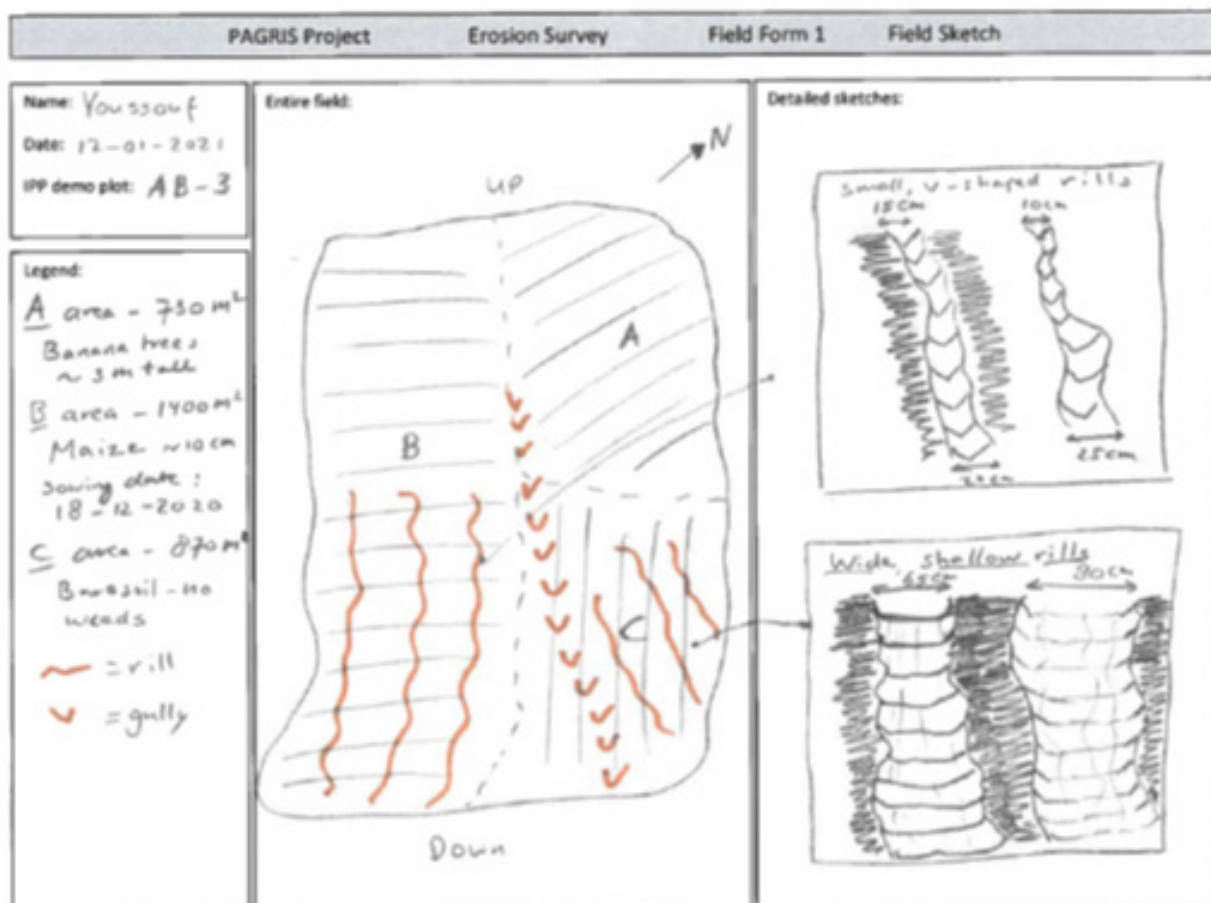


Figure 2. Un exemple de carte de terrain indiquant trois zones (A, B et C) avec différentes caractéristiques d'érosion du sol.

### Mesurer des rigoles et des ravines

Bien que plusieurs caractéristiques d'érosion puissent être visibles, dans cette méthode ACED simplifiée, seuls les rigoles et les ravines sont mesurés. La différence entre les rigoles et les ravines est que les rigoles peuvent être éliminées par des méthodes de travail du sol ordinaires, tandis que les ravines sont des canaux permanents qui ne peuvent plus être effacés par le travail du sol. En général, les ravines sont beaucoup plus profondes que les rigoles, mais pas nécessairement plus larges. Aucun critère précis ne peut être donné pour la distinction, mais l'agriculteur doit pouvoir dire si un canal est une caractéristique permanente (et donc une ravine) ou non. Les ravines se trouvent parfois aussi en bordure d'un champ ou entre deux champs, et il faut en tenir compte dans la carte et dans le plan IPP, car cela peut causer beaucoup de dégâts en aval.

Les mesures des rigoles et des ravines ont été effectuées à l'aide d'une règle à ruban et ont été généralement effectuées pour toutes les rigoles et tous les ravines d'une parcelle (y compris ceux situés à la frontière). Une section transversale a été mesurée le long d'une rigole ou d'une ravine tous les 0,5 m. La première mesure commence à 0,25 m de la tête de la rigole/ravine à l'extrémité supérieure du champ. La section transversale suivante sera donc à 0,75 m, et ainsi de suite jusqu'à l'extrémité de la rigole ou la limite du champ. À chaque section transversale, la profondeur maximale (Fig. 3A) et la largeur moyenne (Fig. 3B) ont été mesurées et notées dans le carnet de terrain. Les mesures ont été effectuées avec une précision de 1 cm. En outre, la longueur totale de chaque rigole et de chaque ravine est mesurée. Le technicien mesureur doit s'assurer que, lorsque deux rigoles convergent, la section commune ne sera ajoutée qu'à une seule rigole. Il est très important de noter toutes les mesures dans le carnet et ce de manière claire et compréhensible, en attribuant un code (RAV1, RAV2, ...) à chaque ravine et numérotter les différentes rigoles (1, 2, 3...).



**Figure 3. Mesure de la profondeur maximale (A) et de la largeur moyenne (B) d'un ravin ou d'une rigole.**

Dans les cas extrêmes où de nombreuses rigoles (> 15) sont présentes dans une parcelle de démonstration IPP (Figure. 4), toutes les rigoles sont classées en trois groupes : petites, moyennes et grandes rigoles. Pour toutes les rigoles de chaque groupe, la longueur totale sera mesurée, mais de chaque groupe, seuls trois rigoles sont mesurés à l'aide de la méthode l'ACED. Les valeurs moyennes sont calculées et ensuite utilisées pour estimer le volume total des rigoles, et partant de leurs masses en utilisant les valeurs de masse volumique obtenues par échantillonnage de sol alentour des parcelles étudiées.



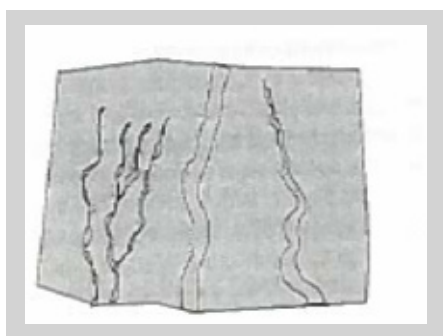
**Figure 4. Formation excessive de rigoles dans un champ de manioc.**

Pour chaque ravine et rigole ou groupe de rigoles, la longueur totale (m), la largeur moyenne (cm) et la profondeur moyenne (cm) sont notées sur un formulaire spécial préparé à cet effet. L'assistant de terrain devra calculer les valeurs moyennes de largeur et de profondeur à partir des valeurs mesurées telles qu'elles sont notées dans le carnet de terrain pour chaque ravine, rigole ou groupe de rigoles. La carte de terrain et les formulaires de mesures de terrain sont remis au personnel du projet pour être incorporés dans une feuille EXCEL spéciale afin de calculer les valeurs d'érosion pour chaque terrain. Pour chaque parcelle les pentes et les densités apparentes sont mesurées.

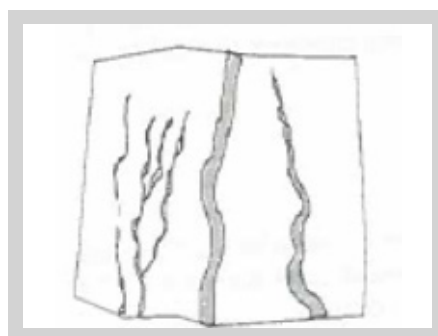
### **Quelques indicateurs de la méthode ACED**

Pour la méthode ACED, il existe des indicateurs calculés à partir des mesures sur terrain, 5 indicateurs sont souvent analysés :

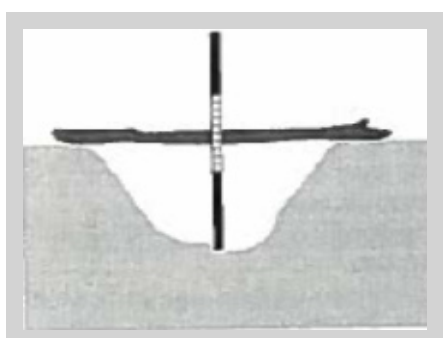
1. La perte en terre ( $m^3$  ou tonne) est la masse ou le volume de terre qui a été emporté via les rigoles formées et s'accumule en aval du champ ;
2. La masse totale ou volume par rapport à la superficie totale de la parcelle (corresponds à la superficie totale du champ, en  $m^3/ha$  ou ton/ha) ;
3. La masse de terre perdue ( $m^3/ha$  ou T/ha) rapportée à la superficie actuellement endommagée ( $m^3/ha$  ou T/ha) par l'érosion du sol et les eaux de ruissellement. Cette partie est couverte par les rigoles et la masse de terre perdue est calculée comme suit : Nombre de rigoles x Longueur moyenne de la rigole (m) x Largeur moyenne de la rigole (m) x profondeurs moyenne de la rigole (cm)/ superficie totale du champ ( $m^2$ ).
4. La superficie actuelle endommagée en pourcentage (%) du champ indique le pourcentage de la superficie érodée.
5. Superficie actuelle érodée (%) = Superficie actuelle endommagée (%) / Superficie totale du champ.



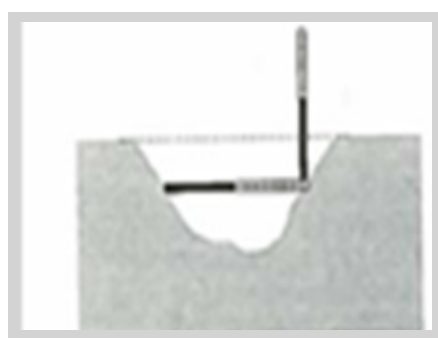
**Figure 4. Superficie totale du champ**



**Figure 5. Superficie actuelle endommagée**



**Figure 6. Mesure de la prof totale de la rigole**



**Figure 7. Mesure du diamètre moyen de la rigole**

## **3. RESULTATS ET DISCUSSION**

On distingue les indicateurs mesurés et les indicateurs calculés. Dans le présent travail, on a pris en compte quelques indicateurs à savoir la superficie actuelle érodée, la quantité de sols perdue par unité de surface érodée et la quantité de sol perdue par unité de surface totale.

## 3.1 Indicateurs mesurés

1. La pente moyenne de sol est de 32 % avec une valeur maximale de 79 %,
2. Le nombre de rigoles moyenne est 5 avec un nombre total de 49 rigoles,
3. La longueur moyenne des rigoles est de 2,25 m avec une longueur maximale de 13, 25 m,
4. La largeur moyenne est de 6 cm avec une valeur maximale de 27 cm,
5. La profondeur moyenne est de 2 cm et la valeur maximale est de 13 cm,
6. La surface actuelle érodée en moyenne est 2.47 m<sup>2</sup> et la valeur maximale est 18.98 m<sup>2</sup>

## 3.2 Indicateurs de l'érosion calculés

La superficie actuelle érodée représente la partie de la parcelle sur laquelle se trouve les rigoles et se calcule comme suit : nombre de rigoles\*longueur totale des rigoles\*largeur moyenne. Pour la saison A (correspondant aux mesures de février 2022), la superficie actuelle érodée varie de 0,32 à 9,104 m<sup>2</sup> à Bubanza, de 2,622 à 5 m<sup>2</sup> à Mabanda, de 32,025 à 42,457 m<sup>2</sup> à Mubimbi. Pour les parcelles suivies à Gitega, il n'y a pas eu de rigoles pendant cette période. En saison B (correspondant aux mesures du mois d'avril), la superficie actuelle érodée varie de 0,28 à 2,856 m<sup>2</sup> à Bubanza, de 1,656 à 10,5 m<sup>2</sup> à Mabanda, de 2,366 à 48,406 m<sup>2</sup> à Gitega. Pour Bujumbura une seule mesure de 36,69 m<sup>2</sup> a été observée. Pour l'année 2023, les mesures de la saison B sont de 0,264 à 229,799 m<sup>2</sup> à Nyabiraba ; 11,802 à 166,577 m<sup>2</sup> à Bukirasazi ; de 0,560 à 94,765 m<sup>2</sup> à Mabanda.

Le deuxième indicateur traité est la quantité de sol perdu par unité de surface totale de la parcelle. C'est le rapport entre la masse de sols perdue et la superficie totale de la parcelle. Les pertes en sol par surface totale varient de 0,072 à 8,305 T/ha à Bubanza, de 2,594 à 6,325 T/ha à Mabanda, de 3,626 à 108,150 T/ha à Mubimbi pour la saison A 2022. Pour la saison B 2022 ces pertes variaient de 0,64 à 2,634 T/ha à Bubanza, de 0,015 à 19,923 T/ha à Mabanda, de 1,077 à 26,774 T/ha à Bukirasazi et de 191,085 T/ha à Mubimbi. Pour la saison A 2023, les pertes en terre par rapport à la superficie totale de la parcelle varie de 0,138 à 727,325 T/ha à Nyabiraba, de 90,616 à 4751,045 T/ha à Makebuko, de 1,841 à 814,861 T/ha à Mabanda.

La quantité de sols perdue suite aux rigoles est liée au nombre de rigoles, leur largeur moyenne, leur profondeur moyenne et la densité apparente (masse volumique). Le nombre moyen de rigoles pour tout l'échantillon était de 15 par parcelle, la largeur moyenne des rigoles était de 13 cm, la profondeur moyenne était de 8 cm, tandis que la densité apparente moyenne (masse volumique) était de 1,23. La quantité moyenne de sol perdu par surface totale était 82,8 T/ha. Cette quantité est comparable à celle trouvée dans une étude similaire menée en Ethiopie à Chemoga (57 à 65 T/ha) (Woldeamlak B. et Geert S.), mais 1,5 à 2 fois inférieure à celle trouvée à Anjeni (130–170 T/ha) (Herweg et Stillhardt, 1999).

La méthode ACED permet de remarquer qu'il y a des variations importantes par zone d'intervention. Ces variations sont dues en grandes parties à la pluviométrie, à la pente du sol, aux pratiques agricoles dans le champ, au type sol, etc. Le nombre de rigoles paraît corrélé à la pente.

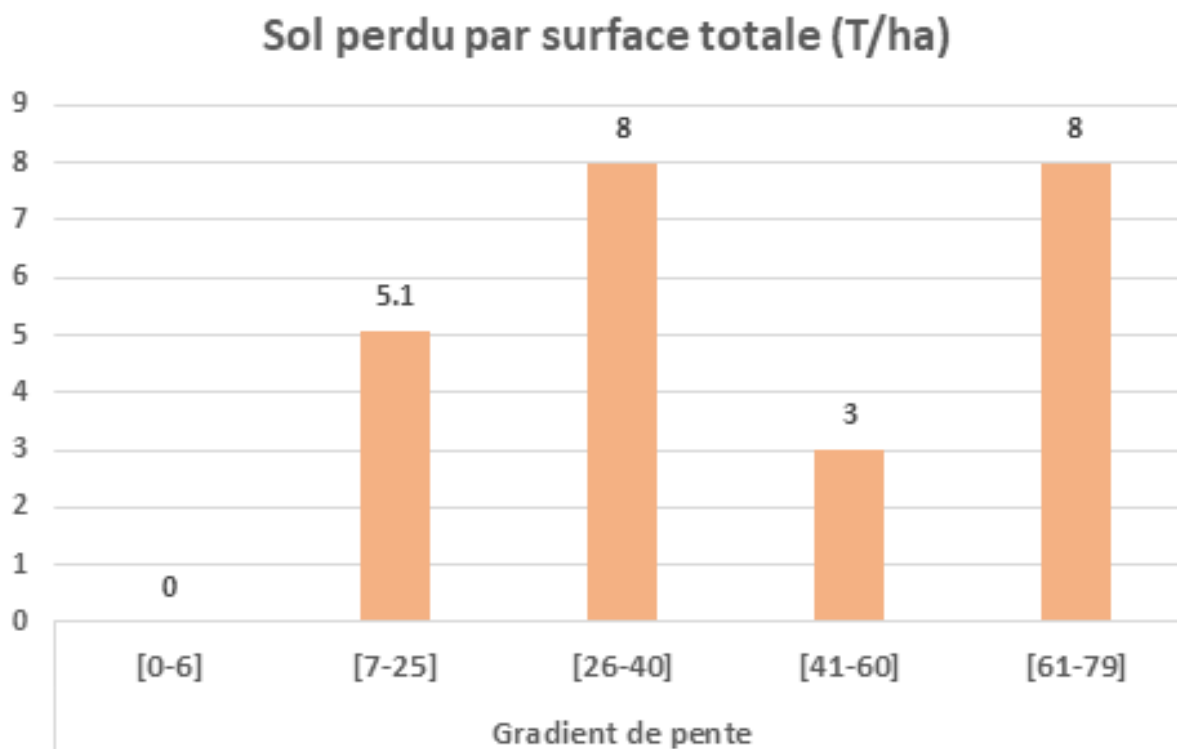
### 3.3 Effet de la pente

Les principaux facteurs de l'érosion linéaire sont l'intensité et la longueur de la pente, l'intensité de la pluie, la couverture végétale, les pratiques culturales, etc. La pente et la couverture végétale sont les principaux facteurs sur lesquels les différentes interventions travaillent au Burundi. Cependant, peu d'études ont des données sur l'effet des couvertures végétales et des pratiques proposées liées à la pente.

Le Document d'Orientation Stratégique pour l'Aménagement des sols propose les pratiques de gestion de sols selon le degré de pente : 0-6 %, 6-25 %, 25-40 %, 40-60 %, 60 % et plus. Pour 25 % à 40 % on propose des terrasses progressives plus haies vives agroforestières et des cultures pérennes si le sol à une profondeur supérieure à 100 cm, ainsi que des terrasses progressives plus haies vives agroforestières, des cultures pérennes et afforestation si la profondeur est inférieure à 100 cm (DOSABV, 2022). L'analyse des données de pertes de terres à partir des rigoles est aussi important au niveau des pentes de 25-40 % et 41-79 %. Les pratiques proposées dans le DOSABV sont bien valables si l'aménagement est global sur tout le bassin versant.

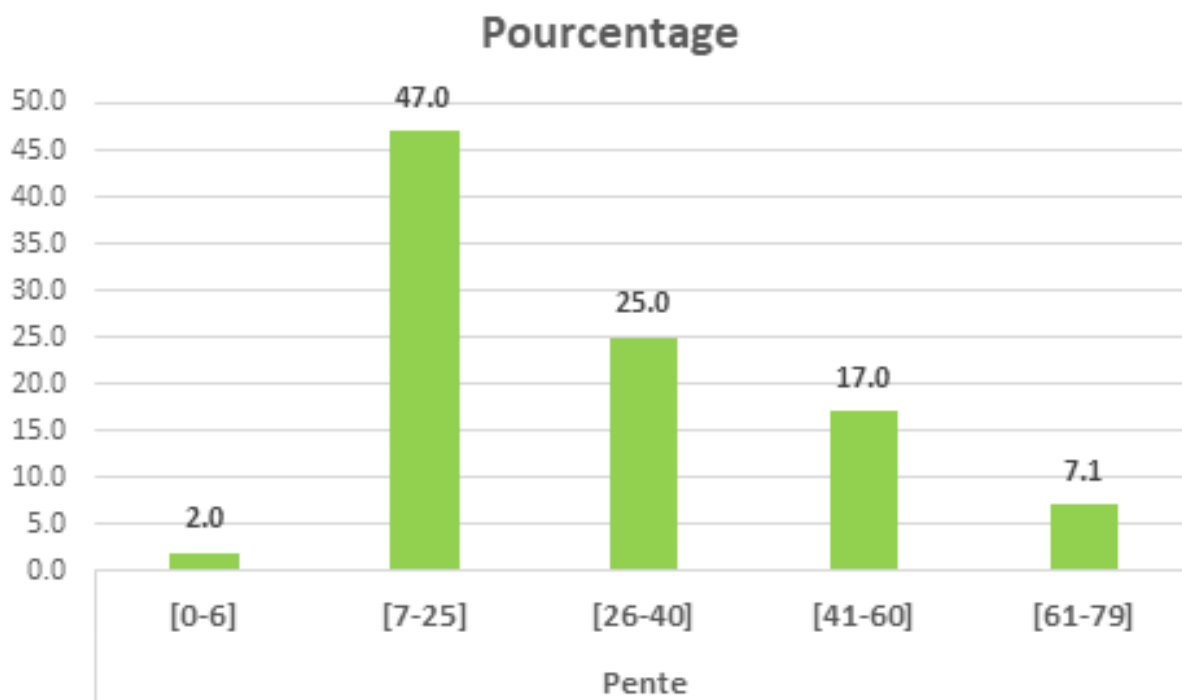
La plupart des pentes se trouve en amont des bassins versants, là où la vitesse de l'eau est encore faible. Plus l'eau parcourt une grande distance, plus la vitesse et la quantité augmentent. Cela fait qu'en bas de la pente, là où on observe une faible intensité de la pente, les rigoles sont assez larges et permettent une perte importante de sols. A ce niveau, la plupart des rigoles se joignent pour constituer de grosses rigoles tendant vers les ravines. Elles sont alors profondes et peuvent transporter d'importantes quantité de sols.

La figure 8 ci-dessous fait le lien entre la quantité de sols perdus par érosion en rigoles et les classes de pentes proposées par le DOSABV.



**Figure 8. Relation de cause à effet entre les pertes en terre par érosion en rigoles et les classes de pente proposées par le DOSABV**

L'analyse de cette figure relève que les pertes en terre sont les plus élevées sur les pentes situées entre 26-40 % et 61-79 %. Suivent les parcelles dont les pentes sont dans l'intervalle 7-25 % et 41-60 %. Lorsque l'on s'intéresse à la répartition des parcelles suivies dans la présente étude en fonction des classes de pente proposées par le DOSABV, la figure 9 ci-après est générée.



**Figure 9. Fréquence de parcelle érodées classées par gradients de pente proposés par le DOSABV**

La moitié des parcelles de notre zone d'étude se trouve dans la tranche de pentes de 7-25 % et diminue avec la croissance des gradients de pentes. La tranche des pentes entre 7 et 25 % correspond à une grande activité anthropique qui donne lieu à une plus grande susceptibilité des parcelles à l'érosion hydrique en rigoles ou ravines. La confrontation des figures 8 et 9 indique que, quand bien même la topographie est un facteur favorisant l'érosion linéaire en rigoles/ravines, les pratiques agricoles en sont les facteurs déclencheurs. En effet, la quantité de pertes en terre la plus élevée se trouve dans la tranche de 7-25 % et diminue avec la croissance de gradients de pentes. Cela implique que les pratiques proposées par le DOSABV pour la tranche de 7 à 25 % sont à prendre au sérieux au risque de perdre les terres les plus fertiles et les plus cultivées.

### 3.4 Pertes de sols par occupation culturelle de la parcelle

La quantité de sols perdus n'est pas la même, compte tenu de l'occupation du sol. Les racines, les feuillages, les pratiques culturales tendent à influencer la présence des rigoles, leur nombre, ainsi que leur profondeur. Sous les cultures maraichères, il n'y a carrément pas de pertes en sol. Cela est dû au paillage que les agriculteurs mettent dans ces cultures. Les différences de densité de rigoles, de nombre de rigoles et de l'ampleur de la perte de sol pourraient être due à la gestion des terres, facteurs topographiques, type et profondeur du sol et végétation couverture (Woo et al. 1997). Le tableau 2 compare les quantités de sol perdues par érosion en rigoles selon l'occupation des parcelles étudiées.

**Tableau 2. Quantités de sol perdu par érosion en rigoles en fonction des cultures**

Culture	Sol perdu par surface actuelle érodée (T/ha)
Aubergine	0
Choux	0
Haricot	184
Sol nu	373
Mais	138
Patate douce	220

De ce tableau, on peut distinguer 3 catégories de couverture de sol. Sol nu, cultures paillées (légumes) et cultures saisonnières (maïs, haricot patate douce). Cela montre comment les cultures paillées offrent une bonne protection contre l'érosion due aux rigoles tandis que le sol nu est toujours soumis à des pertes très énormes (près de 400 T/ha). Tout au juste, la mise en place des cultures sarclées (haricot, maïs) et la patate douce réduisent légèrement les pertes en terre observées dans le cas extrême des sols sans couvert végétal.

Les résultats rapportés dans le tableau 2 sont en totale cohérence avec la recherche menée sur l'érosion hydrique au Burundi. De fait, les travaux antérieurs menés par l'ISABU et l'IRAZ ont prouvé l'efficacité totale du paillage et la relative faible efficacité des cultures de maïs, de haricot et de patate douce contre l'érosion hydrique en nappe (voir C. Hicintuka et collègues et T. Rishirumuhirwa dans le présent document).

## 4. CONCLUSION

Dans notre zone d'intervention, les rigoles occasionnent des pertes considérables du sol (Moyenne de 7,6 t/ha). Les gradients de pentes de 26-40 % et 61-79 % montrent une grande perte en terre par ha comparativement aux autres gradients de pentes. Les fréquences des parcelles exploitées par les agriculteurs diminuent avec l'augmentation en gradient de pentes. Cela a comme conséquence que les pertes globales sont plus importantes lorsque les gradients de pentes sont faibles.

Cela renforce l'hypothèse de l'influence anthropique sur les pertes en sols. La largeur moyenne, la longueur moyenne et la profondeur moyenne sont significativement influencées par le nombre de rigoles. La méthode ACED peut contribuer significativement dans l'évaluation des pertes en terres dues à l'érosion linéaire.

Les pertes en terre dues aux rigoles sont influencées par la couverture végétale: les sols paillés (légumes) occasionnent des pertes presque nulles alors que les sols nus occasionnent des pertes énormes.

La méthode ACED peut être utilisée pour connaître les meilleures pratiques à utiliser et non pour usage de pertes globales des sols. Cependant, plusieurs expériences devraient être faites pour améliorer cette méthode dans le contexte du Burundi. La méthode ACED est rapide et moins chère, demande peu de moyens. Il est nécessaire de tester d'autres facteurs qui influencent l'érosion (pluviométrie, longueur de la pente, couverture végétale, etc.).

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Projet IFDC/PAGRIS pour le financement qui a permis cette recherche et pour avoir facilité la présentation des résultats lors du Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Bewket W. et G. Sterk 2003. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia
2. Getachew A. 2009. Soil erosion assessment in agricultural landscape : the case of Rekame catchment, Alaba Woreda, Southern Ethiopia. Thesis. Addis Ababa University.
3. Herweg K. 1996. Field manual for assessment of current erosion damage. Soil conservation research programme (SCRIP), Ethiopia and centre for development and environment (CDE), University of Berne
4. Herweg, K. and B. Stillhardt. 1999. The Variability of Soil Erosion in the Highlands of Ethiopia and Eritrea. Average and Extreme Erosion Patterns. Soil Conservation Research Report 33. University of Berne, Berne.
5. INECN (Institut National pour l'Environnement et la Conservation de la Nature). 2013. Stratégie Nationale et Plan d'Action sur la Biodiversité 2013-2020
6. Lemma, B., F. Kebede, S. Mesfin, I. Fitiwy, Z. Abraha and L. Norgrove. 2017. Quantifying annual soil and nutrient loss by rill erosion in continuously used semiarid farmlands, North Ethiopia. *Environ Earth Sci* 76 : 190. Doi 10.1007/s12665-17-6506-z.
7. MINEAGRIE. 2022. Document d'orientation Stratégique d'Aménagement des Bassins Versants.
8. MoEnv. (Ministry Of Environment, Jordan). 2006. National Action Plan and Strategy to Combat Desertification. Amman, Jordan.
9. Schonbrodt-Stitt S., A. Bosch A., T. Behrens, H. Hartmann., X. Shi and T. Scholten. 2013. Approximation and spatial regionalization of rainfall erosivity based on sparse data in a mountainous catchment of the Yangtze River in Central China
10. UNEP (United Nations Environment Program). 1984. Map of Desertification Hazards, Explanatory note, (pp.13), Rome, UNEP.

# Thème 5

## Contribution de la télédétection par drones au suivi et à la modélisation des pertes en terre par érosion au Burundi

A. Sindayihebura<sup>1\*</sup>, M. Sendegeya<sup>1</sup>, M. Kataraza<sup>1</sup>, N. Nsengiyumva<sup>1</sup>, S. Ntiharizwa<sup>1</sup>, D. Kubwimana<sup>1</sup>, A. Cubahiro<sup>2</sup>, P. Nkurunziza<sup>3</sup>, C. Nizigiyimana<sup>4</sup>, S. Ndiokubwayo<sup>5</sup>, E. Duhawenimana<sup>6</sup>, L. Nahimana<sup>1</sup>, T. Declerck<sup>7</sup>, C. Metsu<sup>8</sup>, R. Schlögel<sup>9</sup>, S. Ottoy<sup>8</sup>, G. Nimpagaritse<sup>10</sup>, E. Pirard<sup>7</sup> et J. Van Orshoven<sup>8</sup>.

1. Université du Burundi. Département des Sciences de la Terre. Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement (CRSNE)
2. Université du Burundi. Département de Biologie. Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement (CRSNE)
3. Université du Burundi. Département d'Aménagement et Urbanisme. Centre de Recherche en Infrastructures, Environnement et Technologie (CRIET)
4. Institut des Sciences Agronomiques du Burundi. Unité de Gestion Conservatoire des Eaux et des Sols. Centre de Géomatique, Pédologie et Ecologie
5. Université du Burundi. Département des Sciences Agro-Environnementales. Centre de Recherche en Sciences des productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE).
6. Université du Burundi. Département des Sciences Géographiques, de l'Environnement et de la Population. Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement (CRSNE)
7. Université de Liège. Département ArGEEnCO, Géoressources minérales et Imagerie géologique
8. KU Leuven. Department of Earth and Environmental Sciences. Division of Forest, Nature and Landscape
9. Université de Liège. Département de Géologie
10. Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC). Géodynamique et Ressources Minérales

**\*Auteur pour correspondance : [anicet.sindayihebura@ub.edu.bi](mailto:anicet.sindayihebura@ub.edu.bi)**

## Résumé

Les études déjà publiées sur les pertes en terre au Burundi se sont focalisées sur l'érosion en nappe et en rigoles. Pourtant, d'autres formes d'érosion comme l'érosion liée à la récolte et celle liée au labour, le ravinement et les glissements de terrain ne devraient pas être négligées dans des pays montagneux comme le Burundi. Les récents développements ont montré l'intérêt de la télédétection par drone dans l'estimation de plusieurs facteurs et formes d'érosion du sol, particulièrement au niveau du rapport qualité/prix. Cependant, des applications de ce genre sont inexistantes au Burundi. Dans ce travail, nous évaluons la pertinence de la photogrammétrie par drone pour l'évaluation et la modélisation de l'érosion du sol au Burundi à l'aide d'un dispositif coûtant moins de 10.000 Euros, à savoir un drone de la série DJI Mavic 3 et sa télécommande pour l'acquisition des images avec une caméra RVB et un D-RTK 2 pour la correction des erreurs de localisation en l'absence d'une bonne connexion internet. Une attention particulière est portée sur l'érosion par ravinement. Les résultats montrent que les Modèles Numériques de Terrain dérivés de la photogrammétrie par drone sont suffisamment détaillés pour la cartographie des différentes classes de ravins et pour le suivi de l'évolution des dimensions des ravins. Nous concluons que la télédétection par drones offre des résultats prometteurs pour le suivi et la modélisation holistique et peu coûteuse des pertes en terre au Burundi.

**Mots-clés : Drone, holistique, Modèle Numérique de Terrain, photogrammétrie, ravinement, télédétection.**

## Abstract

Previously published studies on soil loss by erosion in Burundi have focused on sheet and rill erosion. However, other forms of erosion such as harvest erosion, tillage erosion, gully erosion and landslides should not be neglected in mountainous countries like Burundi. Recent developments have demonstrated the potential of drone remote sensing in estimating several factors and forms of soil erosion, particularly in terms of cost effectiveness. However, such applications are non-existent in Burundi. In this work, we evaluate the relevance of drone photogrammetry for soil erosion assessment and modelling in Burundi using a drone system costing less than 10,000 Euros, namely a drone from the DJI Mavic 3 series and its remote controller for RGB-image acquisition and a D-RTK 2 for correcting location errors in the absence of a good internet connection. Particular attention is paid to gully erosion. The results show that Digital Terrain Models derived from drone photogrammetry are sufficiently detailed to map the different gully classes and monitor the gully dimensions. We conclude that drone remote sensing offers promising results for the holistic and low-cost monitoring and modelling of soil loss by erosion in Burundi.

**Keywords : Drone, holistic, Digital Terrain Model, photogrammetry, gully erosion, remote sensing.**

# 1. INTRODUCTION : FORMES D'ÉROSION NON ENCORE ÉTUDIÉES AU BURUNDI

Au Burundi, les rares études sur la modélisation de l'érosion du sol se sont limitées à l'érosion en nappe et en rigoles. Alors que le projet PAGRIS tire à sa fin, il convient de plaider pour la poursuite des recherches sur l'érosion au Burundi, notamment pour aborder d'autres formes d'érosion comme le ravinement, les glissements de terrain, l'érosion due au labour et l'érosion due à la récolte. En effet, des études antérieures ont montré que ces formes d'érosion ne peuvent pas être négligées (Vanmaercke et al. (2021) et Alexiou et al. (2023) pour le ravinement, Rebelo et Nascimento (2021) pour l'érosion due au labour, Auerswald et al. (2006), Kuhwald et al. (2022), Panagos et al. (2019) et Ruysschaert et al. (2007) pour l'érosion par la récolte). Il convient aussi de souligner la contribution de la Télédétection dans la modélisation de certaines formes et facteurs d'érosion du sol. Dans ce travail, nous revoyons d'abord les applications récentes de la télédétection dans la modélisation de différentes formes et facteurs de l'érosion de l'Equation Universelle des Pertes en Terre Révisée (RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation; Renard et al., 1997), avec un accent particulier sur le ravinement. Ensuite, nous présentons des résultats préliminaires sur le ravinement obtenus à l'aide d'un dispositif de télédétection par drone d'un coût inférieur à 10.000 Euros et judicieusement choisi pour fournir un bon rapport qualité/prix. Ce dispositif est constitué d'un drone de marque DJI Mavic 3 Enterprise avec caméra RVB et télécommande et d'un module D-RTK2. La zone d'étude est Mugoboka, une zone peri-urbaine située à l'est de la ville de Bujumbura (Burundi) et qui fait face à de sérieux problèmes de glissement de terrain et de ravinement, mais aussi à une pression démographique grandissante.

## 2. FORMES ET FACTEURS D'ÉROSION POUVANT ÊTRE MIS EN ÉVIDENCE PAR LA TÉLÉDETECTION

### 2.1. Formes d'érosion

Par définition, toute forme d'érosion s'accompagne d'un changement, si petit soit-il, de la (micro)topographie suite au déplacement et au dépôt du sol déplacé. Alors que la plupart de modèles d'érosion se limitent à la quantification de terre perdue par érosion, il est tout aussi important de quantifier et de localiser les terres déposées suite à l'érosion pour étudier l'érosion de façon holistique. A ce propos, il est réconfortant de noter que des dispositifs de haute précision permettant d'atteindre cet enjeu existent déjà, et que différentes formes d'érosion peuvent être quantifiées. Avec ces dispositifs, l'estimation et la localisation des terres érodées (déplacées) d'une part, et des terres accumulées, d'autre part, consiste à opérer une soustraction des Modèles numériques de terrain (MNT) d'une même zone obtenus à des dates différentes (Alexiou et al., 2023). C'est une approche récente qui est désignée sous les termes anglais « Change Detection » ou « DEM of Difference », (DoD), DEM étant l'abréviation pour « Digital Elevation Model ». La précision de ces estimations dépend donc de la précision des MNT qui, lui-même, est fonction des composantes du dispositif utilisé, des caractéristiques du terrain, de la hauteur de vol et autres modes de prise de photos. Sans être exhaustif, voici quelques stratégies pour améliorer la précision des MNT résultant de la photogrammétrie par drones :

- Utiliser un système LiDAR : ces systèmes ont l'avantage de pénétrer la couverture végétale pour donner ainsi le modèle topographique du sol nu ou DTM. Cependant, ces systèmes coûtent cher. Pour les dispositifs sans LiDAR, l'obtention du DTM requiert une correction pour supprimer la part de la végétation et d'autres objets non naturels, comme les constructions ;
- Utiliser les points de contrôle : les coordonnées des points de contrôle doivent être mesurées avec une haute précision et ces points de contrôle doivent être bien répartis. Cependant, outre que l'appareil pour mesurer avec haute précision les coordonnées des points de contrôle coûte cher, le placement et la surveillance des points de contrôle n'est pas aisé, en particulier pour le cas de zones difficiles ou dangereux d'accès ;
- Utiliser la technologie RTK (« Real Time Kinematic ») pour corriger les coordonnées GPS du drone et ainsi pouvoir atteindre une précision centimétrique des coordonnées.
- Varier les directions et les angles de prise de vue ;

- Réaliser des prises de vue verticales et obliques si on travaille dans une zone à relief accidenté ;
- Les images doivent avoir un recouvrement frontal et latéral important : 80% et 70% sont respectivement les valeurs de recouvrement frontal et latéral généralement recommandées.

Pour la modélisation du ravinement, d'autres recherches se sont focalisées sur la caractérisation morphologique des ravins. Ainsi, par exemple, Codru et al. (2023) ont testé une méthode semi-automatique de délimitation des ravins à partir d'un inventaire de la tête de ces ravins et de leur caractérisation morphologique en fonction de l'exposition topographique (« topographic openness »). L'inventaire de la tête des ravins a été réalisé par une analyse des images libres sur les plateformes Google, Esri, et Bing, via l'extension QuickMapService du logiciel gratuit QGIS. L'approche de ces auteurs se heurte à la contrainte de devoir inventorier les têtes des ravins mais a le mérite d'utiliser des sources de données et de logiciel gratuits. Il convient aussi de noter que les valeurs pour l'exposition topographique peuvent être obtenues dans QGIS à partir d'un MNT. Aussi, des méthodes avancées de classification d'images de télédétection ont été utilisées pour la cartographie des ravins. Par exemple, Mararakanye et Nethengwe (2012) ont trouvé des résultats avec un niveau de précision satisfaisant en appliquant la méthode GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis) aux images SPOT 5 (résolution spatiale 10m) en Afrique du Sud et ont recommandé l'utilisation d'images de meilleure résolution spatiale pour améliorer cette précision.

## 2.2. Facteurs d'érosion

Considérons l'Equation Universelle des Pertes en Terre :

$$A=R*K*LS*C*P$$

Avec :

A : Pertes en terre annuelles moyennes en tonnes/hectare ( $t\ ha^{-1}\ an^{-1}$ ),

R : Facteur d'érosivité de la pluie ( $MJ * mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ an^{-1}$ ),

K : facteur d'érodibilité du sol ( $t * h/MJ * mm$ ),

LS : Facteur topographique de longueur et d'inclinaison de la pente (sans dimension),

C : Facteur lié à la pratique culturale ou à la pratique de gestion (sans dimension),

P : Facteur de pratique de conservation (sans dimension).

D'après la littérature, les facteurs LS, C et P peuvent être modélisés avec plus de précision à l'aide de drones. Pour le facteur topographique LS, nous signalons l'abondante littérature sur la modélisation de l'érosion par les Systèmes d'Information Géographique (SIG) où ce facteur est extrait d'un MNT. La photogrammétrie par drones fournit des MNT de meilleures résolutions spatiale et temporelle que les autres sources de données topographiques courantes, ce qui permet d'obtenir une meilleure précision sur le facteur LS. Pour les autres facteurs, le lecteur est invité à consulter les références ci-après : Beniaich et al. (2022), Felix et al. (2023), Mithos et al. (2019) pour le facteur C ; Mithos et al. (2019) pour le facteur P.

### 3. RESULTAS PRELIMINAIRES SUR LA TELEDETECTION PAR DRONES A MUGOBOKA

#### 3.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe à Mugoboka qui est une zone péri-urbaine à l'Est de la ville de Bujumbura, capitale économique du Burundi. Mugoboka se trouve à l'Est des Quartiers Mutanga Sud et Sororeza mais, contrairement à ces derniers, elle n'est pas viabilisée. Cette zone fait partie de la région naturelle de Mumirwa, avec comme principale caractéristique un relief fortement disséqué par une érosion très active dont les formes les plus remarquables sont le ravinement (Figure 2) et les glissements de terrain. Malgré ces problèmes de stabilité de terrain, cette zone est le théâtre de différentes formes d'activités humaines non contrôlées, en l'occurrence des constructions anarchiques dont certaines à la tête des glissements de terrain (Figure 3), des champs de cultures vivrières (essentiellement le manioc) même sur des pentes supérieures à 45°, des maisons et des pistes de circulation qui se caractérisent par l'absence de système d'évacuation d'eaux, laissant ainsi l'eau abîmer ces pistes en créant des rigoles (Figure 4). Les habitants de Mugoboka sont aussi de catégories variées : jadis presque exclusivement habité par les villageois, actuellement Mugoboka attire de plus en plus des fonctionnaires et des étudiants en quête de parcelles ou de loyers à des coûts abordables.



**Figure 1. Localisation de la zone d'étude (trait orange) sur un fond d'une image Google Earth du 24 janvier 2022.**



*Figure 2. Photos montrant quelques exemples de ravinement à Mugoboka.*



*Figure 3. Photos montrant des constructions érigées à la tête des glissements de terrain à Mugoboka*



**Figure 4. Photo montrant une piste et des parcelles dépourvues de système de canalisation d'eau qui finit par abîmer la piste en créant des rigoles.**

## 3.2. Matériel et méthodes

Notre étude est fondée sur des orthomosaïques et des DTM de qualité. Pour la période allant de mai 2022 à mars 2023, le matériel disponible était constitué de deux drones de marque DJI Mavic 2 Pro pour la prise de photos avec une caméra RVB (Figure 5) et, comme logiciel de traitement photogrammétrique, Agisoft Metashape Professional (<https://www.agisoft.com/>). Cet équipement avait été obtenu dans le cadre d'un projet de recherche financé par l'ARES (Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur de la communauté francophone de Belgique), avec, comme partenaires, l'Université du Burundi, l'Université de Liège et le Musée Royal de l'Afrique Centrale. En mars 2023, un autre drone a été acquis dans le cadre d'un projet de recherche financé par VLIRUOS (Conseil interuniversitaire flamand pour la coopération au développement universitaire). Il s'agit du Mavic 3 Enterprise. Les modules RTK et D-RTK 2 ont été aussi achetés dans le cadre de ce projet pour améliorer la précision (Figure 6). Le module D-RTK 2 permet de pallier l'absence de couverture réseau.

Les photos ont été prises avec recouvrement en variant les angles de la caméra et les directions de vol pour capter les différentes orientations de la pente du terrain. Avec le Mavic 2 Pro, les vols ont été effectués manuellement et horizontalement. Avec le Mavic 3 Enterprise, les vols ont été réalisés en automatique en suivant la variation de l'altitude (mode « Terrain Follow » introduit par le fabricant le 2 mars 2023). Le vol en mode « Terrain Follow » a été réalisé en utilisant comme information topographique le MNT du Burundi de résolution spatiale 10m disponible au Bureau de Centralisation Géomatique (BCG). Pour le traitement photogrammétrique, deux logiciels ont été choisis, en l'occurrence la version gratuite de WebODM et le logiciel commercial Agisoft Metashape Professional. Les orthomosaïques et les MNT ont été par la suite exportés dans le logiciel QGIS pour d'autres traitements, notamment le traçage des profils topographiques.

Des profils topographiques ont été tracés pour vérifier la reproduction des variations topographiques pouvant être visibles ou soupçonnées sur les orthomosaïques. Pour tester la reproduction des ravins, nous nous sommes référés à la classification de Riou (1990) citée dans Sow (2020) qui distingue les rigoles, les ravines et les ravins en fonction de leur profondeur, largeur et longueur, comme indiqué au Tableau 1 :



Figure 5. Présentation du drone DJI Mavic 2 Pro avec sa radiocommande (Source : <https://www.clubic.com/drone/article-877615-1-test-dji-mavic-2-pro-meilleur.html>).



Figure 6. Présentation du drone DJI Mavic 3 Enterprise avec: le module RTK (1), le module D-RTK 2 monté sur sa tige (2) et sur sur un trépied (3) (Source : <https://escadrone.com/produit/dji-mavic-3-enterprise/>)

**Tableau 1. Classification des ravins (Riou (1990) cité dans Sow (2020))**

Classe	Profondeur	Largeur	Longueur
Rigole	Quelques cm à 40 ou 50 cm	Quelques cm à 2 m	Echelles métriques à décamétriques
Ravine	0.5 – 1,5 voire 2 m	5 – 10 m, avec un mini-talweg de 1 à 2 m environ	20 à 100 m ou plus
Ravin	Supérieure à 2 m et jusqu'à 10 m ou plus	10 – 20 m	200 – 1000 m

### 3.3. Résultats

Pour la modélisation de l'érosion, les données pertinentes sont les orthomosaïques et les Modèles Numériques de Terrain (MNT). La Figure 7 montre une orthomosaïque et une coupe topographique obtenues à partir des premières photos prises avec Mavic 2 Pro le 9 juin 2023 et traitées avec la version gratuite du logiciel WebODM. La coupe met en évidence un grand glissement de terrain qui menace une maison érigée à la tête de ce glissement. Cette figure a été présentée comme poster dans la conférence FOSS4G (Free and Open Source Software for Geospatial) du 17 novembre 2022 à Bruxelles.

Avec le Mavic 3 Enterprise, plusieurs vols ont été réalisés et nous montrons ci-après les résultats des traitements photogrammétriques des vols du 3 avril 2023 et 15 décembre 2023 (Figures 8 à 10).

La Fig.8 montre les orthomosaïques des photos prises le 3 avril 2023 et le 15 décembre de la même année à l'aide du Mavic 3 Enterprise et du logiciel Agisoft Metashape Professional pour le traitement photogrammétrique. La Fig.9 montre le DTM correspondant représenté avec un rendu de type « ombrage » dans QGIS pour ressortir les détails topographiques. Les profils topographiques numérotés de 1 à 5 ont été placés aux endroits suspectés d'être affectés par (d'après l'analyse visuelle des orthomosaïques et du MNT) :

- Le ravinement (profil 1)
- Le ravinement et le glissement du terrain (profil 3 et 4)
- La dénivellation entre les talus d'une piste (profil 5).
- Une variation topographique liée au travail agricole et détectée en comparant les orthomosaïques et les DTM d'avril et décembre 2023 (profil 2).

Les profils 1 et 3 à 5 sont représentés à la Figure 10. Avec l'extension « Profile Tool » de QGIS, nous avons trouvé la largeur et la profondeur aux dénivellations correspondant aux ravins/glissements (profils 1, 3 et 4) indiquées au Tableau 2.

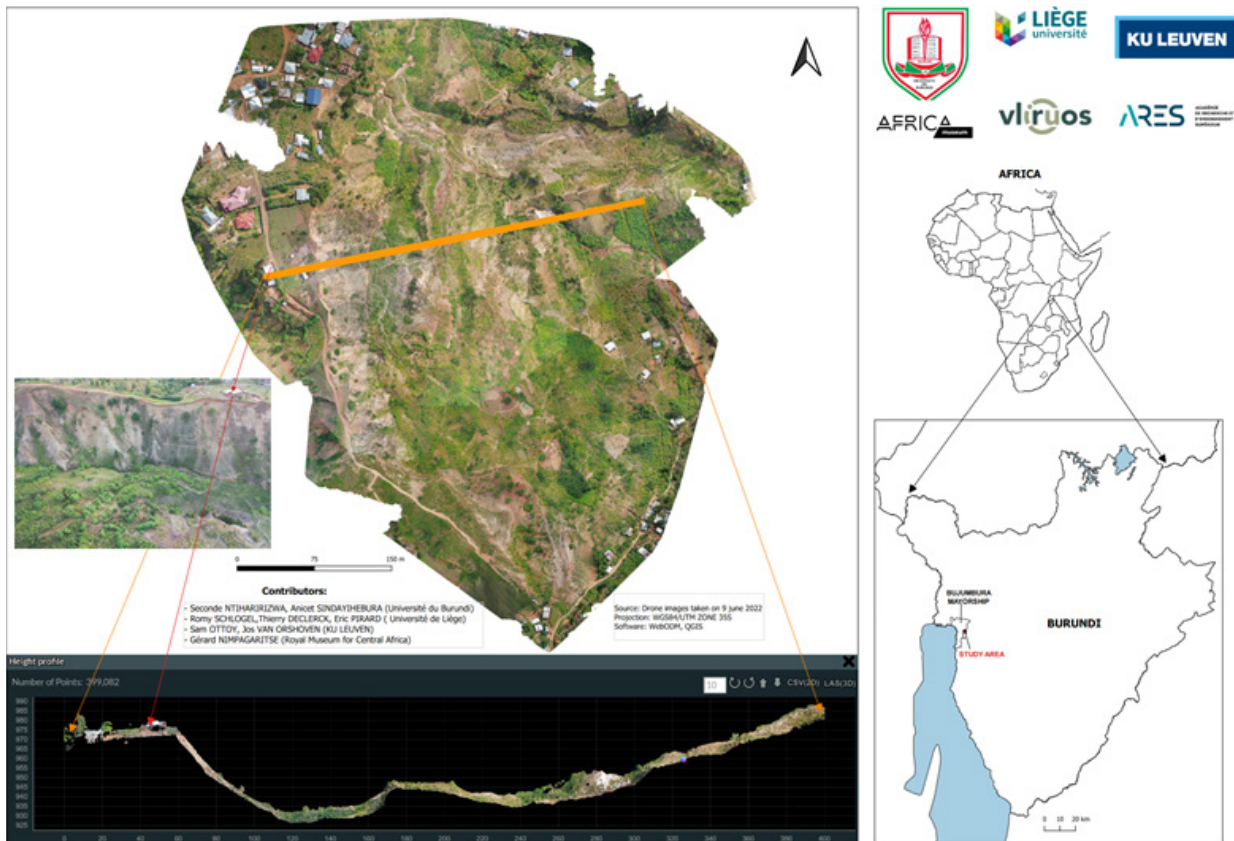
L'analyse détaillée des orthomosaïques et des MNT du 3 avril et du 15 décembre 2023 à l'endroit où nous avons tracé le profil 2 a permis de mettre en évidence un travail du sol en sillons sur l'orthomosaïque et le MNT du 15 décembre 2023 mais qui n'est pas visible sur l'orthomosaïque et le MNT du 3 avril 2023 (Figures 11 et 12). Les creux des sillons correspondent aux bandelettes sombres sur l'extrait du MNT du 15 décembre 2023 (Figure 11) et aux minima sur le profil topographique numéro 2 pour l'extrait du MNT de cette date (Figure 12).

**Tableau 2. Classification des dénivellations correspondant aux profils 1, 3 et 4.**

Profil	Profondeur du ravin/ glissement	Largeur du ravin/ glissement	Classification selon Riou (1990)	Observations
1	1,4 m	8,0 m	Ravine	-
3	9,7 m	36,3 m	-	Il s'agit d'un glissement de terrain
4	8,0 m	40,9 m	-	Il s'agit d'un glissement de terrain séparé en deux en amont par une crête
	8,0 m	45,9 m	-	

## 4. DISCUSSION DES RESULTATS

L'analyse des orthophotos et des MNT obtenus à partir du dispositif constitué d'un drone de marque DJI Mavic 3 Enterprise, de modules RTK et D-RTK 2 a montré que les variations topographiques visibles ou suspectées sur les orthomosaïques sont aussi représentées sur les MNT correspondants. Les largeurs des dénivellations entre les bordures des glissements (profils 3 et 4) dépassent les limites définies dans Riou (1990) et c'est bien normal puisque la classification proposée par cet auteur ne concerne pas les glissements de terrain. Néanmoins, il faut noter que les glissements eux-mêmes sont affectés par le ravinement, notamment le long de leur axe amont-aval, comme le suggèrent le MNT (Figure 9). Le profil topographique à travers la piste (profil 5) suggère des talus sub-verticaux d'une hauteur de 1,0 à 1,2 m, avec un mini-creux au pied de l'un des talus. Il serait intéressant de vérifier sur le terrain si ce mini-creux correspond à de l'érosion en rigoles. La mise en évidence des sillons sur l'orthomosaïque et le MNT du 15 décembre 2023 alors que ceux du 3 avril 2023 ne les montrent pas suggère que le dispositif utilisé peut détecter des changements à court terme (ici 8 mois). Ce changement peut aussi correspondre à la variation des dimensions des ravins en fonction du temps. Néanmoins, les modèles et les interprétations faites ici devraient être vérifiés sur le terrain dans la mesure du possible. Mais en attendant, on peut déjà se réjouir que bon nombre d'observations faites sur les orthomosaïques soient reproduites sur les MNT. En effet, cela contribue à la validation de notre dispositif pour estimer d'autres formes d'érosion, en particulier le ravinement et l'érosion en rigoles. Le coût de l'ensemble des éléments de ce dispositif, y compris la taxe TVA, n'atteint pas 10 000 Euros, ce qui nous amène à considérer que le rapport qualité/prix de ce dispositif est imbattable.



**Figure 7. Poster montrant une vue partielle de Mugoboka avec une photo (à gauche) et une coupe E-W (en bas) montrant un grand glissement de terrain qui menace une maison érigée à la tête du glissement. Le poster a été réalisé en créant une orthomosaïque de photos prises par les deux drones Mavic 2 Pro le 9 juin 2022 et à l'aide de la version gratuite du logiciel WebODM.**

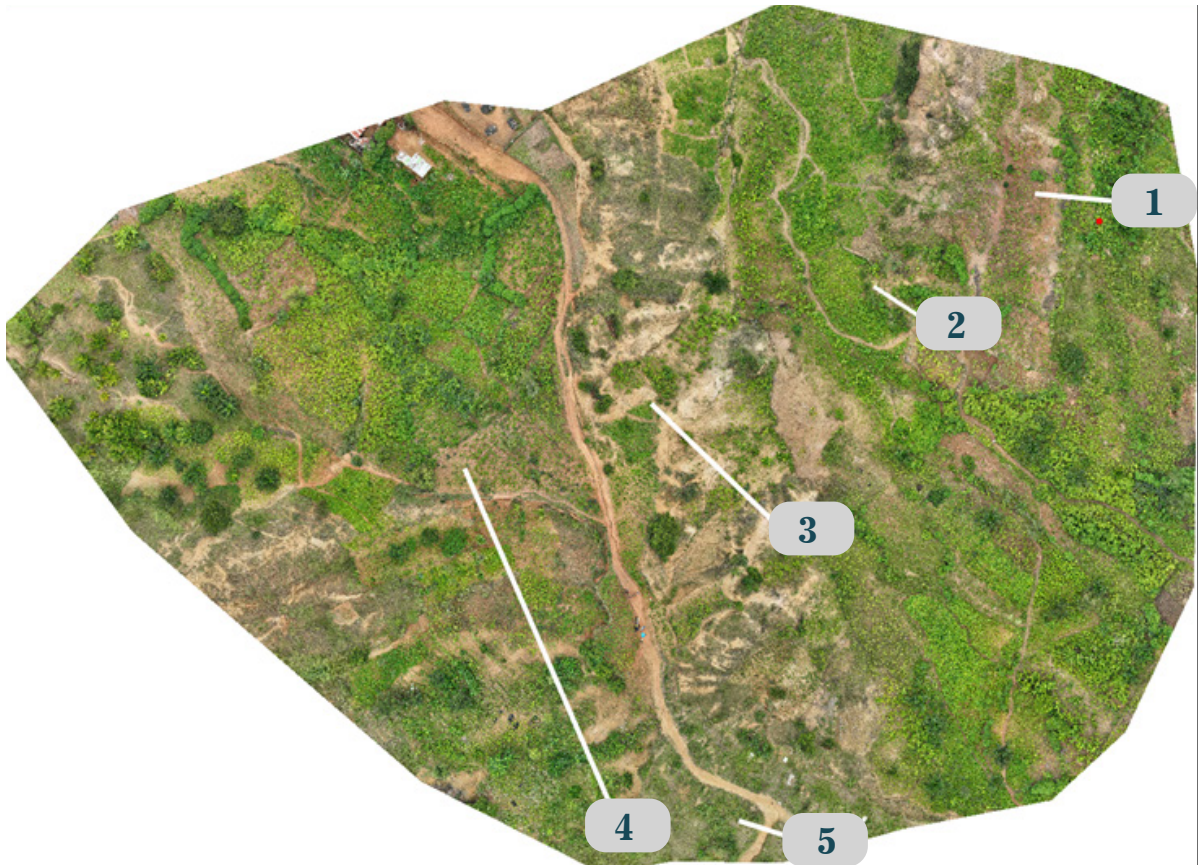


Figure 8. Extrait de l'orthomosaïque créé à partir des photos prises le 3 avril 2023. Les lignes blanches numérotées sont les traces des profils topographiques extraits des DTM.

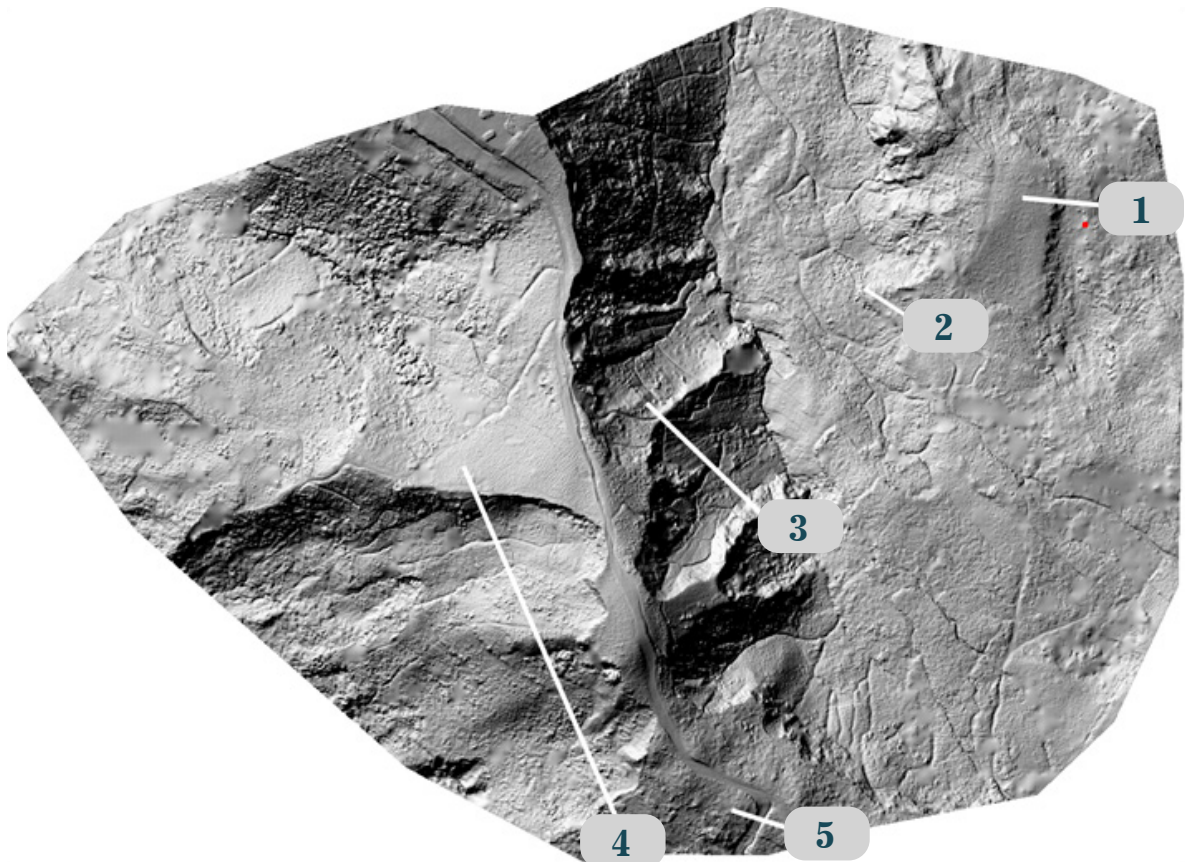


Figure 9. Extrait du DTM réalisé à partir des photos du 3 avril 2023 et présenté avec un rendu de type « ombrage » dans QGIS. Les lignes blanches numérotées sont les traces des profils topographiques.

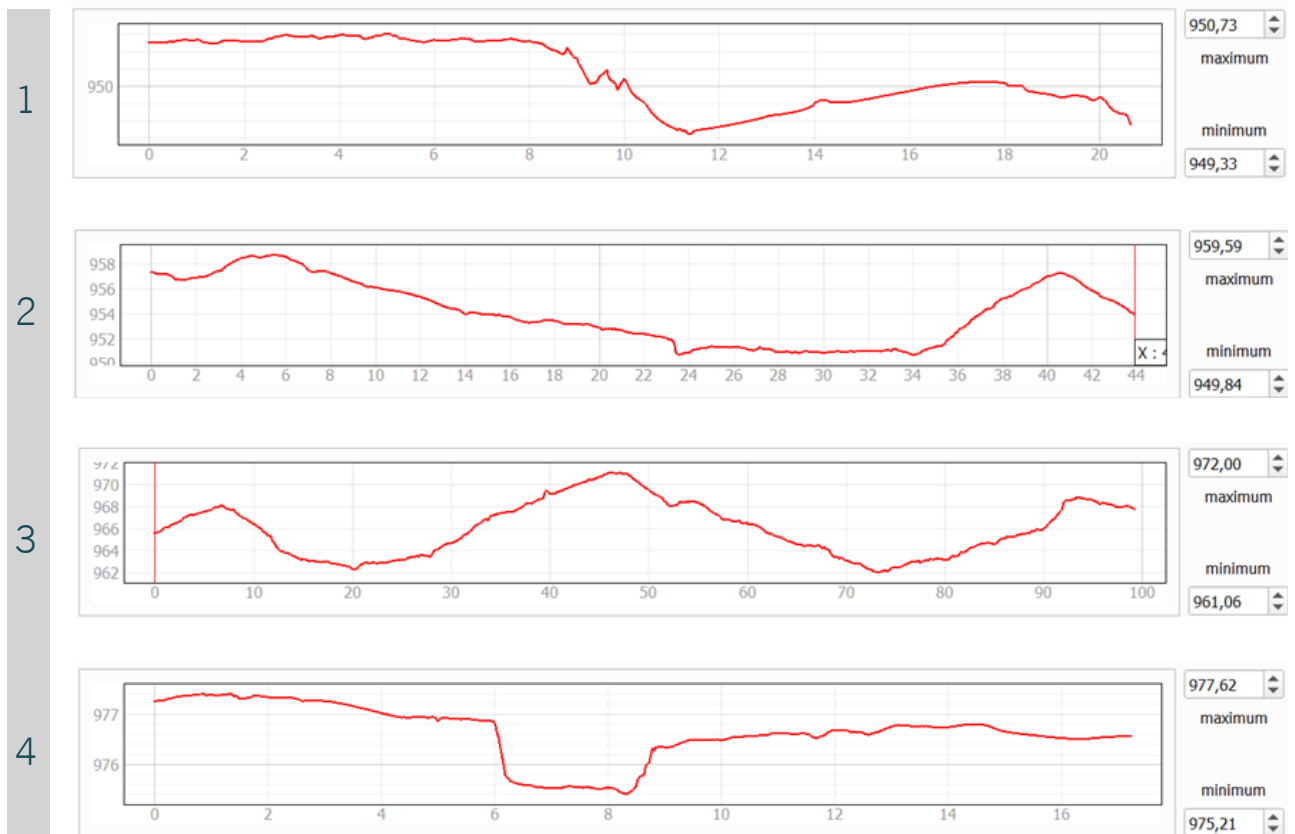


Figure 10. Profils topographiques à travers des endroits suspectés d'être affectés par : le ravinement (1), le ravinement et le glissement de terrain (3 et 4), la dénivellation entre les talus d'une piste (5).

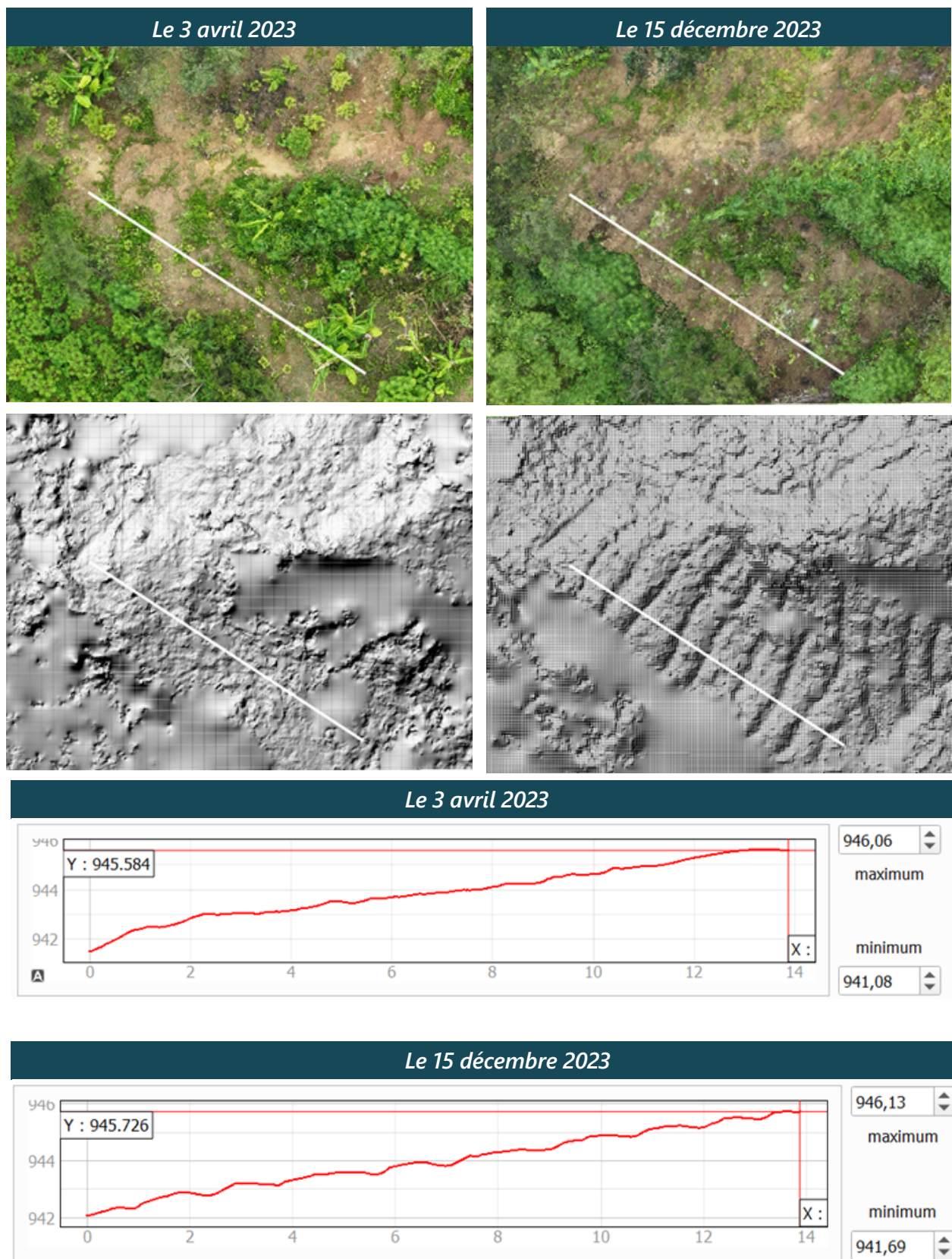


Figure 12. Profil topographique numéro 2 pour le MNT du 3 avril 2023 (en haut) et pour le MNT du 15 décembre 2023 (en bas).

## 5. CONCLUSION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Dans cette étude, un éclairage non exhaustif est donné sur les avancées technologiques en matière d'application de la télédétection par drones à la modélisation de l'érosion. Il ressort de cette étude que la télédétection par drones offre des possibilités bon marché d'amélioration des modèles d'érosion qui devraient donc être exploitées au Burundi. Les résultats sur la zone d'étude dans Mugoboka suggèrent qu'il est possible de modéliser d'autres formes d'érosion comme le ravinement et l'érosion en rigoles avec le dispositif bon marché utilisé dans cette étude. Les résultats et interprétations issus de cette étude devraient être complétés par des travaux de validation sur le terrain et nous comptons bien le faire bientôt après la fin de la saison des pluies. Parallèlement, des modèles de délimitation des ravins et de quantification des terres perdues par ravinement seront testés et comparés. Enfin, nous recommandons aux autres chercheurs et aux partenaires financiers d'initier des recherches sur l'érosion liée à la récolte et celle liée au labour en vue de contribuer à l'étude holistique de l'érosion au Burundi.

### REMERCIEMENTS

Le matériel utilisé dans cette étude a été acquis dans le cadre de deux projets de recherche financés par ARES et VLIR-UOS, respectivement. Il en est de même pour le financement des formations à la télédétection par drones. Les auteurs remercient le Projet IFDC/PAGRIS pour avoir facilité la présentation des résultats de leurs investigations durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Alexiou, S., N. Efthimiou, M. Karamesouti, I. Papanikolaou, E. Psomiadis and N. Charizopoulos. 2023. Measuring annual sedimentation through high accuracy UAV-photogrammetry data and comparison with RUSLE and PESERA erosion models. *Remote Sens.*, 15,1339. <https://doi.org/10.3390/rs15051339>
2. Auerswald, K., G. Gerl and M. Kainz. 2006. Influence of cropping system on harvest erosion under potato. *Soil & Tillage Research*,89, 22–34.
3. Codru, I.C., L. Niacsu, A. Enea and L. Bou-imajjane. 2023. Gully head-cuts inventory and semi-automatic gully extraction using LiDAR and topographic openness—Case Study : Covurlui Plateau, Eastern Romania. *Land*, 12, 1199. <https://doi.org/10.3390/land12061199>.
4. Kuhwald, M., F. Busche, P. Saggau and R. Duttmann. 2022. Is soil loss due to crop harvesting the most disregarded soil erosion process ? A review of harvest erosion. *Soil & Tillage Research*, 215, 105213.
5. Mararakanye, N. and N.S. Nethengwe. 2012. Gully features extraction using remote sensing techniques. *South African Journal of Geomatics*, 1, (2), 109 – 118.
6. Panagos, P., P. Borrelli and J. Poesen. 2019. Soil loss due to crop harvesting in the European Union : A first estimation. *Soil of the Total Environment*, 664, 487 – 498.
7. Rebelo, C. and J. Nascimento. 2021. Measurement of Soil Tillage Using UAV High-Resolution 3D Data. *Remote Sens.*, 13, 4336. <https://doi.org/10.3390/rs13214336>.
8. Renard, K., G. Foster, G. Weesies, D. McCool and D. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water : a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook No. 703*.
9. Riou, G. 1990. L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. Masson, Paris, 221 p.
10. Ruyschaert, G., J. Poesen<sup>1</sup>, K. Auerswald, G. Verstraeten<sup>1</sup> and G. Govers 2007. Soil losses due to potato harvesting at the regional scale in Belgium. *Soil Use and Management*, 23, 156–161.
11. Sow, S.A. (2020). Géomorphologie dynamique : Analyse systémique de la morphodynamique hydrique continentale par ravinement. *European Scientific Journal*, 16, (15), 78 – 98.
12. Vanmaercke, M., P. Panagos, T. Vanwallegem, A. Hayas, S. Foerster, P. Borrelli, M. Rossi, D. Torri, J. Casali, L. Borselli, O. Vigiak, M. Maerker, N. Haregeweyn, S. De Geeter, W. Zgłobicki, C. Bielders, A. Cerda, C. Conoscenti, de Figueiredo and J. Poesen. 2023. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales : A state of the art. *Earth-Science Reviews*, 218, 103637

# Thème 6

## Acquis de la recherche sur l'érosion hydrique dans la région du Kirimiro – Mashitsi

Thédomir Rishirumuhirwa

Agrobiotech. BP 5667 Bujumbura, Burundi : agrobiotec2002@yahoo.fr

### Résumé

L'IRAZ a mené à Mashitsi une étude sur le rôle du bananier en gestion et conservation des sols de 1990-1994. Elle comparait 4 densités de plantation et 3 modes de paillage (paillis complet, en couronne autour des plants et en bande le long des lignes de plantation). Une étude complémentaire a porté sur la restauration des parcelles après 3 années de processus érosifs. Le paillis complet réduit le ruissellement annuel moyen à moins de 1% contre 20% sur la parcelle nue, 4,8 à 6,2% pour le paillis en couronne et 2% pour le paillis en bandes. Les pertes en terres sous paillis complet sont de 30 à 60 kg/ha/an contre 51,3 T/ha/an sur la parcelle nue, 13,9 à 47,7 T/ha/an sous paillis en couronnes et moins de 4 T/ha/an sous paillis en bandes. Quant à la restauration des terres érodées, les résultats montrent une corrélation nette entre l'érosion et les rendements observés avant restauration. La restauration de la fertilité de la parcelle nue est difficile même avec fumier et engrais. Le niveau de réponse des autres parcelles est proportionnel aux pertes en terres cumulées. La parcelle paillée offre de meilleures réponses avec des rendements de plus de 4 tonnes avec fumier et engrais. L'étude de rentabilité des intrants montre que le fumier donne les meilleures rentabilités (valeur V/C de 4) mais les meilleurs résultats sont obtenus par la combinaison fumier – engrais. L'érosion affecte d'autant plus négativement la fertilité que les pertes en terre sont élevées (parcelle nue) et leur restauration est d'autant plus difficiles.

**Mots clés : Kirimiro, bananier, ruissellement, érosion, paillis, restauration, rentabilité.**

## Abstract

The impact of banana farming system (4 plantation densities and 3 mulching methods) on erosion control has been evaluated at the Mashitsi IRAZ research station of Mashitsi. Tested planting densities consisted of 3 to 5 m between rows and 3 m in plantation rows. The mulching methods were: completely mulched plots, mulching along the banana rows and around banana crop. The impact of soil losses on soil fertility has been assessed after 3 years on cumulative erosion process and 3 restoration methods had been tested. Mean annual runoff was reduced to less than 1% under completely mulched plots, to 4,8 – 6,2 under different plots under mulching around banana crops and to 2% under mulching in rows along the plantation rows. Annual soil losses under completely mulched plots varied from 30 to 60 kg against 51,3 T/ha/year on bare plot, 13,9 to 47,7 T/ha/year under mulch around banana crop and less than 4 T/ha/year under mulch in counter rows. A significant correlation between soil losses and maize yields decline has been demonstrated. Restoration of the bare plot is difficult even with manure and mineral fertilizers. The yields on the other plots are cumulative soil losses dependant whereas the completely mulched plot yields up to 4 T of maize. The economic profitability of the fertilizers inputs demonstrated the efficiency of manure with a value/cost ratio of 4. The highest yields were observed with the combination of manure and mineral fertilizers. The impact of erosion on soil fertility decline is cumulative soil losses dependent. Restoration of severely affected plots (bare plot) is highly costly than the best conserved (mulched plot).

**Key words : Kirimiro, runoff, erosion, mulching, fertility, rentability**

## 1. PROBLEMATIQUE

La région du Kirimiro est une des 11 régions naturelles du Burundi. Elle se caractérise par une forte densité de population (plus de 500 habitants/km<sup>2</sup>) et des sols majoritairement ferrallitiques, très acides et très pauvres en nutriments. La très forte densité de population pousse les agriculteurs à surexploiter leurs exploitations conduisant à une minéralisation rapide de leurs horizons humifères avec perte rapide de fertilité par lixiviation et par les eaux de ruissellement. Leur productivité dépend en grande partie aux modes de gestions des résidus organiques et du contrôle de l'érosion.

C'est dans ce contexte qu'il a été mis en place une expérimentation sur le rôle du bananier en gestion et conservation des sols. Le site était situé sur des pentes moyennes (8%). Six parcelles d'érosion ont été installées pour étudier les pertes en terres sous bananeraies plantés à différents écartements. Les observations ont porté sur 3 ans, entre 1991 et 1993. Au bout de cette période, on a déterminé l'arrière effet de l'érosion cumulée sur les rendements du maïs et surtout testé trois modes de restauration de la productivité de ces sols et la rentabilité des intrants utilisés (rentabilité économique).

## 2. CADRE DE L'ETUDE

La station de Mashitsi de l'IRAZ1 est située sur le plateau central du Burundi, en province de Gitega, dans la région naturelle du Kirimiro comprise entre 3°04' à 3°50' latitudes-Sud et 29°37' à 30°08' longitudes-Est (Rufyikiri, 1992), à 1620 m d'altitude (Rishirumuhirwa et al., 1989).

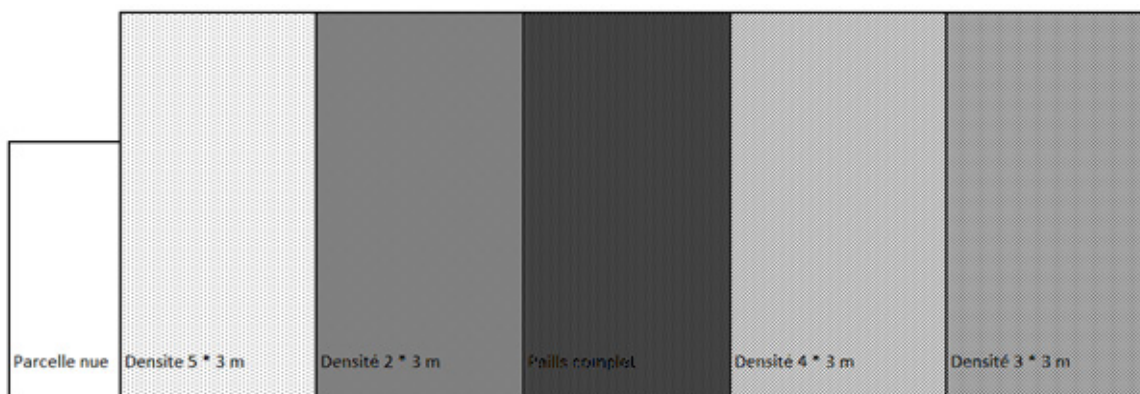
Selon Van der Velpen (1973), le Kirimiro jouit d'un climat de type tropical à 4 mois de saison sèche (Aw4 selon Köppen) avec les précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 1200 mm (ISABU, 1989). La station elle-même se caractérise par de vieux sols ferrallitiques, très acides et très désaturés, à teneur élevée en argile, de type kaolonite, associée à d'importantes quantités d'oxydes de fer et d'alumine. Ils ont été classés comme des hygro-xéro-ferralsol typique suivant la classification INEAC ou comme des Ultic Haplustox selon Soil Taxonomy (Rishirumuhirwa et al., 1989).

## 3. MATERIELS ET METHODES

L'étude a été menée sur des parcelles d'érosion suivant le modèle de Wischmeier (Wischmeier et al, 1978). Elles sont isolées et protégées par un muret en maçonnerie de 30 cm de haut empêchant tout échange de ruissellement ou de terres entre parcelles et champs voisins. Le dispositif expérimental comportait une parcelle de référence ou parcelle de Wischmeier (connu aussi comme le témoin universel), une bananeraie avec paillis complet et 4 parcelles de bananiers plantés en lignes perpendiculaires à la pente, distantes de 2 – 3 – 4 et 5 m. L'écartement entre bananiers est de 3 m dans les lignes, soit des densités respectivement de 1667, 1111, 833 et 666 plans/ha.

La parcelle de référence de Wischmeier (témoin universel) avait 100 m<sup>2</sup> (5 x 20 m) et les parcelles des différents traitements avec bananiers de 450 m<sup>2</sup> (15 x 30 m). C'est une taille moyenne d'une bananeraie traditionnelle comme on en rencontre dans les petites exploitations au Burundi. Le témoin universel est une parcelle qui ne porte aucune culture et qui est maintenue nue (on arrache toute repousse d'herbe). Quant à la parcelle sous paillis complet, elle porte une bananeraie de densité 3 m \* 3 m.

La disposition des différents traitements est donnée à la Figure 1.



**Figure 1. Dispositif des différents traitements**

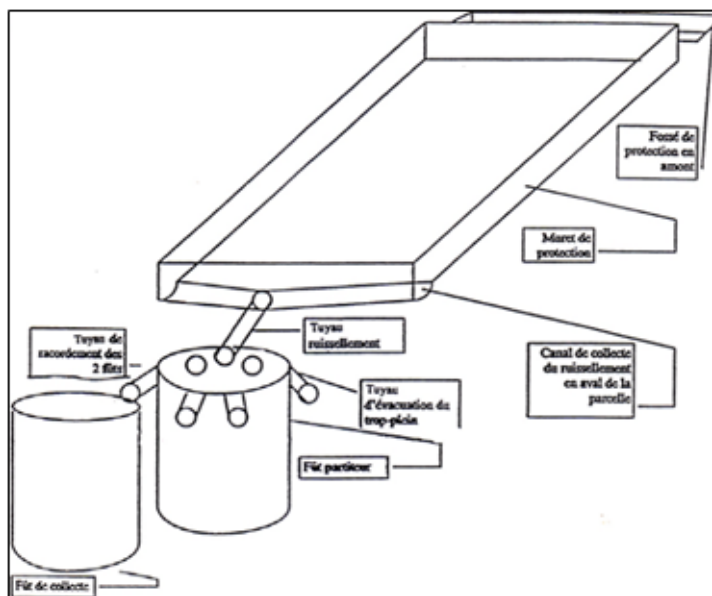
Chaque parcelle est munie d'un système de collecte du ruissellement et des terres érodées constitué d'un fût partiteur de 200 l. La photo ci-après donne une vue des parcelles et de la partie aval du système de collecte de l'érosion et du ruissellement.



**Figure 2. Photo de vue d'ensemble du dispositif des parcelles**

Ce fût est muni de 5 ouvertures dont l'une est reliée à un deuxième fût de même volume. Tous les deux fermés par un couvercle amovible comme le montre le schéma ci-après.

En amont, les parcelles sont protégées par un fossé de 1,5 m de profondeur et de 1,5 m de largeur. La Figure 3 donne le schéma type d'une parcelle d'érosion du modèle utilisé à la station expérimentale de Mashitsi dans le Kirimiro.



**Figure 3. Schéma d'une parcelle d'érosion**

La culture retenue pour les essais est le bananier qui est une des cultures principales des systèmes culturaux burundais sur le plan économique et nutritionnel mais également connue comme grande productrice de biomasse dans les exploitations.

Les 3 modes de gestion des résidus des bananiers étudiés sont :

- Paillis complet ;
- Paillis en couronnes autour des souches de bananiers (1990);
- Paillis en bandes le long des lignes de plantation perpendiculairement à la pente (année 1991).



**Figure 3. Photo de la gestion des feuilles de bananier**

Après trois campagnes de mesures, on a évalué le niveau de productivité des différentes parcelles au regard des pertes en terres cumulées. Le maïs a été utilisé pour étudier les rendements et tester les 3 méthodes de restauration :

- Fumier de ferme (apport de 6 t/ha exprimés en MS, soit l'équivalent de 20 T/ha) ;
- Fumier avec engrais NPK (apport de 6t/ha de fumier de MS avec NPK à la dose de N60 P60 K40 ;
- Fumier avec engrais NPK complété par une dose de 500 Kg /ha de chaulage.

Les 3 méthodes ont aussi fait l'objet d'une étude rentabilité économique des intrants utilisés par comparaison de leurs coûts au regard de la valeur monétaire de la production de maïs (indice V/C de calcul du rapport sur investissement).

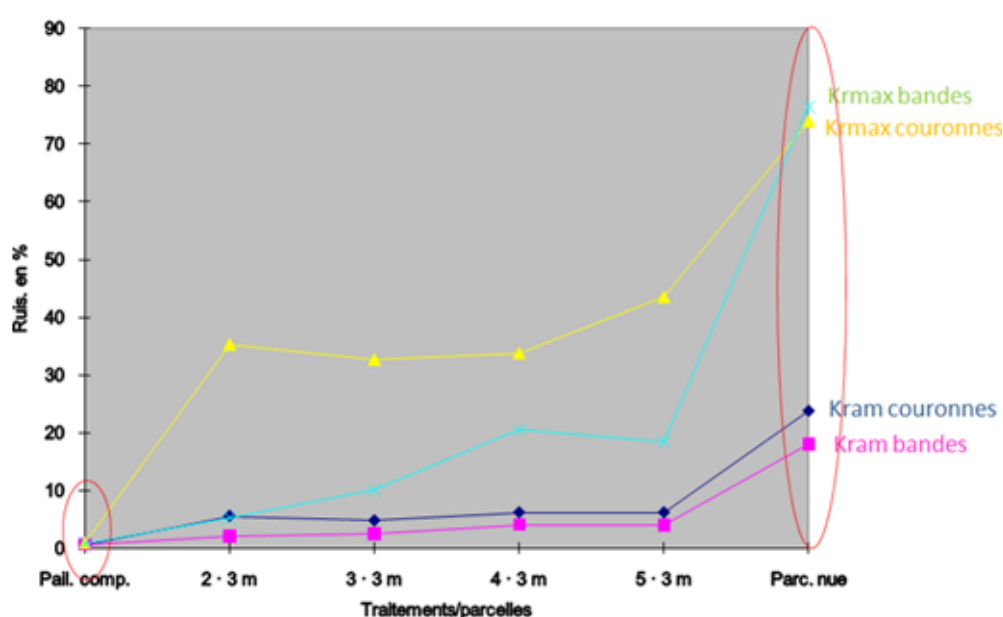
## 4. RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. Ruissellement, densité de plantation et mode de paillis.

Les mesures du ruissellement sont faites tous les jours et portent sur :

- Le ruissellement journalier  $K_r$  (quantité d'eau dans le système de collecte sur la hauteur des précipitations enregistrées en 24 h) ;
- Le  $K_{ram}$  ou ruissellement annuel moyen qui est la somme des  $K_r$  de l'année comparée à la somme des précipitations ;
- Le  $K_{rmax}$  ou ruissellement maximal enregistré en 24 h au cours de l'année.

L'année 1990 correspond au mode de paillis en couronne et 1991 au paillis en bandes. La Figure 4 illustre les résultats obtenus.



**Figure 4.  $K_{ram}$  et  $K_{rmax}$  sur parcelle nue, sous paillis complet, sous paillis en bandes et en couronne**

Ces résultats montrent que le paillis complet assure une excellente maîtrise du ruissellement. En effet, le  $K_{ram}$  est de 0,7% et le  $K_{rmax}$  ne dépasse guère 1%. La quasi-totalité des précipitations de l'année s'infiltrent et contribuent à la reconstitution des réserves hydriques du sol.

La parcelle nue, par contre, donne les valeurs de ruissellement les plus élevées avec un  $K_{ram}$  de 23,8% et un  $K_{rmax}$  de 74%.

Le paillage en bandes contrôle mieux le ruissellement que le paillage en couronne. Ses  $K_{ram}$  varient de 2,1 à 4,1% et ses  $K_{rmax}$  de 5,3 à 20,5% alors que des valeurs du paillage en couronnes sont nettement plus élevées ( $K_{ram}$  : 4,8 à 6,2% et  $K_{rmax}$  de 32,7 à 43,5%).

L'efficacité du paillis augmente avec les densités de plantation mais surtout avec le paillage en bandes qui jouent le rôle de barrières à l'écoulement des eaux de surface à l'intérieur des parcelles.

Ceci est confirmé par les observations sur les parcelles après de fortes averses. Avec le paillis en couronne, le ruissellement crée des rigoles continues entre les lignes de bananiers de l'amont à l'aval de chaque parcelle. Avec le paillis en bandes, par contre, elles sont arrêtées au niveau de chaque bande qui se comporte comme une zone d'absorption du ruissellement et de dépôt des sédiments.

Ces résultats confirment ceux obtenus dans d'autres conditions expérimentales au Burundi et en Afrique de l'Ouest. A Kanyosha, sur une pente de 45%, DUchaufour et al. (1992) ont trouvé des ruissellements moyens

annuels qui varient de 3,9 à 6,7 % pour des bandes de caféiers paillés tous les 10 m, des haies de *Setaria* et de *Calliandra* et des combinaisons de ces dispositifs.

Ndayizigiye (1993) a montré que les haies de *Calliandra*, de *Leucaena* et de mixtes (*Calliandra* + *Setaria*) réduisent le ruissellement à 1,8 % sur une pente de 23% mais seulement après deux ans. Les résidus des bananiers disposés en bandes aboutissent au même résultat dès la première année.

## 4.2. Pertes en terre cumulées sur 3 ans

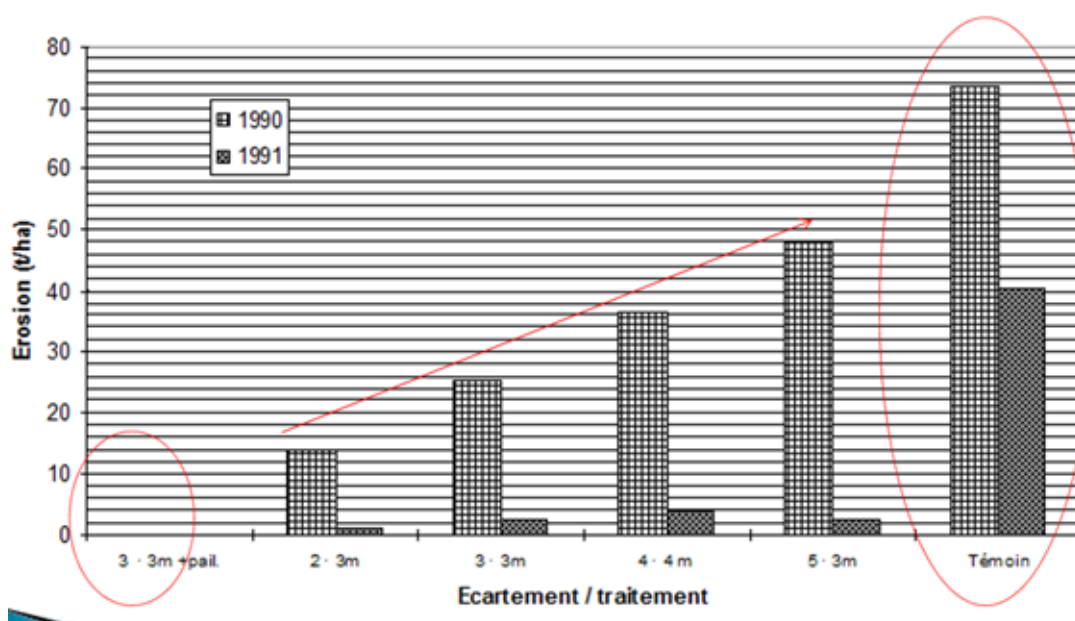
- a) Le tableau 1 donne les pertes en terres cumulées en t/ha observées sur les différents traitements au cours des 3 années de mesures.

**Tableau 1. Pertes en terre cumulées en t/ha observées durant 3 ans sous les différents traitements**

Traitement	Année I (référence)	année II (paillis en couronne)	année III (paillis en bandes)	Total 3 ans
Parcelle 3 m x 3 m + paillis complet	0,05	0,03	0,06	<b>0,14</b>
Parcelle 2 m x 3 m (1667 plants/ha)	2,5	13,9	1,1	<b>16,8</b>
Parcelle 3 m x 3 m (1111 plants/ha)	4,4	25,4	2,4	<b>32,2</b>
Parcelle 5 m x 3 m (667 plants/ha)	7,6	47,7	2,5	<b>57,8</b>
Parcelle nue (de Wischmeier)	40,1	73,3	40,5	<b>153,9</b>

Ce tableau montre des pertes de 153,9 T/ha/3 ans sur la parcelle nue et moins de 150 kg sous paillis complet durant la même période. Les pertes en terre augmentent avec les écartements sous bananeraies. L'efficacité du paillis complet a été confirmée par d'autres auteurs, notamment Roose (1977) ; Lal (1979) ; Duchaufour et al. (1992) qui ont montré que l'indice cultural du paillis est de l'ordre de 0,001.

La comparaison entre les pertes en terres sous paillis complet, paillage en couronnes (1990) et en bandes (1991) est illustrée par la Figure 5. Le paillage en bandes réduit considérablement les pertes en terres en dessous de 3,7 T/ha quel soit la densité de plantation contre 14 T/ha et 47,7 T/ha pour le paillis en couronne pour des écartements de 2 à 5 m entre lignes de bananiers.



**Figure 5. Densité de plantation des bananiers et érosion en T/ha sur parcelle nue, sous paillis complet, paillis en couronnes (1990) et en bandes (1991)**

L'efficacité des bandes de paillis est comparable au ruissellement et aux pertes en terres observés avec les haies vives. Ceci est confirmé par Ndayizigiye (1993) qui a enregistré des pertes en terres comparables à Rubona avec des haies de Calliandra et de Leucaena deux années après leur installation. On obtient le même résultat dès la première année avec les bandes de paillis sous bananeraies. Le bananier atteint les mêmes résultats plus rapidement grâce à sa capacité de production de biomasse (résidus) directement utilisable comme paillis.

### 4.3. Arrière effet de l'érosion sur les rendements en maïs grain.

On peut étudier l'effet de l'érosion sur la productivité des terres en procédant au décapage l'horizon de surface de x cm suivant les pertes en terres ciblées (+/- 150 T correspondent à 1 cm de terres décapées). On y installe alors une culture dont on mesure les rendements.

L'autre approche est de déterminer le niveau de fertilité résiduelle des parcelles d'érosion à la suite d'un processus érosif sur x années. L'arrière effet des pertes en terres sera donné par les rendements obtenus sur les témoins sans apport de fertilisants et amendements.

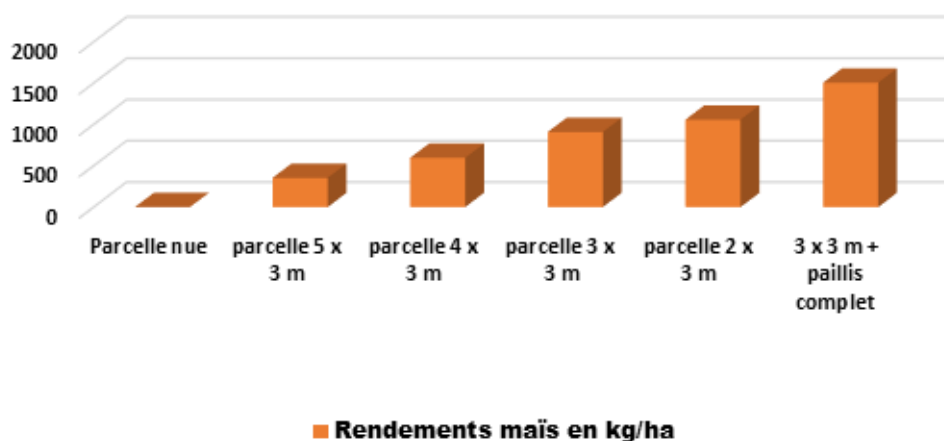
C'est cette dernière approche qui a été utilisée à Mashitsi. On a étudié les rendements en utilisant le maïs grain (variétés Bambou) comme culture test. Après 3 années d'érosion cumulée, on a installé une culture de maïs et on a déterminé la productivité des différentes parcelles (traitements) sans fertilisants. Les rendements observés étaient comparés aux pertes en terres cumulées des 3 années de mesures.

Les résultats obtenus sur les différents traitements (rendements du maïs) en l'absence d'apport de fertilisants sont donnés dans le tableau 6.

**Tableau 2. Rendements du maïs sans fertilisants des différents traitements après 3 années d'érosion.**

Traitement	Erosion cumulée	Rendements maïs en kg/ha
Parcelle nue	153,9	0
Parcelle 5 x 3 m	57,8	353
Parcelle 4 x 3 m	53,9	597
Parcelle 3 x 3 m	32,2	909
Parcelle 2 x 3 m	16,8	1058
3 x 3 m + paillis complet	0,14	1506

Ce tableau montre que la production en maïs est fortement corrélée avec les pertes en terres. Cependant, cette conclusion doit être assortie de quelques réserves. La fertilité initiale du sol étudié (sol ferrallitique très acide et très désaturé) est déjà médiocre comme cela a pu être démontré à Mashitsi sur haricot, maïs et manioc (Rishirumuhirwa, 1997). Les résultats obtenus sont aussi mis en évidence par la figure suivante.



**Figure 6. Arrière effet des pertes en terres sur les rendements du maïs des différents traitements**

Ils montrent clairement que les sols tropicaux à fertilité marginale, cas des sols ferrallitiques qui représentent plus de 80% des sols burundais, perdent rapidement leur fertilité s'ils sont exposés à l'érosion, d'où l'intérêt et la justification de la lutte antiérosive dans ces sols pauvres.

On sait que l'érosion hydrique emporte les éléments les plus fins du sol (argile et humus) des premiers cm du profil qui sont les principaux facteurs de fertilité des sols ferrallitiques des tropiques humides.

Certains sols très profonds et riches en matière organiques et en nutriments peuvent perdre plusieurs cm de terres sans pour autant accuser des baisses de rendements. C'est le cas des chernozem des plaines russes et ukrainiennes. On doit donc considérer non seulement les quantités de terres perdues mais également les propriétés du sol et sa fertilité initiale intrinsèque.

## 4.4. Restauration des terres érodées

Après l'évaluation de l'arrière effet, on a cherché à restaurer ces terres érodées par 3 méthodes de restauration d'intensification croissante :

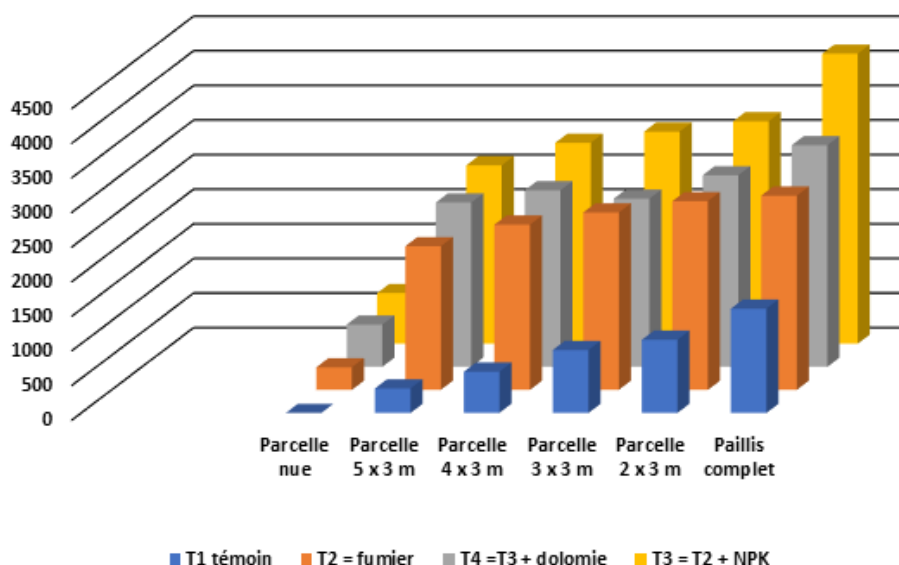
- Témoin sans fertilisants ni amendements ;
- Apport de fumier de ferme à raison de 6 tonnes (matière sèche) par hectare ;
- Fumier de ferme complété par engrais NPK aux doses respectives de 60-60-40 unités fertilisantes ;
- Fumier de ferme avec engrais NPK et chaulage (500 kg de dolomie/ha) ;

Chaque parcelle d'érosion a été aménagée en 4 sous-parcelles recevant de manière aléatoire un des 4 traitements. Les observations ont porté sur les rendements en maïs grain (en kg/ha) et sur le coût et la rentabilité économique de chaque méthode. Les rendements grains du maïs obtenus pour les différents traitements après 3 années de pertes en terre sont donnés dans le tableau 3.

**Tableau 3. Réponse du maïs à 3 méthodes de restauration des terres érodées**

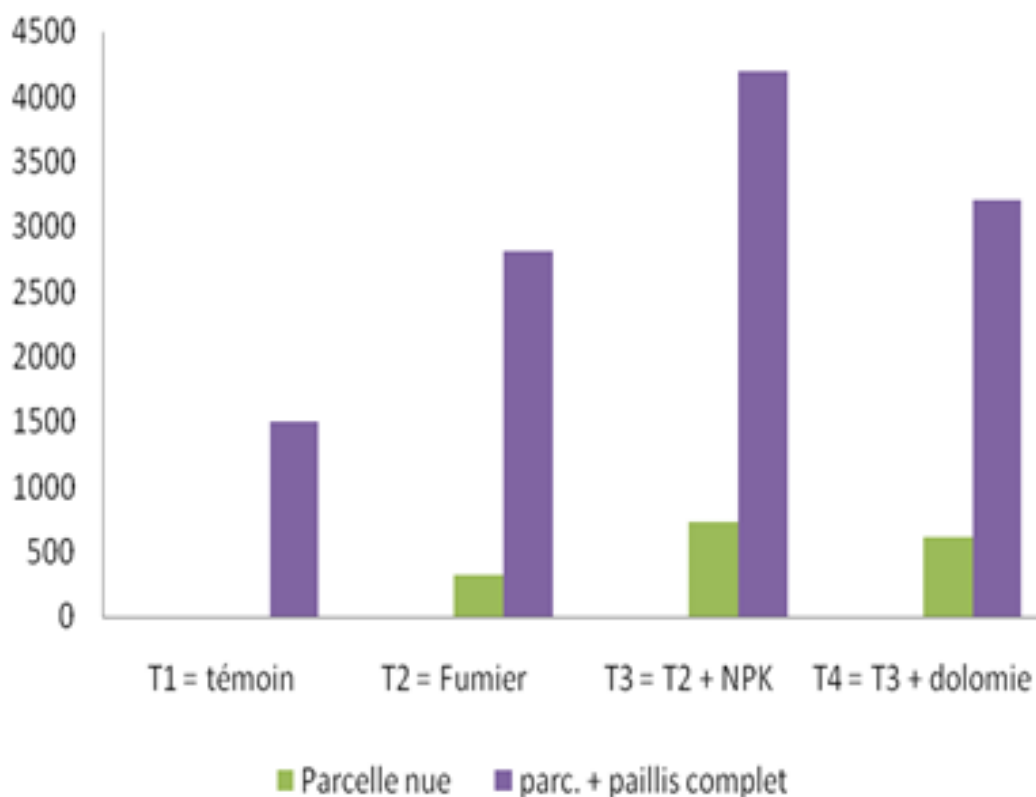
Traitement	Erosion	T1 (témoin)	T2 = fumier	T3 = T2 + NPK	T4 = T3 + dolomie
Parcelle nue	153,9	0	326	732	610
Parcelle 5 x 3 m	57,8	353	2075	2577	2374
Parcelle 4 x 3 m	53,9	597	2387	2903	2550
Parcelle 3 x 3 m	32,2	909	2563	3065	2428
Parcelle 2 x 3 m	16,8	1058	2726	3215	2767
Paillis complet	0,14	1506	2806	4191	3201

Le graphique ci-après illustre aussi ces résultats.



**Figure 7. Réponse du maïs à 3 méthodes de restauration des terres érodées des différents traitements**

Ces résultats montrent que l'apport de fumier de ferme permet de relever la fertilité des terres à des niveaux acceptables. La combinaison fumier et engrais NPK permet d'améliorer les rendements de manière significative. L'apport de dolomie, par contre, se révèle moins productif que le T3 (fumier + engrais). Il est intéressant de comparer les cas extrêmes, à savoir les terres les plus érodées (parcelle nue) et les terres les mieux conservées (paillis complet). Cette comparaison est illustrée à la figure suivante.



**Figure 8 : Réponse des rendements du maïs aux 3 méthodes de fertilisation des terres très érodées (parcelle nue) et bien conservées (paillis complet).**

La figure 8 permet de conclure que les parcelles très érodées répondent mal à la restauration même avec des moyens importants. Les rendements obtenus sur la parcelle nue (pertes cumulées de 158,9 t/ha en 3 ans), sont nuls en l'absence de fumier et restent médiocres même en présence de fumier (326 kg/ha) et de NPK (732 kg/ha). Les parcelles les mieux conservées (parcelle sous paillis complet) répondent très bien à la restauration. On passe de 1506 kg à 2806 et 4191 kg/ha respectivement sans fumure, avec fumure organique et avec fumier + NPK.

Les engrais minéraux renforcent l'effet du fumier de ferme et induisent un accroissement important des rendements. L'apport de dolomie semble avoir un effet dépressif moins marqué dans les sols les mieux conservés. Dans les cas intermédiaires représentés par les parcelles à bananeraies avec différentes densités de plantation, les réponses aux méthodes d'intensification sont dépendantes des pertes en terres cumulées observées mais restent inférieures au traitement avec paillis complet. Ici aussi, l'importance du fumier est mise en évidence et un complément d'NPK induit des accroissements de rendements intéressants. L'effet dépressif de la dolomie est ici aussi confirmé. L'érosion en nappe semble donc avoir entraîné une baisse de productivité d'autant plus importante qu'elle est plus élevée.

Il est donc important de bien conserver les sols contre l'érosion, surtout les plus fragiles et les moins fertiles. Leur érosion affecte prioritairement l'argile et les complexes argilo-humiques qui sont les sièges de leur fertilité.

L'effet dépressif du chaulage a été attribué à un déséquilibre cationique dû à un apport excessif en Ca et Mg pouvant être à l'origine de blocage ou immobilisation de certains éléments comme le phosphore et les oligo-éléments, la sélectivité de l'échange ionique favorisant les bivalents Ca et Mg au détriment notamment de K qui passerait en solution et aurait tendance à être lixivié (Homes et Van Schoor, 1969).

## 4.5. Coût de la restauration des terres érodées

Le coût et la rentabilité des méthodes de restauration utilisées a été estimé en comparant les coûts des intrants et les plus-values qu'ils génèrent en termes de revenus. Les éléments utilisés pour ces estimations sont basés sur les prix suivants :

- Prix du fumier = 200.000 BIF/T de frais ;
- Prix des engrais = 240.000 BIF/200 kg d'engrais équivalent à la dose NPK 60-60-40 ;
- Prix de la dolomie = 5000 BIF par sac de 50 kg, soit 50.000 BIF pour 500 kg ;
- Prix de vente du maïs grain = 1700 BIF/kg.

Les résultats sont présentés dans le tableau 5.

**Tableau 5. Coût et rentabilité des méthodes de restauration à Mashitsi.**

Méthode	Traitement	Rdt	Coût intrants C	Valeur-récolte (V)	Rapport V/C
<b>Fumier</b>	Parcelle nue	326	1000000	554200	0,6
	Parc. 5 x 3 m	2075	1000000	3527500	3,5
	Parc. 4 x 3 m	2387	1000000	4057900	4,1
	Parc. 3 x 3 m	2563	1000000	4357100	4,4
	Parc. 2 x 3 m	2726	1000000	4634200	4,6
	Parc. + paillis	2806	1000000	4770200	4,8
<b>Fumier + NPK</b>	Parcelle nue	732	1240000	1244400	1,0
	Parc. 5 x 3 m	2577	1240000	4380900	3,5
	Parc. 5 x 3 m	2577	1240000	4380900	3,5
	Parc. 4 x 3 m	2903	1240000	4935100	4,0
	Parc. 3 x 3 m	3065	1240000	5210500	4,2
	Parc. 2 x 3 m	3215	1240000	5465500	4,4
	Parc. + paillis	4191	1240000	7124700	5,7
<b>Fumier + NPK+ Dolomie</b>	Parcelle nue	610	1290000	1037000	0,8
	Parc. 5 x 3 m	2374	1290000	4035800	3,1
	Parc. 4 x 3 m	2550	1290000	4335000	3,4
	Parc. 3 x 3 m	2428	1290000	4127600	3,2
	Parc. 2 x 3 m	2767	1290000	4703900	3,6
	Parc. + paillis	3201	1290000	5441700	4,2

Le tableau 5 montre que le maïs répond bien à la restauration (valeur V/C variant de 3,5 à 4,8) sauf pour la parcelle nue (V/C=0,6). Cette rentabilité est renforcée par la combinaison fumier + NPK, ici encore à l'exception de la parcelle nue.

L'ancienne parcelle nue ne répond à aucune méthode de restauration, son V/C reste toujours égal ou inférieur à 1. Il vaut donc mieux protéger les sols peu fertiles contre les pertes en terres au risque de les rendre improductifs pour longtemps même avec des efforts importants de restauration. La parcelle paillée par contre rentabilise bien les intrants avec des V/C toujours supérieurs à 4 (un franc investi rapporte plus de 4 francs). La norme généralement admise pour qu'une fumure soit considérée comme rentable est un rapport V/C (valeur/coût) supérieure à 2. La combinaison fumier engrais donne les meilleurs rendements et les meilleurs V/C. Comme indiqué plus hauts, les rendements avec la dolomie sont toujours inférieurs à ceux obtenus avec le fumier et engrais NPK. Il en va de même pour les indices de rentabilité qui suivent les mêmes tendances.

## 5. ETUDES COMPLEMENTAIRES

En marge des études sur le ruissellement, l'érosion et la restauration des terres érodées, on a procédé au calcul de l'érosivité climatique à partir des données pluviométriques et pluviographiques des principales stations climatologiques de l'IGEBU (Kirundo, Muyinga, Gitega, Mahwa, Gisozi, Tora, Teza, Moso, Bujumbura – aéroport et Bujumbura - Collège du St Esprit). On a ainsi produit une carte ci-après d'érosivité pour le Burundi (Figure 9).

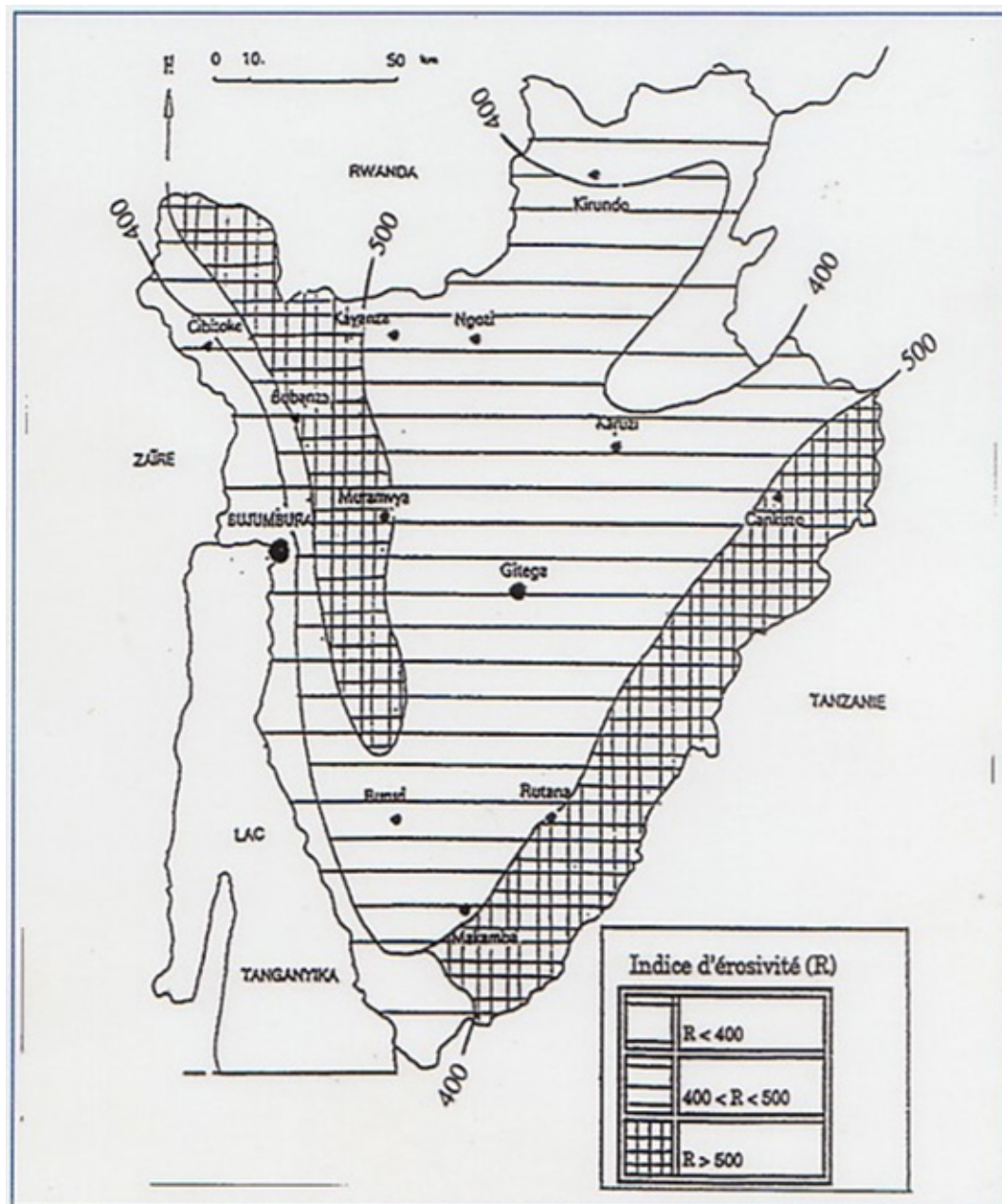


Figure 9 : Carte d'érosivité climatique du Burundi

Il ressort de cette carte que les climats les moins érosifs se rencontrent dans la plaine de l'Imbo et les dépressions du Nord-Est avec un indice R inférieur à 400, alors que les plus érosifs sont observés où R est supérieur à 500.

D'autres études ont été menées notamment sur les techniques de fertilisation des sols très dégradés de Mashitsi (amendements et engrais NPK seuls ou en combinaisons) et sur la production de biomasse dans les exploitations traditionnelles par intensification (fumier + NPK) et diversification (haies vives + agroforesterie) dans une approche d'optimisation de gestion des ressources en eau et de conservation des sols. Ces études ont fait l'objet de publications du même auteur.

## 6. CONCLUSIONS

L'étude de l'érosion à la station de Mashitsi sur un sol très pauvre met en évidence son extrême fragilité même sur des pentes modérées, de l'ordre de 8%, tant en terme de ruissellement que de pertes en terres. Il apparaît également que la gestion de la biomasse est l'une des clés de la maîtrise de l'eau et du maintien de la productivité des terres.

Une parcelle nue non protégée est particulièrement vulnérable. Elle enregistre des valeurs élevées de ruissellement (maximal et moyen) alors que sous paillis complet elles ne dépassent guère 1%. Il en va de même des pertes en terres où la parcelle nue perd plus de 1000 fois de terres que la parcelle sous paillis complet (153,8 T contre 140 kg en 3 ans).

L'autre enseignement de cette étude est la mise en évidence de l'importance du mode de gestion des résidus en conservation des sols. A cet égard, il s'est avéré que le paillage en bandes perpendiculaires à la pente par les résidus produits par les bananeraies est de loin plus efficace que la disposition de ces mêmes résidus en couronne autour des pieds de bananiers. On passe progressivement de moins de 4 T/ha/3 ans à plus de 50 T/ha/3 ans pour des mêmes densités de plantation.

Il devient donc possible de ramener les pertes en terre en dessous du seuil de tolérance que Wischmeier et al. (1978) estiment à 12,7 T/ha/an mais qu'il est plus réaliste de ramener à moins de 2 T/ha/an pour des sols très pauvres dont la fertilité est limitée aux premiers cm enrichis en matière organique (Rishirumuhirwa, 1997).

L'étude a permis aussi de mettre en évidence le fait que la restauration des terres très érodées est difficile même avec des moyens importants. En effet, la parcelle nue qui a perdu 153,8 T en 3 ans montre des réponses médiocres aux méthodes de restauration de plus en plus intensives alors que la parcelle sous paillis complet (perte de 140 kg en 3 ans) affiche des rendements de plus en plus élevés.

Ici aussi, il apparaît que la fumure organique est la clé de la restauration. Son action est amplifiée par l'application d'engrais NPK. Le chaulage par contre se montre peu efficace.

Sur le plan économique la restauration par le fumier seul est efficace. Elle permet de multiplier les rendements par 4 et affiche les meilleurs rapports V/C. Les rendements augmentent avec l'apport de NPK mais les valeurs V/C sont inférieures à celles du fumier seul.

Dans le même ordre d'idée et compte tenu de l'importance de la fumure organique dans la restauration de ces sols très dégradés, Rishirumuhirwa (1997) propose d'optimiser la production de biomasse : (1) par la promotion de l'élevage en stabulation permanente produisant jusqu'à 10 tonnes par vache adulte et (2) par la diversification des productions combinant les cultures saisonnières, les pâturages, les boisements traditionnels et l'agroforesterie.

Ces stratégies auront, en outre, comme impact à moyen terme un passage progressif d'une agriculture de subsistance à une agriculture de marché en vue d'un développement durable de ces régions très densément peuplées du Burundi.

## Remerciements

L'auteur remercie le Projet IFDC/PAGRIS pour avoir facilité la présentation de ses résultats de recherche durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Duchaufour, H., M. Bizimana et C. Mikokoro. 1992. Les acquits de la recherche à l'ISABU en matière de protection et de restauration. Séminaire sur l'érosion des sols au Burundi. 24 p.
2. Gacyubwenge, E. et J. Karikuru. 1992. Evaluation de l'indice d'agressivité climatique de l'équation de Wischmeier dans les régions de Mosso et du Bweru », Université du Burundi, Institut Supérieur d'Agriculture.
3. Homes, M.V. et G.H. Van Schoor, G.H. 1969. La nutrition minérale des végétaux. Masson et Cie, Editeurs, Paris Vle, 162 p.
4. ISABU, 1989. Diagnostic de la région naturelle du Kirimiro, 198 p.
5. Kayoya, P.C. 1990. Evaluation de l'indice d'agressivité climatiques sur le plateau central du Burundi : région de Kirimiro.
6. Ndayizigiyz, F., 1993. Effets des haies vives arbustives sur l'érosion et la fertilité des terres sur fortes pentes de montagnes tropicales au Rwanda. Bull. Erosion n° 14, Montpellier. 243 – 248.
7. Rishirumuhirwa, T. et al., 1989. Etude pédologique de 8 sites repères pour les essais engrais au sein de la CEPGL (Moso, Mashitsi, Rubona, Karama, Yangambi, Mulungu, Gandajika, M'Vuazi). Pub. IRAZ, 78 p.
8. Rishirumuhirwa, T. 1992. Effet de la fumure organique et du chaulage sur les rendements du haricot, du maïs et du manioc à la station expérimentale de Mashitsi. Communication à l'atelier IBSRAM sur la gestion des sols acides, Bujumbura.
9. Rishirumuhirwa, T. 1996. The contribution of banana farming systems in sustainable land use in Burundi. 9th ISCO Conference, Bonn. Germany.
10. Rishirumuhirwa, T. 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro – Burundi). Thèse doctorat EPFL, 223 p.
11. Roose, E., 1993. Agroforestry, water and soil fertility management in african tropical mountains. Inter. Workshop on "Soil erosion processes on steep lands". Merinda, Venezuela. 28 p.
12. Roose, E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bull FAO des sols n° 70, 420 p.
13. Roose, E., R. Bellefontaine et M. Visser. 2011. Six rules for rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 cases studies in tropical and Mediterranean climates. Sécheresse, 22, 2: 86-96.
14. Roose, E. et J. Godefroy. 1977. Pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. 25, n° 4: 409 - 436.
15. Rufyikiri, G. 1992. Gestion des sols acides en régions d'altitude à occupation intense : Le Kirimiro au Burundi. Comparaison de quatre systèmes de mise en valeur. Mémoire FACAGRO, Université du Burundi. 54 p. + annexes.
16. Soltner, D. 1988. Les bases de la production végétale. Phytotechnie générale, Tome I. Le sol et son amélioration. – 16ème Ed. Collection Sciences et Techniques Agricoles, 464 p.
17. Simbakwira, N. 1995. Evaluation de l'indice d'agressivité climatique de l'équation de Wischmeier dans les régions du Mugamba et du Bututsi, Mémoire. Université du Burundi, Institut Supérieur d'Agriculture.
18. Van Der Velpen, C. 1973. Géographie du Burundi. - De Boeck, 136 p.
19. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion loesses – a guide to soil conservation planning - U.S. Departement of Agriculture, Agriculture handbook N°282, 58 p.

# Thème 7

## Acquis de recherche et leçons apprises sur l'érosion hydrique en nappe dans la région naturelle du Mimirwa (Rushubi-Isare)

A.Hicintuka<sup>1\*</sup>, M.C. Niyuhire<sup>1</sup>, C. Nkurunziza<sup>1</sup> et S. Kaboneka<sup>2</sup>

1. Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Programme Aménagement du Milieu et Ecologie. B.P. 790. Bujumbura, Burundi
2. Université du Burundi. Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). Département Sciences et Technologies de l'Environnement. B.P. 2940. Bujumbura, Burundi

**\*Auteur de Correspondance : Email : hicicyrille@gmail.com.**

### Résumé

Les tous premiers travaux de recherche sur l'érosion hydrique ont été effectués sur parcelles expérimentales et sur bassins versants (Cirisha et Nyarumpongo) à Rushubi dans les années 1990 par l'ISABU. Les mesures y effectuées étaient essentiellement les pertes physiques en terre (T/ha/an). Ont été également estimées les valeurs du facteur C (couvert végétal) de l'équation universelle des pertes en terre de Wischmeier et Smith. Preuve a été également faite de l'efficacité des méthodes biologiques (associations de cultures, buttage, paillage) contre l'érosion hydrique en nappe par rapport aux méthodes physiques (fossés isohypses, alignement isohypse des pierres). Les pertes en terre les plus élevées ont été obtenues avec les fossés isohypses (90 T/ha/an) et les alignements isohypses de pierre (200 T/ha/an). De l'autre côté, les pertes les plus faibles ont été enregistrées avec le paillage des cultures saisonnières (0,4 T/ha/an) et la haie mixte herbacée/arbustive (1 T/ha/an). A la différence d'autres travaux sur l'érosion hydrique en nappe menés jusqu'aujourd'hui au Burundi, les études couvertes à Rushubi ont abordé l'échelle « bassins versants » -B.V.-. Ceux-ci ont montré qu'à cette échelle, peu de pertes en terre sont enregistrées : < 170 kg/ha/an au B.V. Cirisha et < 64 kg/ha/an au B.V. Nyarumpongo. Ceci dénote d'une distribution des pertes en terre et un transfert de fertilité inter-parcellaire au sein du B.V, de l'amont (appauvrissement) à l'aval (accumulation et enrichissement), sans que l'équilibre global du B.V en soit trop affecté. Néanmoins, cet état de fait interpelle un aménagement global communautaire, intégré et responsable pour limiter cette distribution de fertilité en aval au détriment de l'amont des B.V. En plus, les études sur l'érosion hydrique de Rushubi ont pu caractériser le facteur C de l'équation de Wischmeier de certaines pratiques culturales : paillis abondant (C=0,001) ; manioc sur buttes individuelles (C=0,10-0,16) ; patate douce sur buttes individuelles (C=0,53) et association maïs-haricot (C=0,62).

**Mots clés : Rushubi, érosion en nappe, pertes en terre, parcelle, bassin versant, couvert végétal**

## Summary

The first research activities on soil water erosion (splash) were conducted by ISABU during late 1980's and early 1990's on experimental plots and watersheds (Cirisha et Nyarumpongo) in Rushubi. Measured parameters were soil loss (T/ha/year) and the C factor (crop factor) of the Wischmeier and Smith Equation. The main output of ISABU Rushubi research is the proved superiority of biological methods (multiple cropping, mulching) over physical methods (ditches, contour stone lines). Highest soil losses were observed with ditches (90 T/ha/year) and contour stone lines (200 T/ha/year). On the other hand, lowest soil losses were registered with seasonal crop mulching (0.4 T/ha/year) and herbaceous/shrub hedge (1 T/ha/year). Contrary to other research works on soil water erosion so far conducted in Burundi, Rushubi studies focused on watersheds, aside experimental plots. Such research showed limited soil losses at the watershed scale : < 170 kg/ha/year in Cirisha watershed and < 64 kg/ha/year in Nyarumpongo. This is an indication of soil loss distribution and soil fertility transfer from upper to lower agricultural plots within watersheds. This observation calls upon a global, community-based, inclusive and responsible watershed management. Otherwise, the other most remarkable finding from the ISABU Rushubi soil erosion research work is the determination of the Wischmeier and Smith Equation C factor values for some crops and cultural practices : complete mulching (C=0,001) ; cassava (C=0,10-0,16) ; sweet potato (C=0,53) and maize-bean double cropping (C=0,62).

**Keywords : Rushubi, splash erosion, soil loss, plot, watershed, cover crop**

## 1. INTRODUCTION

Le début de la recherche en protection et restauration des sols au Burundi sur financement du Fonds d'aide et de Coopération de la République Française se situe en 1979. Les premiers essais sur les parcelles expérimentales ont été installés à Rushubi par la Mission Forestière Crête Zaïre-Nil (MFCZN) sous la tutelle de Département des Eaux et Forêts. En 1985, ces travaux de recherche sur l'érosion hydrique ont été transférés à l'ISABU, en même temps que la recherche sylvicole et agro forestière, aussi ce qui était appelée Cellule de Recherche Agroforestière-CRAF.

Le thème global qui guidait cette recherche était : « Meilleur contrôle de l'eau, conservation et restauration des sols pour contribuer à favoriser l'autosuffisance alimentaire ». Ses objectifs spécifiques étaient les suivants :

1. Identifier et quantifier les facteurs qui influencent l'érosion (accélérateurs ou freins);
2. Comprendre le fonctionnement hydrodynamique des sols sur les sites étudiés;
3. Mesurer les pertes en terres et le ruissellement;
4. Tester l'effet des pratiques agricoles, dispositifs mécaniques et biologiques ainsi que les aménagements antiérosifs sur l'érosion, le ruissellement et les productions agricoles
5. Etablir une relation pertes en terre et baisse de fertilité, faire un bilan humique et étudier la stabilité structurale;
6. Etudier le fonctionnement des exploitations agricoles en vue d'intégrer la protection et la restauration des sols dans leur gestion quotidienne;
7. Développer des techniques efficaces et adaptées au milieu paysan pour la maîtrise et la gestion du ruissellement concentré
8. Contribuer activement à la mise en place et au fonctionnement d'un réseau national d'échange d'information sur les problèmes de l'érosion.

## 2. METHODOLOGIE

La recherche sur l'érosion hydrique dans le Mumirwa Central était plus basée sur les parcelles expérimentales. La région du Mumirwa a été choisie en raison de ses caractéristiques: région très peuplée; relief abrupte et accidenté; sols argileux (ferrisols et ferralsols) dérivés de schistes micacés, fragiles avec forte tendance à s'éroder (filets, rigoles, ravines, mouvements de masse fréquents). La station de recherche était équipée d'appareils pluviométriques. À côté des parcelles test des différents dispositifs antiérosifs biologiques et physique, cette station était dotée de parcelles planes avec pente régulière, gardées constamment nues et meuble (parcelle de Wischmeier). En favorisant l'érosion maximale, les parcelles ainsi aménagées permettent de déterminer le degré de sensibilité d'un sol à l'érosion.

Jusqu'à ce jour, la station expérimentale d'étude sur l'érosion hydrique de Rushubi est la seule à avoir travaillé sur les bassins versants. Deux bassins versants ont fait l'objet d'étude sur seulement 2 ans (crise socio-politique de 1993). Il s'agit des bassins versants de Cirisha (4,5 ha) et Nyarumpongo (7 ha). Les deux entités géographiques étaient des secteurs agricoles représentatifs du Mumirwa central : sols à fertilité variée, dominés par des ferrisols et des pentes atteignant 90%; zones à érosion forte et des zones d'accumulation constituées principalement de talwegs. À l'origine, ils devaient être suivis sans aucune interventions pendant 3 ans. Après cette période, les dispositifs et aménagements qui se seraient révélés efficaces en station et faciles à mettre en place devraient être proposés aux agriculteurs afin d'en évaluer non seulement l'efficacité mais également la rentabilité en milieu réel. La crise de 1993 n'a pas permis d'arriver à cette fin, tous les travaux de recherche sur l'érosion hydrique dans le Mumirwa Central ayant été brutalement interrompus.

## 3. PRINCIPAUX RESULTATS

Un travail synthétique sur les travaux de recherche sur l'érosion dans le Mumirwa Central ont été consignés dans un atelier organisé par l'ISABU en 1992 (ISABU, 1992). Nous résumons ci-après les principaux résultats obtenus sur les différents paramètres qui contrôlent l'érosion hydrique, à travers l'équation universelle révisée des pertes en terre de Wischmeier et Smith (1978).

L'agressivité climatique (R) s'est avérée être modérée dans les conditions pluviométriques du Mumirwa central. Elle variait entre 200 et 300 J/T. À titre comparatif, cet indice peut atteindre 1500 et 2000 en zone équatoriale (Roose, 1973). Malgré leur forte tendance à s'éroder en filets et rigoles, la susceptibilité ou érodibilité des sols (K) de cette région du Mumirwa est aussi modérée. En effet sur un ferrisol humique issu de schistes micacés (Rushubi2), les valeurs de K oscillaient entre 0,75 à 0,13. De l'autre côté, sur un sol ferrallitique de Rushubi 1 issu de quartzites pente de 45-50%), K= 0,02 à 0,065, tandis qu'à Kanyosha (pente de 70%) sur régosol sableux dérivé de gneiss et quartzique, K=0,050.

Le tableau 1 est compilé à partir des travaux de Roose, ISABU et Duchaufour. Les valeurs les plus basses de l'indice C sont associées à la forêt et le paillage abondant. La bananeraie avec paillage complet est aussi efficace contre l'érosion, à la même hauteur que la forêt dense et paillage complet. Les associations de cultures sont caractérisées par des valeurs de C autour de 0,5 de moyenne.

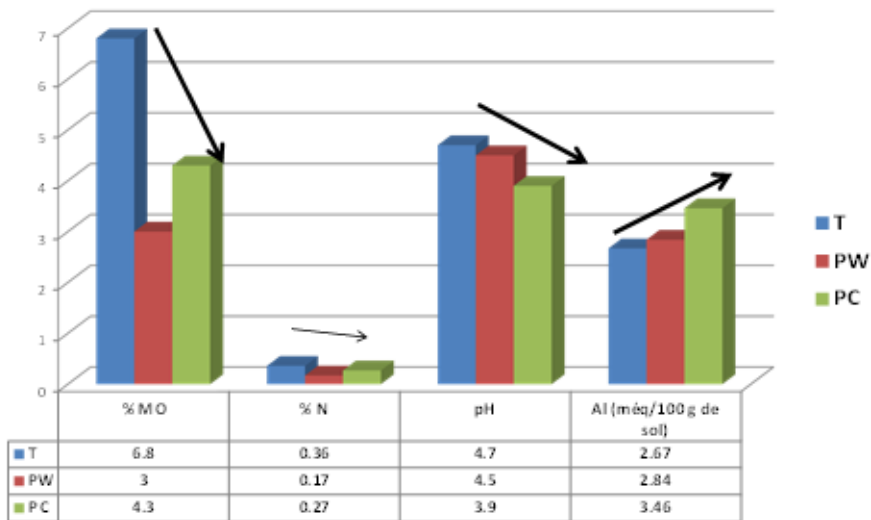
**Tableau 1. Exemples d'indices culturaux (C)**

Type de couverture végétale	Indice C
Sol	1
Forêt dense	0,001
Paillis abondant	0,001
Savane/Prairie	0,01
Savane brûlée ou surpâturée	0,1
Maïs/Sorgho	0,4-0,9
Arachide	0,4-0,8
Maïs-haricot	0,62
Manioc sur buttes individuelles	0,10-0,16
Patate douce sur buttes individuelles	0,53
Bananaïe traditionnelle (résidus exportés)	0,07-0,14
Bananaïe avec paillage en couronne	0,3-0,6
Bananaïe avec paillage en bandes	0,03-0,06
Bananaïe avec paillage complet	0,001

Les pertes en terres estimées sur base de l'équation révisée de Wischmeier et Smith  $A = R * K * LS * C * P$  ont été également calculées. Ainsi, sur parcelle nue récemment labourée, les pertes en terres atteignent plus d'une centaine de tonnes/ha avec une seule pluie de forte agressivité de 60-70 mm en moins d'une heure, soit 1 cm de terre superficielle arrachée. En conséquence, sur de hautes collines à sols schisteux et à forte pente que l'horizon B (argileux et compact) apparaît en surface très rapidement lorsque le terrain est mis sous culture sans protection adéquate et une restitution de la matière organique (M.O). L'aboutissement de ce processus érosif abouti progressivement à la baisse de la fertilité des sols due à un épuisement du sol provoqué par une exploitation intensive des parcelles à fortes pentes aggravée par le labour dans le sens de la pente, auquel s'ajoute l'exportation des résidus de récolte et des déchets agricoles, au moment où la restitution de la matière organique reste

faible. Une comparaison de parcelles cultivées sur 5 ans et un sol témoin initial (ferralsol argileux humifère profond) montre une chute moyenne de 1,6 % de carbone organique et près de 1/3 de % N, qui s'accompagnent de l'augmentation de l'acidité (réduction de pH) et du taux de toxicité d'aluminium libre (Figure 1).

### Dégradation chimique des sols dans le Mumirwa central (5 ans sur un ferralsol argileux: H. Duchaufour, 1992).



**Figure 1. Dynamique de la MO, de N organique, du pH et de l'Al échangeable par suite de l'érosion hydrique sur un ferralsol argileux humifère du Mumirwa Central (Rushubi).**

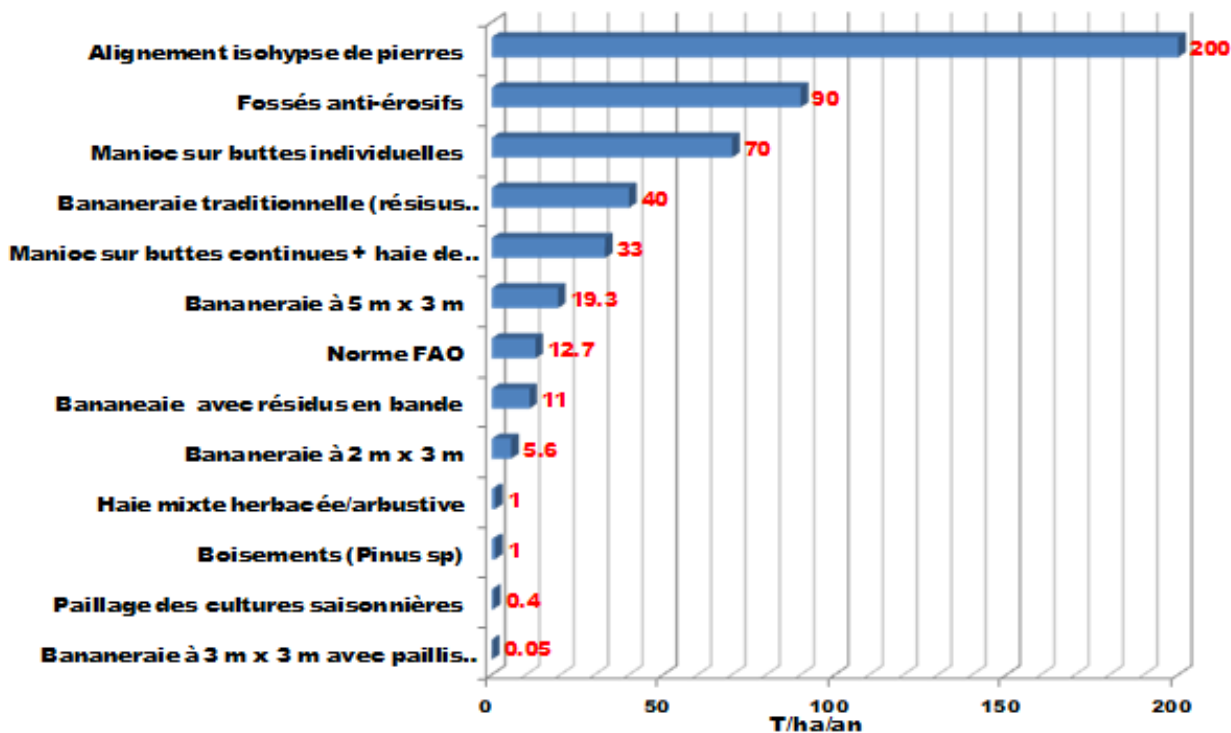


Figure 2. Pertes en terre (T/ha/an) enregistrées sous différentes techniques antiérosives testées dans le Mumirwa central

Tel qu'illustré par la Figure 2, des techniques antiérosives testées à la station expérimentale d'étude sur l'érosion hydrique de Rushubli dans le Mumirwa Central, le paillage se démarque comme un excellent moyen de protéger le sol contre l'érosion et le ruissellement. Il peut être appliqué sur toutes les cultures pour autant que la biomasse soit disponible et suffisante. En terme d'efficacité, le paillage se situe dans la même catégorie que la bananaeraie avec paillis, le boisement et la haie mixte herbacée et arbustive: pertes en terres (A) au plus égales à 1, de très loin la norme FAO des pertes en terre tolérables qui de 12,7 T/ha/an. Ces résultats mettent en avant les techniques biologiques de lutte contre l'érosion hydrique, qui sont non seulement efficaces mais apportent également une plus value à l'agriculteur, en termes de biomasse (fourrage, tuteurs) et de reconstitution de la matière organique du sol.

A Rushubi, les boisements de Pinus kesiya ont donné lieu à des pertes en terre de 1 T/ha/an emportée la première année d'expérimentation avec un ruissellement annuel moyen de 0.1%. Les pertes deviennent nulles et le ruissellement insignifiant dès que les aiguilles de pin couvrent parfaitement le sol. Au niveau de petites exploitations agricoles, des cordons boisés participent à la protection des sols et fournissent également du matériel ligneux pour divers usages.

Les haies vives sont des bandes enherbées suffisamment larges, compactes et rapprochées qui réduisent la longueur de la parcelle sur la pente et stoppent le ruissellement et filtrent les matériaux solides. L'accumulation répétée de ces matériaux conduit à la formation progressive de terrasses dont les talus seront soutenus par l'enracinement des végétaux formant les haies. L'association des graminées et légumineuses arbustives améliore la rentabilité d'une haie et sont complémentaires: les graminées freinent le ruissellement et arrêtent les sédiments et les arbustes fixent le sol et le futur talus. Les essais de Rushubi ont montré des diminutions de l'érosion solide (sédiments) variant de 50% à l'infini suivant le système de culture pratiqué et l'état de la fertilité des sols. La formation d'une terrasse progressive a été observée en diminuant la pente expérimentale de 30 à 20% en quatre années avec un talus de 70 cm de haut. L'étalement des produits des coupes a une efficacité temporaire d'environ un mois sur le ruissellement et le charriage des matériaux. Elle s'observe même lors des épisodes pluviaux très agressifs. Les haies mixtes offrent des bénéfices multiples. Elles augmentent les capacités de diversification et d'intensification de l'exploitation agricole.

Cependant, aux haies vives mixtes sont associées certains inconvénients. Il faut attendre 5 à 6 mois avant que la haie puisse confirmer son rôle de micro barrage et de filtre. A Rushubi, les atterrissements n'ont pas permis d'enregistrer

aucun enrichissement significatif du sol en amont des haies. Aussi, les concurrences multiples portent aussi bien sur les cultures associées que sur la composante de la haie (ombrage, réserve hydrique). D'autre part, l'espace occupé par des haies équidistantes de 10 m représente environ 10% de la surface agricole, de ce fait, certains agriculteurs (sans élevage par exemple) considèrent que la production de biomasse ligneuse et foliaire sur ces haies se fait aux dépens des cultures vivrières.

En fin de compte, avec les haies vives mixtes, les premiers résultats expérimentaux de Rushubi soulignaient bien des difficultés stratégiques de l'introduction de cette technologie qui semblait à première vue simple et rentable pour l'exploitant car productive et pérenne. Si elle s'introduit aisément dans telles exploitations avec les bénéfices recherchés, elle peut devenir dans telles autres une innovation inopportune, une contrainte économique à court terme, parfois une exigence trop importante en main-d'œuvre ou tout simplement un obstacle à la production vivrière familiale.

Les bananeraies assurent une couverture importante du sol par leur feuillage couvrant mieux le sol. A plus long terme, cette biomasse en se décomposant améliore le contenu en matière organique du sol. Le rangement des déchets de bananeraie sur des bandes isohypses sur des bandes de 2 m de large distantes de 5 m a rabaisé les pertes en terres de 66% par rapport à la bananeraie traditionnelle (respectivement 35 T et 103 T/ha/2 ans). A côté de la bananeraie dont la gestion optimale assure une protection du sol contre l'érosion hydrique du sol, le rôle de l'arboriculture est aussi important, au vu des avantages multiples de l'arbre dans les exploitations agricoles à travers son associations avec les cultures. L'arbre doit être soigneusement sélectionné et géré de façon qu'il contribue à l'augmentation de la production et au fonctionnement de l'exploitation. Le houppier protège le sol contre les impacts de pluie et fixe le sol par son enracinement. La production d'une litière permet de restituer une partie de la fertilité (recyclage) et couvre mieux le sol.

S'agissant des ouvrages mécaniques (physiques) testés, ils incluent les terrasses radicales, les fossés isohypses les lignes de pierres et les andains de déchets de labour. L'une des limitations majeures des terrasses est que leur mise en place nécessite une perturbation du sol entraînant souvent un enfouissement de la couche arable avec dégradation des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. En cela, l'installation des terrasses radicales exige une préalable étude morpho-pédologique de la région considérée pour comprendre le comportement hydrodynamique. Les fossés isohypses (90 T/ha/an à Rushubi) demandent une installation rigoureuse suivant les courbes de niveau avec un fond régulier, une main d'œuvre élevée lors de leur mise en place, un entretien régulier. Comme les agriculteurs habitent souvent loin de leurs champs, l'entretien des fossés est vu comme une énorme corvée. De plus, sur sols fragiles schisteux du Mumirwa, les risques de rupture et de ravinement sont élevés au moment des crues. Les fossés sont plus bénéfiques lorsqu'ils sont mieux calibrés et associés aux bandes enherbées.

La figure 3 compare les pertes en terre enregistrées dans le Mumirwa central (Rushubi) et le Buyenzi (Gashikanwa). L'observation principale de cette comparaison est le comportement différentiel du fossé antiérosif qui génère 90 T/ha dans le Mumiwa et seulement 6,8 T/ha à Gashikanwa dans la région naturelle du Buyenzi. La conclusion à tirer est que le fossé antiérosif constitue un grand risque d'érosion hydrique dans le Mumirwa, où il peut même être à l'origine de ravinement et de glissements de terrain (Duchafour et Party, 1988). C'est pour cette même raison que les fossés antiérosifs sont interdits dans la région naturelle, dont les caractéristiques pédo-géologiques sont fortement favorables aux érosions spectaculaires que sont les ravines et les glissements de terrain. Au contraire, le substrat pédo-géologique de Gashikanwa (Buyenzi) n'est pas autant fragile que celui du Mumirwa (S. Nijimbere, T. Rishirumuhirwa, communications personnelles).

Les lignes de pierre et les andains de déchets de labour constituent un autre groupe d'ouvrages mécaniques de lutte contre l'érosion hydrique. Les pierres sont disposées en courbes de niveau avec colmatage des espaces entre les pierres avec des déchets de labour pour éviter la concentration en amont de ces trous et un ravinement à la sortie du tas. A Rushubi, les lignes isohypses de pierres avec vides non bouchés ont occasionné des pertes en terres de 190 à 330 tonnes/ha/an sur des cultures vivrières sarclées. Quant aux andains de déchets de labour, ils freinent significativement l'érosion et rendent fertiles leur lieu d'emplacement par décomposition et libération des éléments nutritifs y contenus.

En milieu paysan, les toitures en tôles ou tuiles collectent d'importants volumes d'eaux qui sont généralement évacués vers les chemins. Ces eaux causent des dégâts importants lorsqu'elles traversent des champs cultivés ou des zones fragiles et sont à l'origine du ravinement. Aussi, dans le Mumirwa Central, des chemins sont devenus des ravins. Ils sont gérés par l'installation des fascines en bois et en branchages, consolidées ou non par des lignes enherbées et quelque fois des gabillons. Pour plus d'efficacité, des périmètres de protection et du fond de ravines sont végétalisés. La gestion de l'eau des toitures passe par leur collecte dans des citernes. A titre d'exemple, une citerne installée chez un exploitant a permis de maîtriser toute l'eau de la toiture de sa maison mais aussi l'a stimulé dans la conduite d'un élevage bovin.

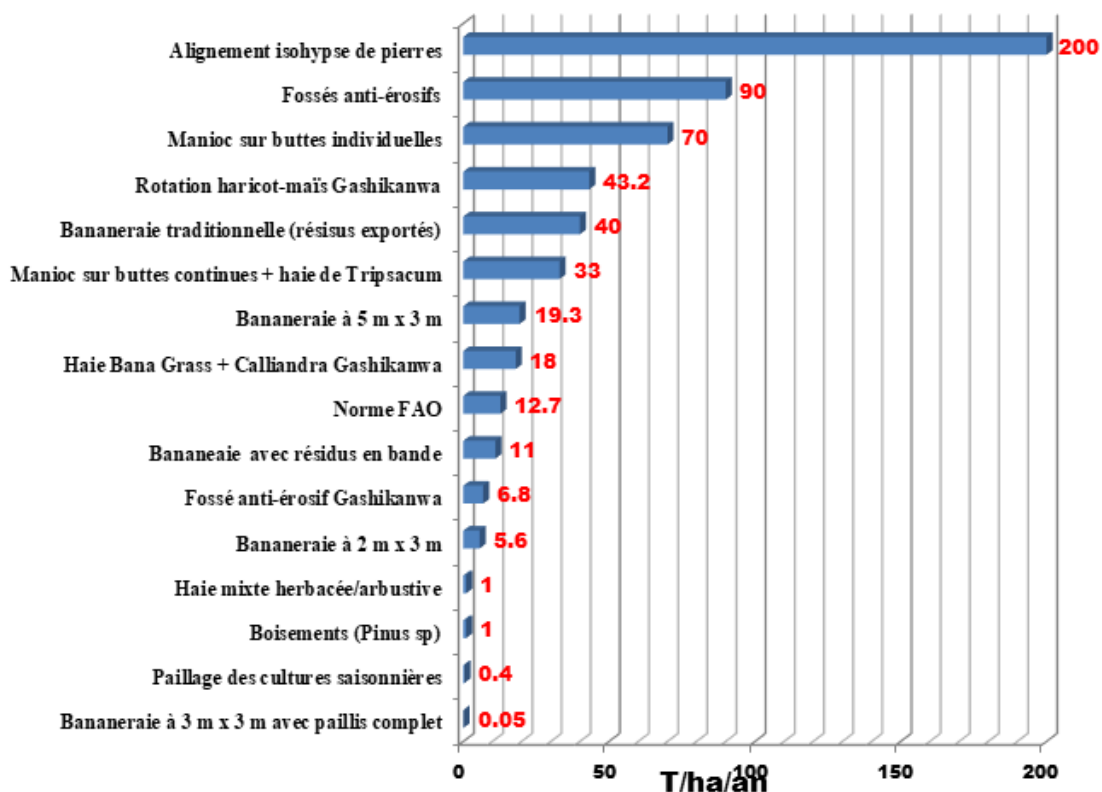


Figure 3. Pertes en terre (T/ha/an) comparées consécutives aux techniques LAE testées dans le Mumirwa central et dans le Buyenzi (Gashikanwa)

## 4. CONCLUSION

La mise en culture des terres en forte pente sans intégrer des mesures appropriées de protection cause de l'érosion. Sur des sols labourés, l'érosion hydrique liée au climat pluvieux et à l'importance des pentes a des effets dévastateurs. L'autre phénomène responsable de l'augmentation du processus d'érosion est la disparition de la végétation naturelle ( $C \leq 0,01$ ) et son remplacement par des cultures plus érosives, ayant des indices compris entre 0,1 et 0,7. Aussi, des évidences de grave dégradation des terres par l'érosion linéaire sont observées dans plusieurs endroits. L'effet immédiat de l'érosion hydrique est la baisse de la fertilité des sols à travers l'exploitation intensive des terres, la mise en exploitation des terrains de forte pente et les pratiques agricoles non appropriées. Des techniques imposées aux agriculteurs ne sont pas souvent adoptées. Elles ne répondent pas aux besoins urgents des agriculteurs. La meilleure approche est l'établissement des liens solides entre les agriculteurs, les développeurs et les chercheurs pour une meilleure utilisation des acquis de la recherche.

## 5. LECONS APPRISES

1. Pour bien conduire les aménagements antiérosifs, il faut d'abord identifier les objectifs des agriculteurs, bien appréhender les caractéristiques et les contraintes physiques de leurs exploitations, comprendre le contexte socio-économique et le problème foncier.
2. La conservation et la restauration de la fertilité des sols doit se baser sur une meilleure gestion de la biomasse;
3. Le paillage, l'application du fumier amélioré, du compost et des engrais verts doivent être intensifiés;
4. Des aménagements antiérosifs pour nourrir le bétail et le fumier est ramené sur la parcelle pour une meilleure productivité agricole ;
5. Un élevage de petits ruminants sur un espace inférieur à 1.5 ha apporte une réaction positive rapide sur le fonctionnement de l'exploitation et sur l'amélioration des rendements
6. L'élevage intensif en stabulation entraîne automatiquement des besoins en fourrage. Pour mieux gérer son espace agricole, des aménagements antiérosifs permettent donc de nourrir son bétail et d'avoir du fumier pour fertiliser ses parcelles agricoles.
7. Dans le contexte de faibles revenus pour se procurer des engrais minéraux, les dispositifs biologiques et l'agroforesterie répondent mieux que les ouvrages mécaniques.
8. Pour un meilleur effet, la conservation des eaux et des sols doit associer pratiques agricoles conservatoires, favorisant l'établissement végétatif des cultures et aménagements antiérosifs;
9. Une bonne gestion des eaux de toiture et une évacuation appropriée des ruissellements concentrés doivent avoir plus d'attention pour éviter la formation des ravines;
10. L'infiltration des eaux doit aussi être contrôlée afin de réguler l'écoulement hypodermique et prévenir l'érosion en masse ;
11. Repenser aussi le système de vulgarisation en matière de lutte antiérosive.

En complément à cette série de leçons apprises à l'issue des travaux de recherche sur l'érosion hydrique menée par l'ISABU, Eric Roose (1990), considéré à juste titre comme le parrain de la recherche sur l'érosion au Burundi a émis, il y a plus de 30 ans ce qu'il a appelé les 10 commandements pour l'aménagement des ravines. Ces dix commandements qui sont toujours d'actualité sont :

1. Tant qu'on n'a pas amélioré l'infiltration dans le bassin, il ne faut pas tenter de boucher la ravine, au cas contraire, elle trouvera un autre lit. Mieux vaut prévoir un canal stable capable d'évacuer les débits de pointe de la crue décennale au minimum.
2. L'aménagement mécanique et biologique d'une ravine peut être réalisé progressivement en 2 à 6 ans, mais il doit concerner tout bassin dès la première année. La fixation biologique d'une ravine vient consolider les versants et le fond de ravine stabilisé par différents types de seuils : si on inverse l'ordre, les plantes ont emportées avec les terres lors des crues.
3. Emplacement des seuils doit être choisi avec soin selon l'objectif visé. Si on cherche seulement à rehausser le fond de la ravine pour que les versants atteignent la pente d'équilibre naturel, il faut choisir un verrou, une gorge étroite où de nombreux seuils légers pourront s'appuyer sur des versants solides. Si on cherche à fixer le maximum de sédiments ou à récupérer des espaces cultivables, il faut choisir les zones à faible pente, les confluent de ravines secondaires, les versants évasés et construire de gros ouvrages poids qui seront rehaussés progressivement.
4. L'écartement entre les seuils est fonction de la pente du terrain. Le déversoir aval doit être à la même altitude que la base du seuil amont, à la pente de compensation près (1 à 10 % selon la nature du fond de ravine), qui peut s'observer sur place (zone stable sans creusement ni sédimentation). Dans un premier temps on peut doubler cet écartement et construire les seuils intermédiaires dès que la première génération de seuils est comblée de sédiments : stabiliser immédiatement les sédiments piégés avec des plantes basses dans l'axe d'écoulement et des arbres sur les versants.

5. Pour éviter la pression hydrostatique des coulées, il faut drainer les seuils.
6. Les seuils doivent être bien ancrés dans le fond et les flancs de ravine (tranchée de fondation) pour éviter les renards et contournements.
7. L'énergie de chute de l'eau qui saute du déversoir doit être amortie par une bavette (encrochement, petit gabion, grillage + touffes d'herbes) ou par un contre barrage (cuvette d'eau) pour éviter les renards sous le seuil ou le basculement du seuil.
8. Le courant d'eau doit être bien centré dans l'axe de la ravine par les ailes du seuil, plus élevées que le déversoir central. Ce déversoir doit être renforcé par de grosses pierres plates, plus ou moins cimentées ou par des ferrailles pour résister à la force de cisaillement des sables, galets et roches qui dévalent à vive allure au fond des ravines.
9. L'aménagement mécanique n'est terminé que quand on a éteint les sources de sédiments, stabilisé, la tête de ravine et les versants. La végétalisation doit alors se faire naturellement si on a atteint la pente d'équilibre, mais on peut aider la nature en couvrant rapidement les sédiments (herbes) et en les fixant à l'aide d'arbres choisis pour leurs aptitudes écologiques et leur production ; rentabilisation des aménagements.
10. Tenir le bétail à l'écart de l'aménagement.

## Remerciements

Les auteurs remercient le Projet PAGRIS de l'IFDC pour avoir accepté la présentation de nos travaux de recherche durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDÉES

1. Berthelot E. 1993. Gestion de l'arbre dans les exploitations agricoles du Buyenzi. Burundi. CNEARC. 64 p. + annexes.
2. Besse, F. 1987. Fichier technique de vulgarisation agroforestière. AFVP. Projet Reboisement Banque Mondiale FAC. 99 p.
3. Besse, F., A. de Ligne et P. Guizol. 1989. Séminaire National 'L'Agroforesterie au Burundi'. Ministère de l'Aménagement et Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage. Facagro, Bujumbura. 373 p.
4. Besse, F., A. de Ligne, V. Ngarambe. 1989. Note préliminaire à la définition d'un programme national de conservation des eaux et des sols. ISABU. 21 p.
5. Bimenyimana, L. 1993. Etablissement de la carte pédologique au 1/10.000ème des secteurs de référence de Manga-Kibuye et de Bigoma dans le bassin versant de la Ntchangwa. FACAGRO et ISABU. Bujumbur, Burundi.
6. Bitoki, O., S. Kaboneka et H. Duchaufour. 1990. L'agroforesterie : du fourrage ! Mais pour quels objectifs ? Séminaire d'Agrostologie. Bujumbura. 13 p.
7. Bizimana, M. 1991. Dégradation mécanique des sols au Burundi ; Diagnostic et stratégie. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, Décembre 1991. 12 p.
8. Cochet, H. 1996. Gestion paysanne de la biomasse et développement durable au Burundi. Cahiers des Sciences Humaines. ORSTOM. Vol 32(1) : 133-151.
9. Depommier, D., D. Hoekstra, G. Wolf, S. Kaboneka, P. Guizol et O. Bitoki. 1988. Potentiel agroforestier des systèmes d'utilisation des terres d'Afrique de l'Est à régime pluviométrique bimodal : Cas du Burundi. Rapport AFRENA No 2. ICRAF. 157 p.
10. Duchaufour, H. 1993. Stratégie de développement régional. Une approche spatiale de l'environnement rural des Bassins versants de la Ntchangwa et de la Muha. Montpellier, CIRAD-SAR no 52/93. 70 p.

11. Duchaufour, H. 1995. Le malaise social du Burundi social : réalités historiques et actuelles de l'érosion. Programme de recherche pour la Protection de l'Environnement. Institut des Sciences Agronomiques du Burundi. 184 p. + annexes.
12. Duchaufour, H. et J.P. Party. 1988. Etude de la conservation des eaux et des sols dans le Mumirwa. Cas de deux bassins versants. Commune d'Isale. Mission d'appui Technique à l'ISABU. 42 p. + annexes + planches couleurs.
13. Duchaufour, H. et J.P. Party. 1988. Etude la conservation des eaux et des sols dans le Mumirwa : Cas de deux bassins versants dans la commune d'Isale. FAC : Burundi. GIE SCI-Conseil Nancy. 66 p.
14. Duchaufour, H. P. Guizol, M. Bizimana, R. Peltier et C. Pouilloux. 1996. Avantages et inconvénients de la hhaie mixte Calliandra/Sétaria comme dispositif anti-érosif en milieu rural burundais. Bull. du Réseau Erosion. ORSTOM No 16. 20 p.
15. Flémal, J. 1989. La conservation du sol, l'utilisaion du terrain. Le problème de l'ombrage et du bois domestique dans les exploitations à composante théicole. Séminaire National Agroforesterie au Burundi. P. 103-118.
16. Hendrickx, F.L. et J. Hendrickx. 1948. La jachère à bananiers. Conférence Africaine des Sols. Goma (Congo Belge), 8-16 novembre. p. 1701-1712.
17. ISABU. 1989. Programme Sylviculture, Agroforesterie et Conservation des sols. Rapport annuel 1988. 67 p.
18. ISABU. 1992. Séminaire sur l'érosion des sols au Burundi. Bujumbura, 26 au 28 Octobre 1992. 101 p.
19. Kaboneka, S. et P. Guizol. 1988. Rapport Annuel Agroforesterie. 42 p.
20. Kabwa, A. 1986. Rapport final du Séminaire National sur la Stratégie de la Conservation des Eaux et des Sols au Burundi. Bujumbura. Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage-FAO. 200 p.
21. Lal, R. 1999. Soil Quality and SoilErosion. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa. CRC Press LLC, 2000 Corporate Blvd, N.W. Boca Raton, Florida 33431. 329 p.
22. Mathieu, C. 1986. L'érosion et la lutte antiérosive au Burundi. Bulletin Réseau Erosion No 6. 71-81.
23. Mathieu, C. 1987. Contraintes techniques et sociales en conservation du sol et des eaux en zone à très forte densité de population ; l'exemple des montagnes du Mumirwa au Burundi. Tropicultura 5(3) ; 137-146.
24. Rishirumuhirwa, T. 1993. Contribution des résidus du bananier en conservation de l'eau et du sol. Bulletin Réseau Erosion13. ORSTOM Montpellier. 63-70
25. Rishirumuhirwa, T. 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique Orientale ; Application au cas de la région du Kirimiro-Burundi. Thèse de Doctorat en Sciences Techniques No 1636. Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL, Suisse). 224 p.
26. Roose E. 1990. Un programme national de Gestion Conservatoire de l'Eau et de la Fertilité des Sols (GCES) au Burundi. Rapport de Mission au Burundi du 26/2 au 16/3/1990. Montpellier, mars 1990. 35 p.
27. Roose E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique de la FAO 70. 420 p.
28. Roose, E. 1986. Terrasses de diversion ou microbarrages perméables ? Analyse de deux démarches de conservation de l'eau et des sols chez les petits fermiers de la zone soudano-sahélienne d'Afrique Occidentale. Cahiers ORSTOM. Pédologie : 22-2 : 81-92.
29. Roose, E. 1987. Water efficiency and soil fertility conservation on steep slopes of some French speaking tropical countries. Proc. Puerto Rico Workshop. ORSTOM. 19 p. mult.
30. Roose, E. 1988. New strategy od water management and soil conservation. Appication in developped and developping countries. Proceedings of Isco 5.
31. Roose, E. 1989. Notion de base sur le ruissellement, l'érosion et la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols. ORSTOM-CNEARC. 125 p.
32. Roose, E., F. Ndayizigiye, U. Nyamulinda et E. Byiringiro. 1988. La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive pour le Rwanda. Bull. Agricole du Rwanda 21,4 : 264-277.
33. Rupiya, P. 1993. Essai de divers systèmes de protection d'exutoire et d'aménagement d'une ravine dans le Mumirwa : cas de la racvine de Sagara. FACAGRO et ISABU. Bujumbura, Burundi.

34. 34. Snoeck, D. et J. Naraguma. 1989. La lutte antiérosive en caféiculture. Sém. Nat. 'Agroforesterie au Burundi'. P. 129-137.
35. 35. Tondeur, G. 1950. Erosion du sol, spécialement au Congo Belge. Publication des Services de l'Agriculture. Ministère des Colonies. Bruxelles. Troisième Edition. 240 p.
36. 36. Van den Abeele, M. 1941. L'érosion, problème africain. Inst. Royal Colonial Belge. Sciences Naturelles. Tome 11. Bruxelles.
37. 37. Zuazo, V.H.D. and C.R.R. Pleguezuelo. 2008. Soil-erosion and runoff prevention pat plant covers. A review. Agronomy for Sustainable Development. 28 (1). 65-86. Hal - 00886458.

# Thème 8

## Rentabilité financière et effets de la haie mixte (Bana grass + Calliandra calothyrsus + Grevillea robusta), du fossé isohypse et de la haie combinée au fossé comme techniques de lutte anti-érosive sur le rendement de la pomme de terre et du maïs en zone densément peuplée du Nord Burundi (Kayanza–Ngozi)

B. Habonimana<sup>1\*</sup>, C. Kwizera<sup>1</sup>, S. Kaboneka<sup>1</sup>, P. Nsengiyumva<sup>2</sup>, S. Ndhokubwayo<sup>1</sup>, D. Niyibaruta<sup>1</sup>, E. Barankanira<sup>3</sup>, N. Nimenya<sup>1</sup>, S. Nijimbere<sup>1</sup>, T. Rishirumuhirwa<sup>4</sup>, J. Ndimubandi<sup>1</sup>, J. Van Orshoven<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> : Université du Burundi, <sup>2</sup> : Assistant de recherche au Projet Erosion, <sup>3</sup> : Ecole Normale Supérieure (ENS), <sup>4</sup> : Agrobiotech, <sup>5</sup> : Katholieke Universiteit Leuven (KUL)

\* Auteur pour correspondance : [bernadette.habonimana@ub.edu.bi](mailto:bernadette.habonimana@ub.edu.bi)

### Résumé

Au Burundi, l'érosion hydrique constitue une des principales causes de la dégradation des sols agricoles et de diminution des rendements. Sous le financement des projets SADER et PAGRIS/IFDC, la Faculté d'Agronomie et de Bio-ingénierie (Université du Burundi) mène, depuis 9 ans (2015-2023), une recherche sur la lutte antiérosive à Gashikanwa (Ngozi) et Matongo (Kayanza). L'étude a comparé l'effet de trois techniques de lutte antiérosive sur les rendements de la pomme de terre et du maïs et a évalué la rentabilité financière de leur application. A Gashikanwa, trois traitements ont été appliqués : G1 (Témoin), G2 (haie mixte de bana gras+ simple ligne de Calliandra calothyrsus+ Grevillea robusta) et G3 (haie mixte+ fossé isohypse). A Matongo, 4 traitements : M1 (témoin), M2 (haie mixte avec double ligne de calliandra), M3 (haie mixte+ fossé isohypse) et M4 (fossé isohypse seul). Les données des rendements ont été analysées au logiciel R (version 4.1.2). A Gashikanwa, aussi bien pour le maïs que pour la pomme de terre, les rendements de G3 sont supérieurs (1.3 fois) à ceux de G2 et G1 malgré des différences statistiquement non significatives au seuil de 5 %. A Matongo, M4 présente les meilleurs rendements. M2 et M3 ont été même moins productifs que M1. Une forte concurrence haie -culture se manifeste par des productions trop basses pour les lignes au tour de la haie : Par ex. 0.6 kg (M2) à 1.1 kg (M3) contre 4.5 à 5.5 kg respectivement pour M1 et M4 pour le maïs en 2018-2019. La concurrence haie-culture, déjà accrue à Gashikanwa avec une haie de 2 m de large s'exacerbe à Matongo où la haie fait 2.5 m de large. La rentabilité financière a été évaluée sous deux scénarios à l'aide d'indicateurs économiques que sont la VAN (Valeur Actuelle Nette) et le taux de rentabilité interne (TRI). Sous le scénario 1, la superficie cultivable perdue par l'aménagement des fossés (évaluée à 5%) n'est pas prise en compte dans les coûts. La VAN est plus élevée pour G3 à Gashikanwa. Au taux d'actualisation de 10%, la VAN est négative pour G1 (-1 641 608 BIF), de 6 998 328 BIF pour G2 et monte à 9 100 871 BIF pour G3. A Matongo, l'ordre de rentabilité est : M4 = M3 > M2 > M1. Dans un deuxième scénario (comptabilisation de la superficie perdue par le creusement des fossés), G3 devient 3 à 6 fois

moins rentable que G2 à Gashikanwa. Il en est de même que M4 pour Matongo. Les résultats sous ce scénario justifient la réticence des agriculteurs à l'adoption des techniques avec fossés, surtout dans les zones densément peuplées. Une valorisation des fossés par des cultures adaptées à des quantités importantes d'eau comme le bananier pourrait contribuer dans la rentabilité des dispositifs de lutte antiérosive avec fossés.

**Mots clés : Techniques de lutte antiérosive, rendement, haie mixte, fossé isohypse, haie mixte combinée avec fossé isohypse, rentabilité financière**

## Abstract

In Burundi, water erosion is one of the main causes of agricultural soil degradation and reduced yields. Under funding from the SADER and PAGRIS/IFDC projects, the Faculty of Agronomy and Bioengineering (University of Burundi) has been carrying out (2015-2023) a research on erosion control in Gashikanwa (Ngozi) and Matongo (Kayanza). The study compared the effect of 3 erosion control methods on maize and potato yields and evaluated the financial profitability of the application of these techniques. In Gashikanwa, three treatments were applied: G1 (Control), G2 (a mixed hedge of bana gras + single line of Calliandra calothyrsus + Grevillea robusta) and G3 (mixed hedge combined with a contour ditch). In Matongo, 4 treatments: M1 (control), M2 (mixed hedge with double line of calliandra), M3 (mixed hedge + contour ditch) and M4 (contour ditch only). Yields data were analyzed with R (version 4.1.2). In Gashikanwa, both for maize and potatoes, despite statistically insignificant differences at the 5% threshold, the yields of G3 are higher than those of G2 and G1. The additional yields are up to 30% and 44% respectively compared to G1 and G2. In Matongo, M4 presented the best yields. M2 and M3 were even less productive than the control. Hedge-crop competition was high around the hedge: e.g 0.6 kg (M2) to 1.1 kg (M3) compared to 4.5 to 5.5 kg respectively for M1 and M4 for maize in 2018-2019. Hedge-crop competition, already increased in Gashikanwa with a 2 m wide hedge, is exacerbated in Matongo where the hedge is 2.5 m wide. Financial profitability was assessed under two scenarios using economic indicators such as the NPV (Net Present Value) and the internal Rate of Return (IRR). Under scenario 1, the cultivable area lost by the ditches (estimated at 5%) is not taken into account in the costs. The VAN is higher for G3 in Gashikanwa. Thus, at the economic rate of 10%, the NPV is negative for G1 (-1,641,608 BIF), is 6,998,328 BIF for G2 and rises to 9,100,871 BIF for G3. In Matongo, the order of profitability is: M4 = M3 > M2 > M1. In a second scenario where the area lost by the ditches is included in the costs, G3 becomes 3 to 6 times less profitable than G2 in Gashikanwa. The result was similar for M4 in Matongo. The results under this scenario justify the reluctance of farmers to adopt techniques with ditches, especially in densely populated areas. The valorization of the ditches with crops adapted to important quantities of water such as bananas could contribute to the profitability of the contour ditch method.

**Key words: erosion control method, yield, mixed hedge, contour ditch, mixed hedge combined with contour ditch financial profitability.**

# 1. INTRODUCTION

Au Burundi, l'érosion hydrique constitue un des principaux facteurs de la dégradation des terres agricoles et de la perte de productivité. Ses causes sont aussi bien naturelles qu'anthropiques (Rishirumuhirwa, 1994). En effet, le Burundi est naturellement exposé à l'érosion de par sa géomorphologie et sa pluviométrie. Bien plus, sa forte démographie et le morcellement des terres inhérent au régime foncier exacerbent les problèmes d'érosion et de dégradation des terres. Différentes recherches antérieures ont évalué les pertes en terres et proposé des techniques de lutte antiérosive. Il s'agit des essais de l'ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi) dans le Mumirwa (Duchaufour et al. 1996), de l'IRAZ (Institut de Recherche Agronomique et Zootechnique) dans le Kirimiro (Rishirumuhirwa 1993 et 1997 ; Rishirumuhirwa et Roose, 2015). Un bon nombre de techniques de lutte antiérosive ont été proposées. Le paillage et les haies mixtes arbustives/herbacées (*calliandra-setaria*) figurent en haut sur l'échelle d'efficacité avec respectivement des pertes en terres de 0.4 T/ha/an et 1T/ha/an, des taux de loin inférieurs à 12.7 T/ha/an, seuil de tolérance selon la FAO.

Après ces recherches dans le Mumirwa et le Kirimiro par l'ISABU et l'IRAZ, la faculté d'Agronomie et de Bio-ingénierie a entamé depuis 2015, sous le financement des projets SAdER et PAGRIS/IFDC, une recherche sur la lutte antiérosive (LAE) dans les zones densément peuplées du Nord du Burundi (Kayanza, Ngozi). L'étude avait comme objectifs : (i) de tester l'effet de la haie mixte isohypse, de la haie mixte combinée au fossé isohypse et du fossé isohypse seul sur les rendements du maïs et de la pomme de terre, et (ii) d'évaluer la rentabilité financière de l'application de ces techniques.

L'efficacité de la haie mixte sur la réduction des pertes en terres a été prouvée au Burundi (Duchaufour et al., 1996) et dans les pays de la sous-région comme le Kenya (Angima et O. Neill, 2000) et le Rwanda (Ndayizigiye, 1993 et 2015). Son effet sur les rendements des cultures associées a, par contre, fait objet de peu d'attention, de même que la combinaison avec un fossé isohypse. En plus de son efficacité dans la lutte contre l'érosion, la haie mixte fournit des produits diversifiés utiles à l'agriculteur (fourrage, tuteurs/bois de chauffe) et possède un potentiel d'amélioration de la fertilité des sols de par la fixation de l'azote par le *calliandra* (Ndayizigiye, 1993 et 2015). Au Burundi, ces multiples usages favoriseraient son adoption par les agri-éleveurs dont le bétail est sous stabulation permanente depuis une loi de 2021. L'obtention de différents produits boisés est aussi un avantage dans un contexte d'exiguïté des terres, particulièrement dans cette zone d'étude où les espaces naturels non mis en culture sont quasi inexistantes et où l'approvisionnement en bois n'est possible qu'au niveau de l'exploitation.

Quant au fossé isohypse, imposé par le pouvoir colonial et abandonné après l'indépendance, il fait depuis un certain nombre d'années objet de regain d'attention de la part des pouvoirs publics et de différents projets agricoles au Burundi. Une recherche d'accompagnement s'avérait nécessaire en vue d'éclairer les décideurs sur les avantages et inconvénients de cette méthode en comparaison avec la haie mixte agroforestière. L'étude de la rentabilité financière de l'application des techniques proposées avait pour but de mettre en évidence les coûts engagés et les bénéfices générés par l'affectation des ressources (intrants agricoles et main d'œuvre). Ainsi, la perte d'espace cultivable par le creusement de fossés rentre dans le scénario 2 de l'étude de rentabilité financière de ce genre de technique.

Les résultats de cette recherche pourront servir aux décideurs du Ministère en charge de l'agriculture et aux projets de développement agricoles dans le choix des méthodes de lutte antiérosive à vulgariser. Des pistes de recherches approfondies sont aussi envisageables selon les résultats.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### a. Zone d'étude

L'étude a été conduite dans la zone densément peuplée du Nord du Burundi dans les provinces de Ngozi et Kayanza, respectivement en communes Gashikanwa (Colline Buhoro) et Matongo (Colline Bihunge) (Figure 1).

Le site de recherche en commune Matongo se trouve dans la partie région naturelle du Mugamba caractérisée par une altitude comprise entre 1900 et 2500 m, un relief montagneux avec des pentes allant jusqu'à 50°, un climat relativement tempéré (température variant entre 14 et 15 °C.) et une pluviosité moyenne annuelle comprise entre 1300 et 2000 mm. Les sols de la commune Matongo sont des ferrisols anthropiques argileux et améliorés par des labours fréquents et des apports organiques. Ils ont une bonne productivité mais nécessitent une protection contre l'érosion (République du Burundi, 2008).

La commune Gashikanwa est située au centre de la province Ngozi non loin du chef-lieu de cette dernière. Elle fait partie de la région naturelle de Buyenzi qui se caractérise par une altitude moyenne comprise entre 1.500 et 1.900 m, un climat tropical humide avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 1.200 et 1.500 mm. Les températures moyennes se situent entre 17 et 20°C. Les sols de Gashikanwa sont argileux, lourds et fertiles. Sur les pentes, les sols sont peu profonds et exposés à l'érosion (République du Burundi, 2008). Sur le site expérimental, l'analyse d'un profil pédologique ouvert et analysé par les auteurs révèle, entre autres, une pierrosité de surface (15%) et un horizon humifère peu prononcé en raison d'une faible teneur en matière organique.

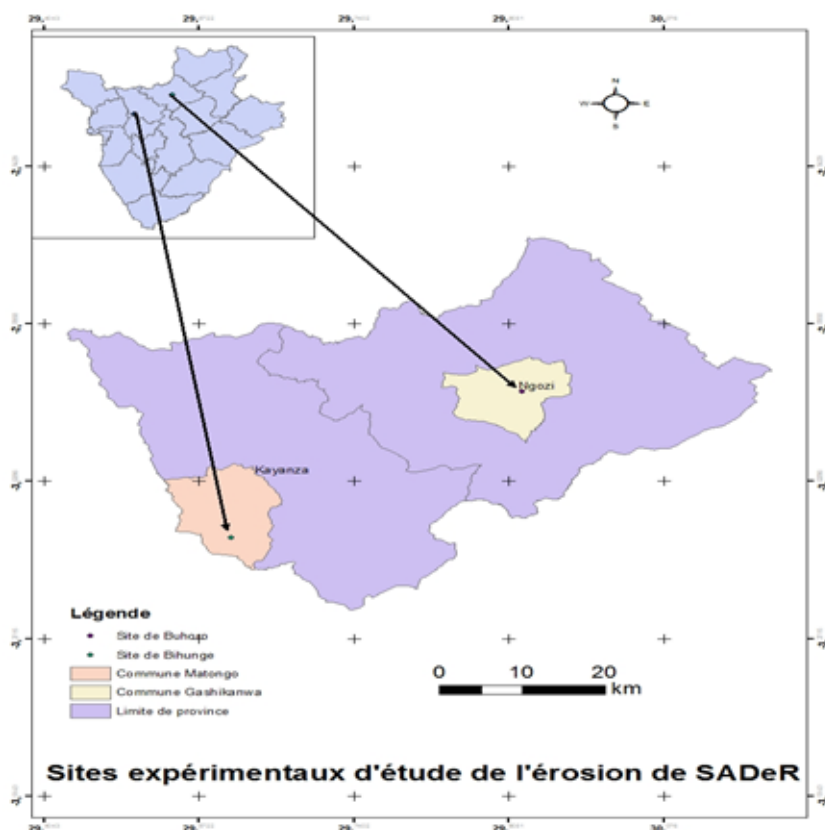


Figure 1. Situation géographique des sites d'étude (Auteurs, 2015)

## b. Dispositifs expérimentaux

Choix des exploitations pour l'expérimentation : L'expérimentation a été réalisée dans deux exploitations agricoles remplissant les critères de pente (> 30%), accessibilité (distance et accès par rapport à la voie principale macadamisée), disposition du propriétaire à collaborer et à rendre disponible son champ pour la recherche pour une longue période (10 ans au moins). Signalons que les propriétaires des champs expérimentaux recevaient un loyer annuel ainsi que la totalité des récoltes après la mesure des productions par les chercheurs.

### **Description des installations dans chaque site.**

Le dispositif expérimental de Gashikanwa a été installé en novembre 2014 sur une pente moyenne de 41 %. Sa superficie est de 298 m<sup>2</sup> (29,8 m x 10 m). Il est constitué de 4 parcelles séparées verticalement par des murets en maçonnerie de 70 à 30 cm de haut en moyenne de l'amont à l'aval pour empêcher l'échange des eaux et des sédiments érodés d'une parcelle (traitement) à l'autre. Un muret était aussi construit en amont du dispositif, adjacent à une rigole, pour éviter que les sédiments érodés de la partie amont ne puissent pénétrer dans le dispositif expérimental.

En aval du dispositif, chaque parcelle est reliée, par des tuyaux en PVC, à 3 fûts interconnectés qui recueillent l'eau et les sédiments ruisselés. Les quatre parcelles sont, de gauche vers la droite, décrites comme suit :

La parcelle 1 dite traditionnelle est symbolisée par G1. Elle ne comporte aucune mesure de lutte antiérosive et est donc considérée comme témoin pour cette étude. Elle bénéficie du même type d'intrants que les autres parcelles (semences améliorées, fumier et engrais, chaux et produits phytosanitaires) ;

La parcelle 2 (G2) comprend 3 haies mixtes isohypses espacées de 8 m compte tenu de la pente du terrain (41%). Chaque haie a une longueur de 10 m et une largeur de 2 m. Elle est composée, de l'aval vers l'amont, de 2 lignes de Bana grass espacées de 50 cm avec un écartement de 50 cm dans la ligne, d'une ligne de Calliandra calothyrsus avec un espacement de 50 cm dans la ligne et entre la dernière ligne de Bana grass et le calliandra+ des arbres de Grevillea espacés de 4 m dans la même ligne que le calliandra. Chaque parcelle est composée de 3 haies, délimitant ainsi 4 sous parcelles. La sous-parcelle a été utilisée comme répétition pour le traitement statistique des données de rendement des cultures.

La parcelle 3 (G3) est une combinaison de la haie mixte et d'un fossé isohypse. Chaque fossé a 50 cm de largeur x 50 cm de profondeur, conformément aux directives du Ministère en charge de l'agriculture.

La parcelle 4 dite de Wischmeier fait 100 m<sup>2</sup> (20x5 m). C'est le témoin pour les études de pertes en terre faisant objet d'une étude séparée. Elle est régulièrement nettoyée de toute végétation.

A Matongo, le dispositif a une superficie de 252 m<sup>2</sup> (31,5 x 8 m) sur une pente de 42 %. Il est construit de la même manière que celui de Gashikanwa mais possède une parcelle en plus : celle d'un fossé isohypse seul (non combiné à une haie). De plus, la haie mixte comprend une double ligne de Calliandra, ce qui fait que la largeur de la haie est de 2.5 m. Les traitements sont ainsi symbolisés : M1 (parcelle non aménagée), M2 (parcelle à haie mixte), M3 (parcelle à haie combinée au fossé isohypse), M4 (Parcelle à fossé isohypse seul).

## c. Méthodologie de collecte des données de biomasse de la haie et des rendements des cultures

### **Mesure de la biomasse des composantes de la haie mixte et estimation de leurs recettes**

Le bana grass et le calliandra ont été coupés pour la 1ère fois respectivement après 6 mois et 1 année après la plantation. Par la suite, le Bana grass a été coupé tous les 3 mois à 10 cm et le calliandra à 30 cm tous les 4 à 6 mois suivant les saisons. Les produits de chaque haie étaient collectés et pesés. Ils étaient composés de biomasse foliaire de Bana grass et de calliandra ainsi que des tiges de Calliandra. Toute la biomasse était récupérée par le

propriétaire du terrain pour l'alimentation du bétail et/ou la vente. Les tiges de calliandra sont utilisées comme bois de chauffe ou tuteurs pour le haricot volubile suivant leur hauteur. Les feuilles de Calliandra sont incorporées dans les blocs à lécher pour le bétail, avec l'aide de certains projets de développement qui dispensent des formations en la matière. Etant donné que les feuilles de calliandra ne sont pas habituellement vendues, nous avons considéré cette forme d'utilisation pour calculer la valeur de la biomasse foliaire du calliandra : 10 kg de feuilles fraîches donnent 3kg de poudre dont 1 kg coûte 1200 francs burundais (BIF) à la coopérative « Karorerokeza de Gashikanwa). Pour les tiges de Calliandra, 1 fagot de 25 à 28 kg coûte 2000 francs burundais à Matongo.

Une botte de Bana grass de 20 kg coûte 1000 à 1500 BIF (saison pluvieuse ou sèche), au marché de Bandaga proche du dispositif de Matongo. La valeur du bois du grevillea a été calculée à partir des paramètres dendrométriques (circonférence à hauteur de poitrine (C 1,30 m) et hauteur totale des arbres. Les recettes y relatives ont été considérées pour l'année 2023 seulement sur base du volume sur pied auquel on a appliqué le prix du bois de service fourni par l'Office Burundais pour la protection de l'Environnement (OBPE).

### Evaluation du rendement du maïs et de la pomme de terre

Les épis de maïs étaient récoltés dans chaque parcelle, ligne par ligne et pesés. Le poids des épis a été converti en poids des grains en appliquant un taux d'égrenage de 0,67 (Kaboneka et al, 2021). Les quantités, par sous-parcelles et par parcelles ont été ramenées à l'ha. Comme pour le maïs, la récolte de la pomme de terre a été faite ligne par ligne et mesurée à l'état frais et les quantités par sous- parcelles et par parcelles ramenées à l'ha.

### Analyse statistique des rendements

Les données ont été analysées avec le logiciel R, version 4.1.2. L'unité d'analyse était la sous-parcelle. L'analyse statistique des données a d'abord consisté au calcul des statistiques descriptives (effectif, minimum, moyenne, déviation standard, maximum) du rendement de la pomme de terre (kg/ha) et de celui du maïs (kg/ha) à Gashikanwa globalement et selon la technique de lutte anti-érosive (haie combinée fossé, haie seule et témoin). Ensuite, le rendement moyen a été comparé selon la technique de lutte anti-érosive à l'aide des boîtes à moustaches et des barres d'erreurs d'une part et à l'aide d'une analyse de la variance à effet aléatoire en prenant le rendement comme variable dépendante, la technique de LAE comme facteur et l'année comme source d'erreur. La même analyse a été faite pour Matongo en y ajoutant la modalité « fossé seul » comme technique de lutte anti-érosive.

## 3. ANALYSE DE LA RENTABILITE FINANCIERE

La rentabilité financière de l'application des techniques de lutte antiérosive proposées a été évaluée au moyen de la Valeur actuelle nette (VAN) et du taux de rentabilité interne (TRI) selon les formules (1) et (2) :

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{R_t - (CE_t + I_t)}{(1+i)^t}$$

Où  $R_t$  désigne les recettes brutes totales annuelles à l'année  $t$

$CE$  désigne les charges d'exploitation annuelles à l'année  $t$

$I_t$  désigne les charges d'investissement annuelles à l'année  $t$

Une technique de lutte antiérosive est considérée comme financièrement rentable si la  $VAN > 0$  ; plus la  $VAN$  s'éloigne de zéro plus la technique est financièrement rentable. Ainsi, avec une série de techniques antiérosives en étude comparée, la plus rentable financièrement est celle qui présente la  $VAN$  la plus élevée.

$$TRI = i/VAN = 0$$

Le TRI sera comparée au taux d'acquisition du capital. Etant donné que ces techniques sont installées en milieu rural au Burundi, le taux d'acquisition du capital à prendre en considération est celui pratiqué par la Fédération Nationale des Coopératives d'Épargne et de Crédit au Burundi (FENACOBUR) dans le financement agricole. Les taux d'intérêts moyens annuels pratiqués sur les prêts accordés sont de l'ordre de 16%, soit 8% sur une période de 6 mois. Une étude comparée des techniques antiérosives basée sur cet indicateur accorde la primauté à celle dont le TRI surpasse de loin le taux d'acquisition du capital. Pour des techniques ayant des TRI qui surpassent largement le taux d'acquisition du capital, la priorité d'identification des meilleures pratiques de lutte antiérosive sera accordée à la VAN. Les recettes brutes proviennent des productions des cultures (maïs et pomme de terre) ainsi que des produits de coupe des éléments de la haie (biomasse foliaire de bana grass et du calliandra, tiges de calliandra).

Pour les prix des cultures, nous avons considéré ceux des bulletins mensuels fournis par l'Institut National de la Statistique du Burundi (INSBU) anciennement connu sous le nom de l'Institut de Statistiques et d'Études Économiques du Burundi (ISTEEBU) pour les localités concernées par cette étude. Le prix moyen du kg de pomme de terre a varié entre 600 et 1000 francs burundais (0.37 à 0.35 dollar américain) respectivement en 2015 et 2023 tandis que le maïs a coûté entre 700 et 1000 francs burundais /kg pour la même période.

Les recettes de la biomasse des haies ont été calculées à partir des prix des marchés locaux comme décrit ci-haut (Point 2c).

Les charges d'exploitations sont les dépenses liées aux intrants (semences de maïs et plançons de pomme de terre, fumier, engrais, chaux, produits phyto), l'achat du matériel végétal et mise en place des haies mixtes, la main d'œuvre pour la préparation du terrain, le creusement des fossés isohypses, l'entretien et la récolte des cultures, la coupe des éléments de la haie, l'élagage du grevillea ainsi que le curage des fossés. Le coût de la main d'œuvre est passé du simple au double entre 2015 et 2024 (2000 à 4000 BIF). De même, le prix du fumier de ferme a beaucoup évolué entre le début et la fin de l'expérimentation (40000 à 120 000 BIF/T).

Les investissements ont été considérés comme nuls dans cette étude. Les taux d'actualisation (i) de 10%, 15%, 24 % utilisés correspondent aux taux d'intérêt appliqués par les banques et les Institutions de micro-finance au Burundi dans l'acquisition des capitaux.

## 4. RESULTATS ET INTERPRETATION

### a. Effets des techniques de lutte anti-érosive sur les rendements de la pomme de terre et du maïs

#### 3.1.1. Résultats au dispositif expérimental de Gashikanwa

##### 1. Effets comparés de la haie mixte et de la haie combinée au fossé isohypse sur le rendement de la pomme de terre

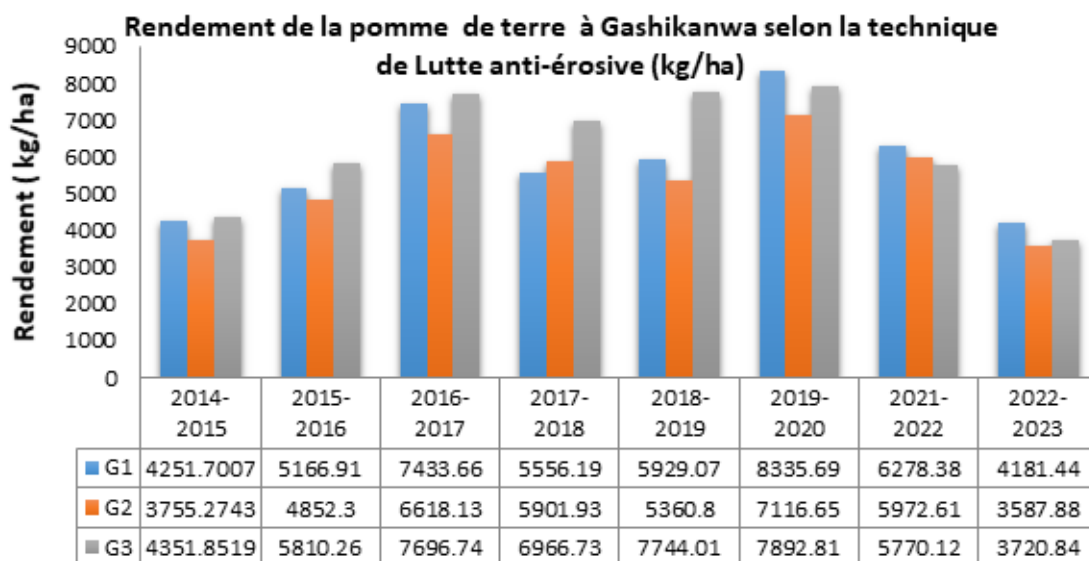
La figure 2 donne les rendements par parcelle et par hectare de la pomme de terre à Gashikanwa pendant la période d'expérimentation. On constate qu'avec la culture de pomme de terre, pendant les 5 premières années sur huit de la durée de l'essai, la technique de haie mixte combinée au fossé isohypse donne systématiquement les meilleurs rendements. Les suppléments de rendements par rapport à la parcelle non aménagée peuvent aller jusqu'à 30.6 % (cas de l'année 2018-2019).

La technique de haie mixte seule affiche des rendements inférieurs à ceux de la parcelle non aménagée (différence pouvant aller jusqu'à 13 %) et l'écart se creuse davantage par rapport à la technique de haie combinée avec le fossé pour laquelle le supplément de rendement va jusqu'à 44 % selon les années.

Lorsqu'on analyse les rendements ligne par ligne, on constate une forte baisse autour de la haie. Cela dénote d'une concurrence de la haie vis-à-vis de la culture de pomme de terre. Cette concurrence est plus accrue en amont de la haie où les rendements sont presque 1/3 à 1/6 de ceux de la parcelle non aménagée (cas des lignes 2 et 3 du tableau 1). Le tableau 1 montre aussi que lorsque la haie est combinée à un fossé, on observe des rendements élevés dans les lignes en aval du fossé (lignes 7 et 8 du tableau 1-colonne G3), ce qui pourrait expliquer les meilleurs rendements totaux dans les parcelles à haie combinée au fossé isohypse. D'une part, on dirait que le fossé agit comme un cernage faisant barrière aux racines en aval de la haie ; d'autre part, on pourrait penser que les lignes en aval du fossé bénéficient d'une humidité plus accrue et plus durable suite à l'infiltration des eaux de pluie au niveau du fossé. Cette disponibilité de l'eau contribuerait à une meilleure production sur ces lignes.

Au cours de la dernière année de l'expérimentation (2022-2023), non seulement les rendements sont bas mais aussi ceux des parcelles aménagées sont inférieurs à ceux du témoin. La diminution des productions pourrait s'expliquer par le changement de variété (Ndinamagara au lieu de Victoria) suite à la non disponibilité des semences de la variété habituellement cultivée (victoria) et recommandée par l'ISABU pour la zone d'étude. Une autre raison pourrait être une perturbation du régime pluviométrique au courant de la saison agricole. Une analyse des précipitations montre (Figure 3) que la saison B 2022-2023 a connu un mauvais début de par une absence de pluies de début mars au 3<sup>e</sup> décennie de ce mois de plantation de la pomme de terre. Ce déficit pluviométrique serait préjudiciable à la croissance de la plante. La saison a également connu 15 événements pluvieux de plus de 20 mm/jour et 3 événements extrêmes (plus de 40 mm/jour) dont un très extrême (75.3 mm/jour). De telles pluies occasionnent plus de ruissellement et d'érosion que d'infiltration. La culture n'en profite que très peu. Bien plus, la fin de saison a été précoce (début mai).

Finalement, malgré une quantité totale excédentaire de 831,2 mm (exigence de 500 à 600 mm/cycle pour la pomme de terre), la grande partie a ruisselé et n'a pas profité aux cultures. En cas de déficit hydrique, il y aurait une forte compétition pour l'eau entre la haie et la culture dans les parcelles aménagées, ce qui expliquerait des rendements inférieurs par rapport à la parcelle sans haie.



**Figure 2. Rendement de la pomme de terre selon le traitement à Gashikanwa**

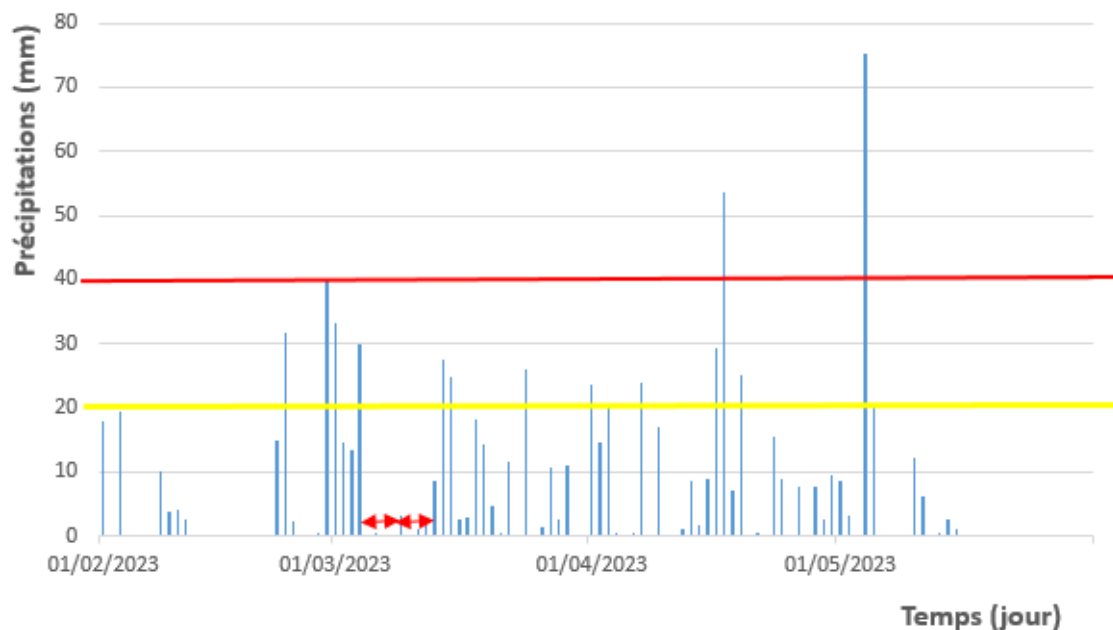


Figure 3. Précipitations de la saison culturale 2023B à Matongo

Tableau 1. Production (kg) comparée ligne par ligne de la pomme de terre à Gashikanwa (2018-2019)

N° Ligne	G1	G2	G3
1	5,065	3,58	4,235
2	6,005	2,13	2,8
3	6,845	2,14	1,125
4	6,87	Haie	Haie
5	7,3	Haie	Haie
6	4,665	3,435	Fossé
7	4,555	5,81	7,99
8	5,515	7,2	10,39

La comparaison des rendements moyens de la pomme de terre à Gashikanwa selon la technique de lutte anti-érosive à l'aide des boîtes à moustaches et des barres d'erreurs a été faite sous le logiciel R (version 4.1.2). Les rendements moyens semblent différents selon la technique appliquée (Figures 4 et 5) et ils sont plus élevés lorsque la haie combinée avec le fossé est utilisée. Cependant, il n'y a pas de différence significative au regard des intervalles de confiance à 95 %

des rendements moyens. Au seuil de 5 %, il n'y a pas d'effet significatif de la technique de LAE sur le rendement de la pomme de terre à Gashikanwa ( $F=0,48$  ;  $p\text{-value}=0,621$ ).

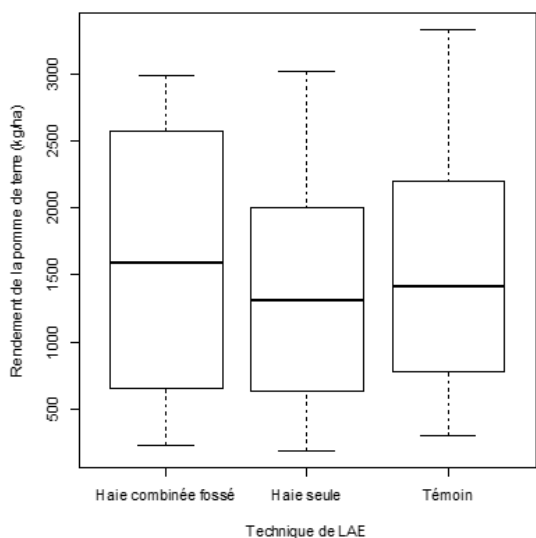


Figure 4. Boîtes à moustaches du rendement de la pomme de terre à Gashikanwa

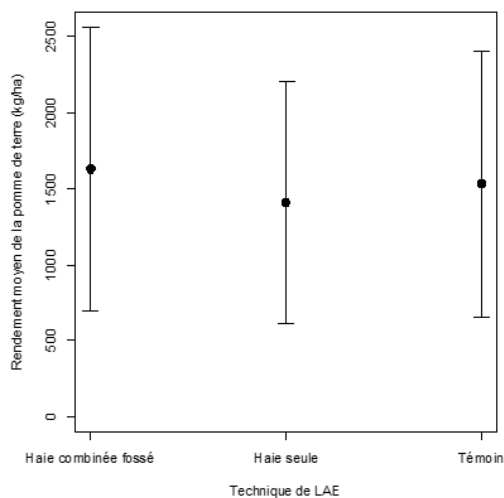
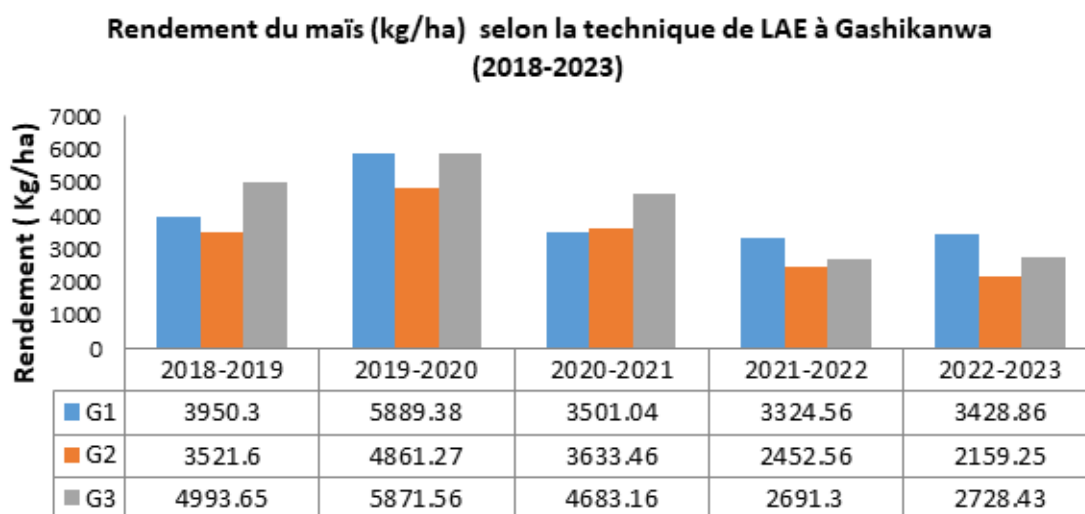


Figure 5. Barres d'erreurs du rendement de la pomme de terre à Gashikanwa

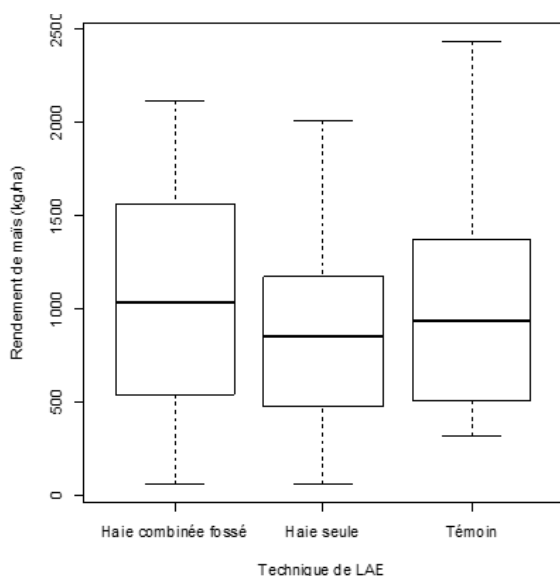
## 2. Effets comparés de la haie mixte et de la haie combinée au fossé isohypse sur les rendements du maïs à Gashikanwa

Comme pour la pomme de terre, on observe (Figure 6) un avantage de la parcelle à haie combinée au fossé dont le supplément de rendement peut aller jusqu'à 33.7 % par rapport à la parcelle témoin et à 42 % par rapport à la parcelle à haie seule. Mais au cours des deux dernières années de l'expérimentation, les parcelles aménagées ont des rendements inférieurs à ceux de la parcelle non aménagée. Les perturbations des pluies seraient à l'origine de ces différences. Pour la saison A 2021-2022, il y a eu un mauvais démarrage : deux périodes de plus de 10 jours consécutifs sans pluies au mois d'octobre, de même qu'au mois de novembre. Ce sont des périodes de stress hydrique pour la plante. En 2022-2023, une période de 10 jours consécutifs sans pluies au mois de septembre, de même qu'au mois d'octobre. C'est aussi un mauvais démarrage de la saison. Il y a eu également 8 événements pluvieux de plus de 20 mm/jour pouvant causer d'importants dégâts au sol et provoquer plus du ruissellement que d'infiltration. Les ressources limitées en eau aggravent la compétition haie-culture, d'où des rendements bas dans les parcelles à haie mixte par rapport au témoin.

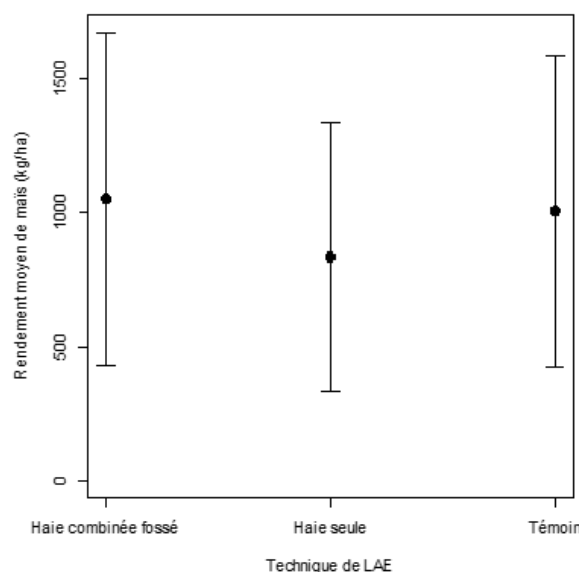


**Figure 6. Rendement du maïs à Gashikanwa selon le traitement de 2018 à 2023**

Comme pour la pomme de terre, l'analyse au logiciel R montre que les rendements moyens du maïs diffèrent selon la technique utilisée à Gashikanwa (Figures 7 et 8) et sont plus élevés lorsque la haie combinée avec le fossé est utilisée. Cependant, il n'y a pas de différence significative au seuil de 5 % (Fobs=0,96 et P-value= 0,390).



**Figure 7. Boîtes à moustaches du rendement du maïs à Gashikanwa**



**Figure 8. Barres d'erreurs du rendement de maïs à Gashikanwa**

### 3.1.2. Résultats de la comparaison des rendements au dispositif expérimental de Matongo

#### 3.1.2.1. Effets comparés de la haie mixte (M2), de la haie combinée au fossé isohypse (M3) et du fossé isohypse seul (M4) sur les rendements de la pomme de terre et du maïs à Matongo

Les rendements ramenés à l'hectare au cours de la période d'expérimentation se présentent dans l'ordre : M4 > M1 > M3 > M2. La technique de fossé isohypse seul donne les meilleurs rendements, que ça soit pour la pomme de terre ou le maïs, suivie par le témoin (Figures 9 et 10). Les rendements des parcelles aménagées au moyen des techniques avec haie (haie seule ou haie combinée avec le fossé isohypse) sont même inférieurs à ceux de la parcelle non aménagée sauf pour la première année où les haies s'installent encore. Ainsi, au cours de la saison agricole 2018-2019 qui semble correspondre à une bonne production pour la pomme de terre, M4 a donné un rendement de 12323 kg/ha contre 9544 kg/ha et 9268 kg/ha respectivement pour M3 et M2, soit un supplément de rendement de 29% et 32 %. Le rendement du témoin (M1) est de 12187 kg/ha, soit un supplément de 31 % et de 28% respectivement par rapport à M2 et M3. Rappelons que sur ce site de Matongo, la haie occupe 2.5 m de large contre 2 m à Gashikanwa, du fait de la double ligne de Calliandra.

Lorsqu'on analyse les rendements ligne par ligne, on remarque une baisse au niveau des lignes autour des haies plus importante qu'à Gashikanwa. Les rendements sont trop bas pour les parcelles aménagées avec haies (exemple : 0,6 kg (M2) à 1,1 Kg (M3)) contre 4,4 kg et 5,5 kg respectivement pour M1 et M4 (Tableau 5, Ligne 30) en 2018-2019. Ces résultats montrent que, la concurrence haie-culture, déjà élevée avec une haie d'une largeur de 2 m (Gashikanwa) s'exacerbe lorsque sa largeur passe à 2,5 m (Matongo).

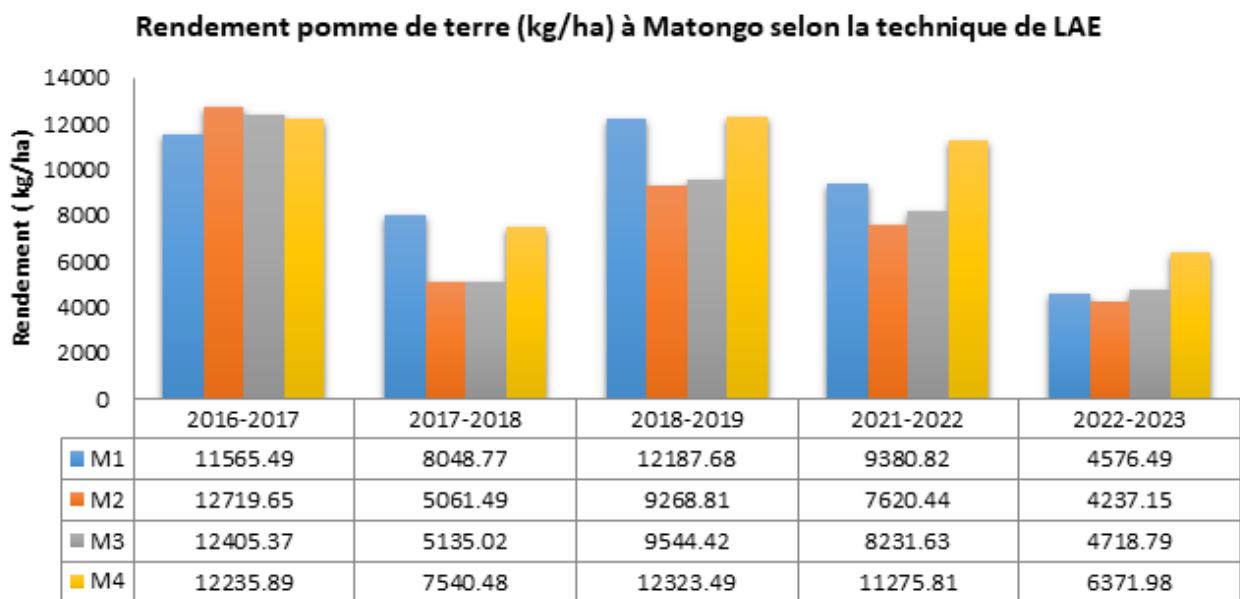


Figure 9. Rendement de la pomme de terre à Matongo selon la technique de lutte anti-érosive

## Rendement du maïs à Matongo selon la technique de LAE

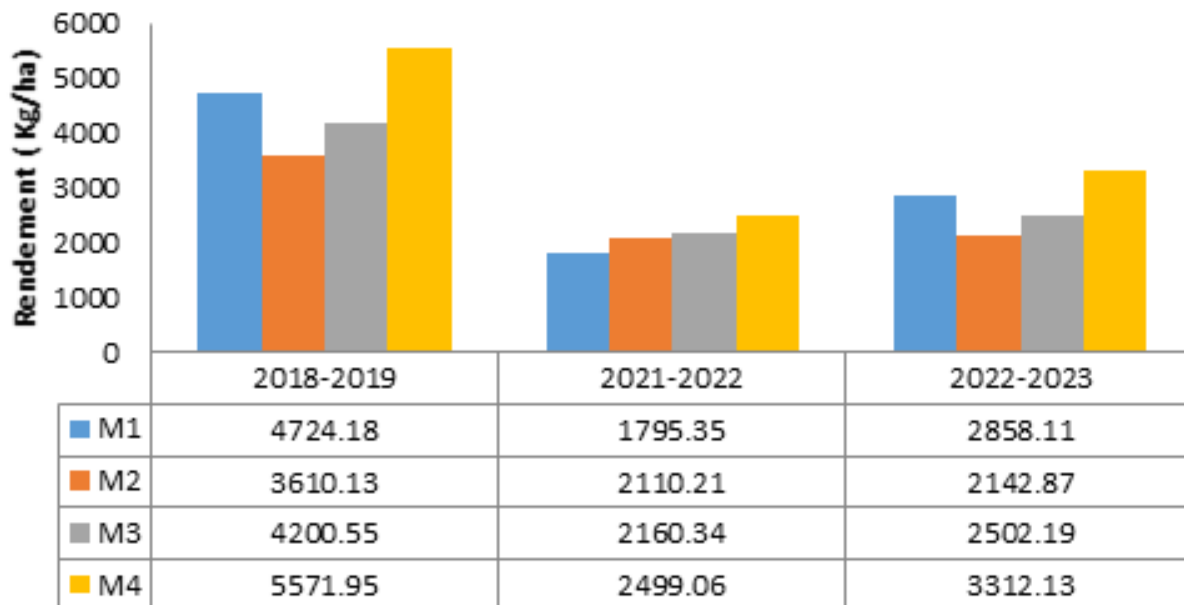


Figure 10. Rendement du maïs à Matongo selon la technique de lutte anti-érosive

Tableau 5. Production (kg) comparée ligne par ligne du maïs à Matongo (2018-2019)

N° Ligne	M1	M2	M3	M4
28	4,208	3,312	4,388	5,344
29	3,732	3,190	4,496	6,854
30	4,424	0. 670	1,178	5,582
31	4,744	Haie	Haie	6,468
32	4,720	Haie	Haie	4,592
33	5,032	Haie	Haie	4,446
34	4,896	0.792	Fossé	Fossé
35	4,440	3,086	3,650	4,160
36	4,186	3,710	3,906	4,790

Les rendements moyens de la pomme de terre semblent différents selon la technique utilisée à Matongo (Figure 11 et 12) et ils sont plus élevés lorsque le fossé seul est utilisé. Cependant, il n'y a pas de différence significative au seuil de 5% (Fobs = 1.44 et P-value=0.239).

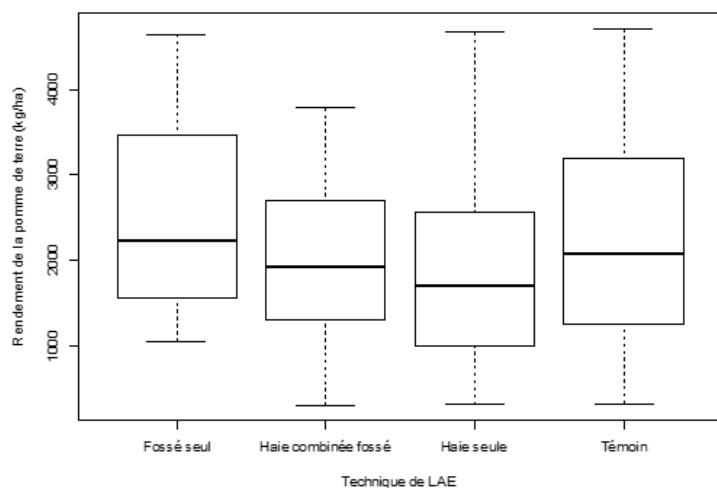
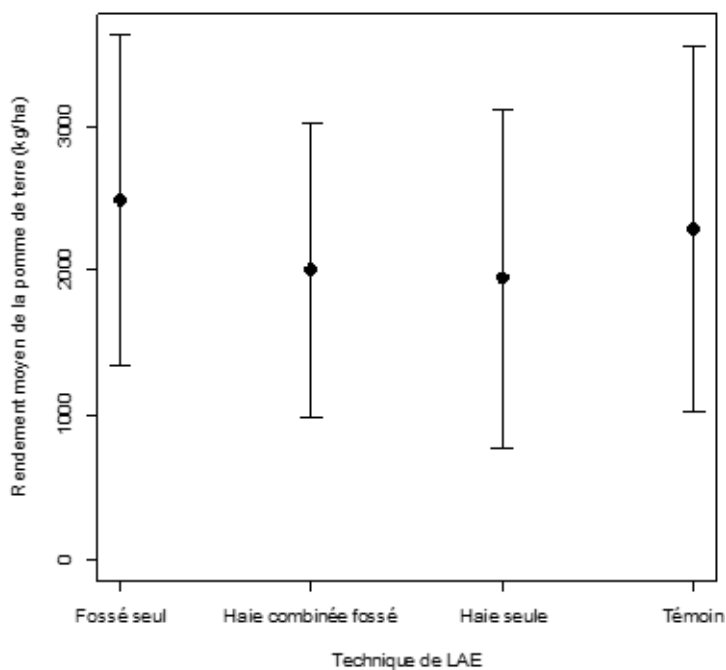


Figure 11. Boîtes à moustaches du rendement de la pomme de terre à Matongo



L'analyse sous R des rendements moyens du maïs à Matongo montre qu'ils semblent différents selon la technique utilisée et sont plus élevés lorsque le fossé seul est utilisé (Figures 13 et 14). Cependant, il n'y a pas de différence significative au regard des intervalles de confiance à 95 % des rendements moyens ( $F_{obs} = 2,08$  et  $P\text{-value} = 0,117$ ).

Figure 12. Barres d'erreurs du rendement de la pomme de terre à Matongo

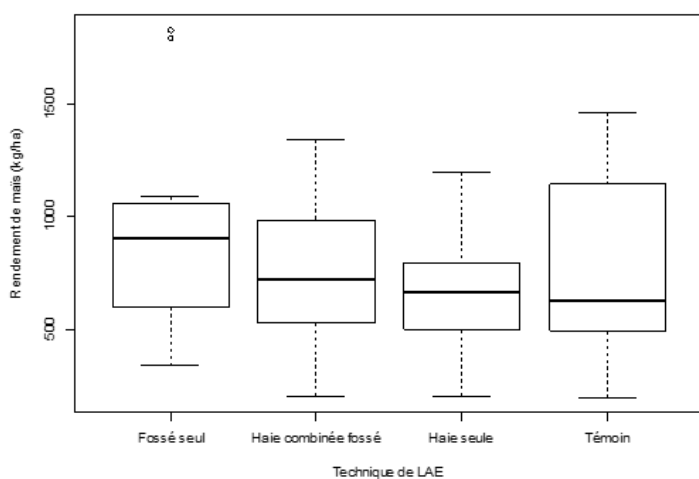


Figure 13. Boîtes à moustaches du rendement du maïs à Matongo

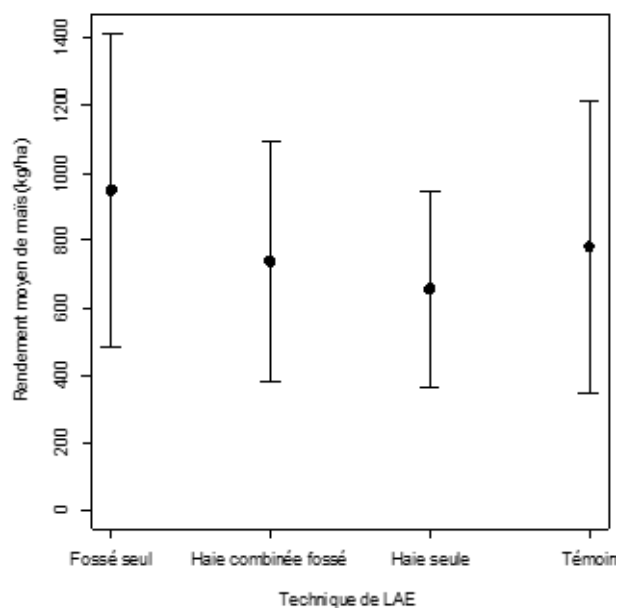
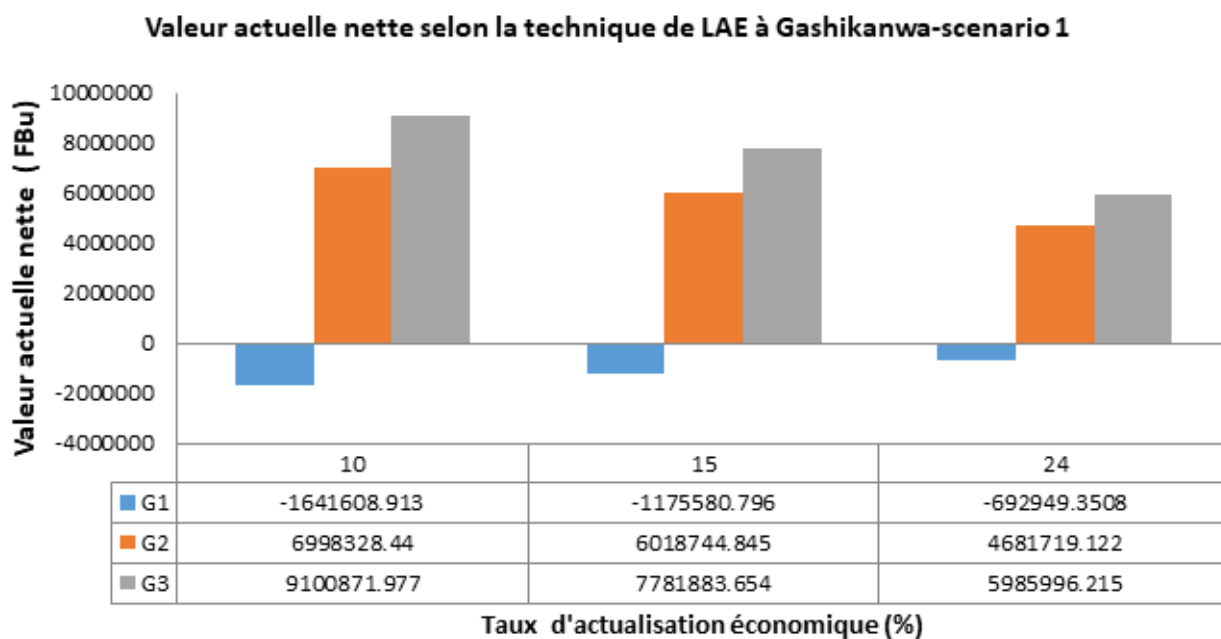


Figure 14. Barres d'erreurs du rendement de maïs à Matongo

b. Rentabilité financière de l'application des techniques de lutte antiérosive

**i. Rentabilité financière au dispositif expérimental de Gashikanwa- scenario 1**

Rappelons que dans le scenario 1, le calcul de la valeur actuelle nette ne tient pas compte de la valeur monétaire de l'espace perdu par l'aménagement des fossés isohypses. On voit ainsi que sous un tel scenario la technique de haie combinée au fossé présente une VAN plus élevée (1,3 fois) que la haie seule (Figure 15). La VAN est négative pour la parcelle témoin. Sa mise en valeur consomme plus de ressources qu'elle n'en produit.



**Figure 15. Rentabilité financière de l'application des techniques de Lutte antiérosive au dispositif expérimental de Gashikanwa - scenario 1**

**ii. Rentabilité financière au dispositif expérimental de Gashikanwa – scenario2**

Dans le scenario 2, le coût de la superficie cultivable perdue à cause des fossés est comptabilisé dans le calcul de la VAN. On constate (Figure 16) que la technique de fossé isohypse combiné à la haie devient trois à six fois moins rentable que la haie seule, ce qui n'était pas le cas dans le scenario 1. Le TRI (taux de rentabilité interne) pour G3 passe de 566 % (scenario 1) à 1.37 % (scenario 2).

### Valeur actuelle nette selon la technique de LAE à Gashikanwa -scenario 2

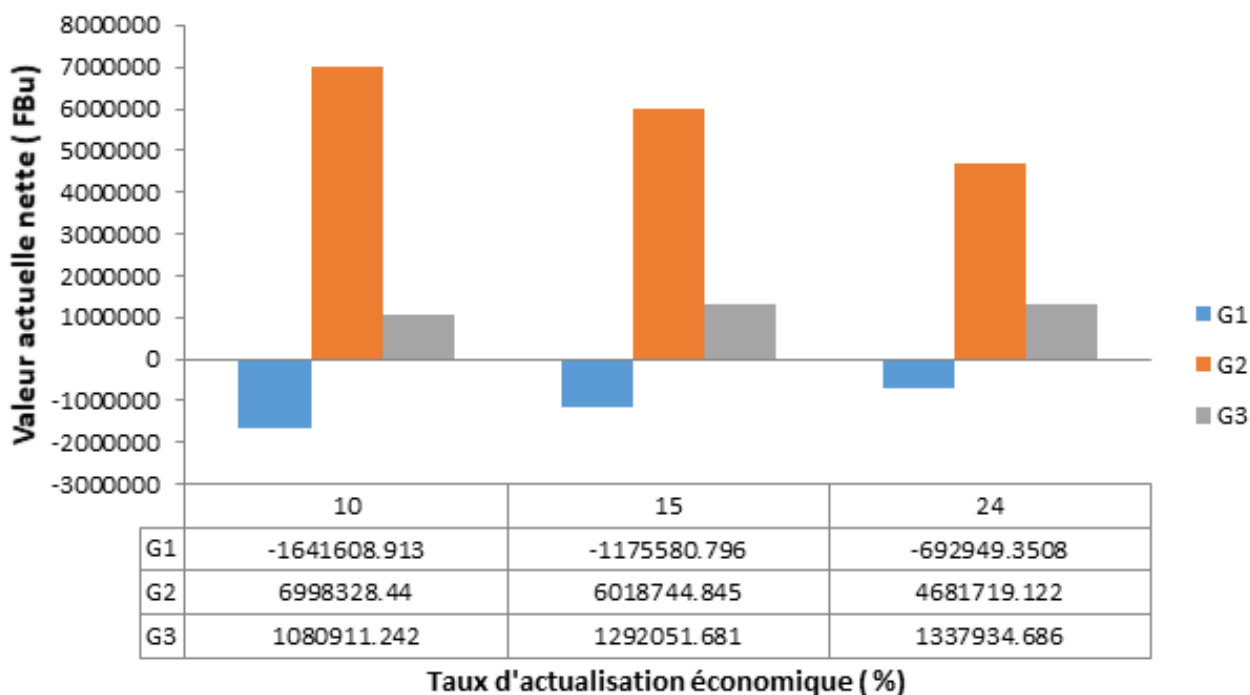


Figure 16. Rentabilité financière de l'application des techniques de Lutte antiérosive au dispositif expérimental de Gashikanwa – scenario 2

### iii. Rentabilité financière –dispositif expérimental de Matongo-scenario 1

A Matongo, la valeur actuelle nette est en général plus élevée qu'à Gashikanwa du fait des rendements plus élevés, surtout de la pomme de terre. Lorsqu'on compare les valeurs de la VAN selon les techniques de lutte antiérosive, on constate (figure 17) que les parcelles aménagées avec fossé isohypse seul et fossé isohypse combiné à la haie ont une rentabilité équivalente, supérieure à celle de la haie seule et de l'option sans aménagement.

La parcelle non aménagée (M1) est la moins rentable. Pour la parcelle à haie seule (M2), la faible performance au niveau des rendements due à la concurrence haie-cultures est compensée par les produits de la biomasse des agroforestiers (bana grass, calliandra et Grevillea), ce qui accroît sa rentabilité par rapport à la parcelle non aménagée.

### Rentabilité financière selon la technique de lutte anti-érosive à Matongo-scenario 1

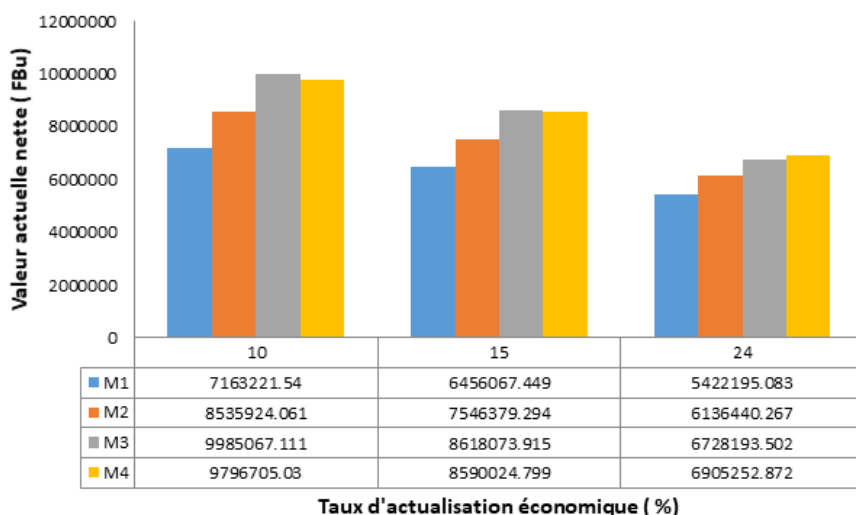
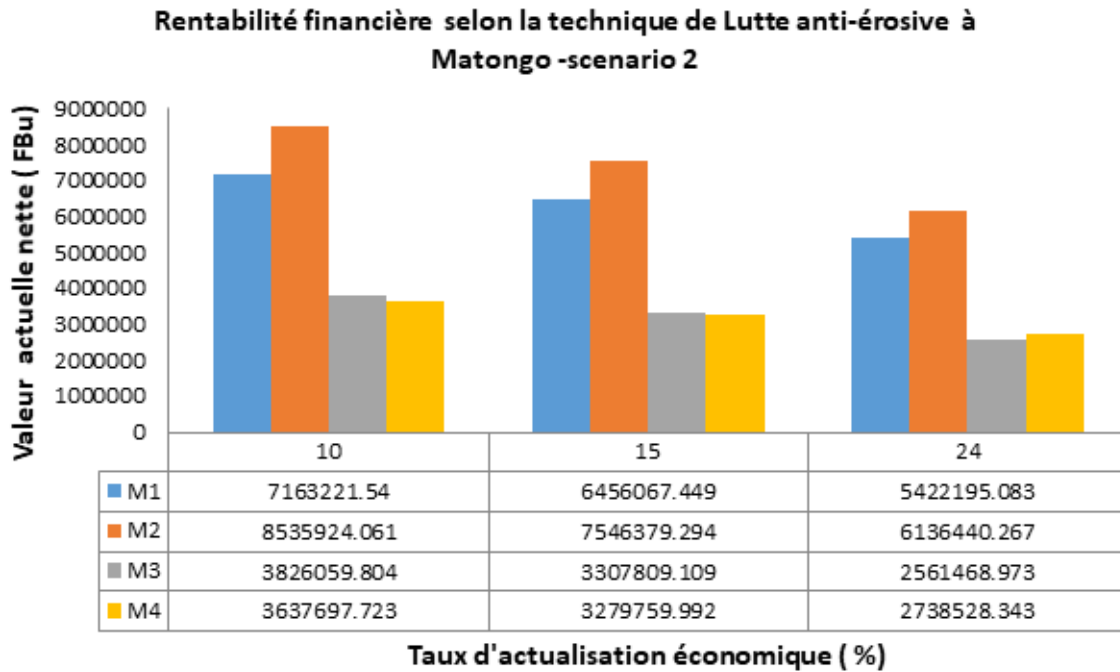


Figure 17. Rentabilité financière au dispositif expérimental de Matongo selon la technique de lutte anti-érosive-scenario 1

### 3.3.4. Rentabilité financière –dispositif expérimental de Matongo-scenario 2

Avec la prise en compte de la superficie perdue par l'aménagement des fossés (évaluée à 5 ares/ha, soit 5%), les techniques à fossé isohypse deviennent 2 fois moins rentables que l'aménagement à haie seule quel que soit le taux d'actualisation économique considéré. Ils restent, cependant, plus rentables que le témoin (Figure 18).



**Figure 18. Rentabilité financière au dispositif expérimental de Matongo selon la technique de lutte anti-érosive-scenario 2**

## 4. DISCUSSION DES RESULTATS

### a. Effets des techniques de LAE sur les rendements

A Gashikanwa, aussi bien pour le maïs que pour la pomme de terre, on observe un avantage de la technique de haie mixte combinée au fossé isohypse par rapport à la haie seule. Les rendements sous cette dernière technique sont même inférieurs à ceux de la parcelle non aménagée. L'analyse ligne par ligne montre que les 2 lignes proches de la haie, présentent des rendements de 1/3 à 1/6 de ceux de la parcelle témoin. Cela dénote d'une concurrence entre les éléments de la haie et la culture associée.

Nos résultats sont en cohérence avec ceux de plusieurs recherches antérieures qui ont rapporté l'influence négative de la haie vive sur les rendements. Ainsi, Diatta et al. (2001) ont trouvé que le rendement du mil, dans un bassin versant de Thyssé-Kaymor Sénégal, diminuait à mesure qu'on s'approchait de la haie vive. Au voisinage immédiat de la haie vive (0,5 m), le rendement de mil était des plus bas. Ils ont conclu à l'existence d'un effet dépressif de la haie vive sur la culture attribuable à une concurrence pour l'eau entre la haie et le mil. Une hypothèse d'effets allopathiques au niveau des racines des éléments de la haie contre les cultures associées a été également avancée.

De même, dans une recherche réalisée par Singh et al. (1989) en zone semi-aride de l'Inde, la croissance et les rendements du niébé et du sorgho en intercalaires avec des haies de *Leucaena* ont diminué de 150 à 30% par rapport à la culture pure, à mesure qu'on passait de 5 m à 0,3 m de la haie. Une barrière racinaire a annulé ces effets négatifs sur le rendement. Selon ces auteurs, la sévère diminution des rendements était imputable à la compétition pour l'eau en zone semi-aride. Au Burundi, dans la région du Mumirwa, Duchaufour et al. (1996) ont aussi noté l'influence négative de la haie mixte de *Calliandra/setaria* sur les rendements du maïs et du haricot se manifestant en cas d'appauvrissement du sol.

Il est à noter, à partir de ces recherches, que la limitation des ressources (eau, éléments nutritifs) constitue un facteur qui accroît la concurrence entre la haie vive et les cultures.

Dans la présente étude, les parcelles aménagées à la technique de haie combinée avec le fossé isohypse ont donné les meilleurs rendements. L'analyse ligne par ligne a montré que les rendements sont particulièrement élevés en aval du fossé. D'une part, on dirait que le fossé agit comme un cernage faisant barrière à la concurrence en aval de la haie et d'autre part, on pourrait penser que les lignes en aval du fossé bénéficient d'une humidité plus accrue et plus durable suite à l'infiltration des eaux de pluie au niveau du fossé. Cette disponibilité de l'eau contribuerait à une meilleure production sur ces lignes. L'augmentation de l'humidité pour la végétation près des fossés a été confirmée par Sneha et al. (2018) comme une des fonctions de ces fossés.

Nair (1993), cité par Duchaufour et al. (1996), recommande de pratiquer le cernage des racines du *Calliandra* afin de diminuer la compétition pour l'eau et les éléments nutritifs qui s'installe avec le développement des racines du *Calliandra*. La section des racines latérales du grevillea peut aussi être utile pour réduire la concurrence avec les cultures (Jackson et Ong, 1995). En effet, *Grevillea robusta* possède un système racinaire dimorphe, comportant à la fois des racines latérales et verticales, ce qui lui permet d'utiliser l'eau située en dessous de la zone racinaire des cultures, mais elle entre en concurrence avec les cultures si l'eau est disponible à des profondeurs moindres.

## b. Effet des techniques de lutte antiérosive sur la rentabilité financière

Longtemps évaluées pour leur effet sur la réduction des pertes en terres, les techniques de lutte antiérosive sont, dans cette étude, également comparées par rapport aux coûts engagés et aux bénéfices financiers que leur application pourrait générer à l'agriculteur.

A Gashikanwa, on compare les rendements issus des parcelles aménagées aux techniques de haie mixte (G2) et de haie mixte combinée au fossé isohypse (G3) à ceux de la parcelle non aménagée (G1). L'aménagement avec la haie combinée au fossé s'avère la plus rentable (supplément de 28 à 30% par rapport à G2) dans le scénario 1 qui ne prend pas en compte la compensation de la superficie perdue en aménageant les fossés. La VAN (Valeur Actuelle Nette) est dans l'ordre :  $G3 > G2 > G1$  quel que soit le taux d'actualisation économique considéré. En plus du rendement élevé en G3, les produits de coupe de la haie accroissent les recettes tirées des parcelles à haies. Leur contribution est chiffrée à 28 à 32 %. La valeur actuelle nette de la parcelle non aménagée est négative. Cette pratique consomme plus de ressources qu'elle n'en produit.

Avec le scénario 2, la superficie perdue en aménageant les fossés isohypses (évaluée à 5 ares/ha, soit 5%) est prise en compte dans les coûts en supposant que l'agriculteur peut s'acheter une superficie équivalente. Le prix d'acquisition foncière a varié de 200 000 à 600 000 francs burundais par hectare dans cette localité entre 2015 et 2023. Sous un tel scénario, l'application de la haie mixte seule devient 3 à 6 fois plus rentable que celle de la haie combinée au fossé. Ce résultat est sans doute à nuancer étant donné les avantages non chiffrés dont notamment la préservation des éléments nutritifs due à l'efficacité de la haie combinée au fossé dans la réduction des pertes en terre. Cela signifie des coûts évités quant à l'application de fertilisants ou d'amendements, un aspect qui mérite d'être approfondi.

A Matongo, en plus des techniques mises en œuvre à Gashikanwa, il y a le fossé isohypse seul. La rentabilité financière sous scénario 1 se présente dans l'ordre :  $M4 = M3 > M2 > M1$ . Comme à Gashikanwa, les techniques avec fossés sont ici aussi les plus rentables. La parcelle M4 doit sa rentabilité élevée aux meilleurs rendements suite à l'absence de compétition haie-culture et probablement à son efficacité contre l'érosion. Pour les parcelles avec haies, la contribution de la biomasse de la haie dans les recettes s'élève à 34 à 40 % étant donné l'apport supplémentaire de la deuxième haie de *calliandra*.

Sous le scénario 2, on remarque que, comme pour Gashikanwa, la parcelle à haie mixte prend le dessus sur les parcelles avec fossé isohypse. Ces dernières sont mêmes moins rentables que la parcelle sans aménagement.

Dans la pratique, ce scénario, bien que non envisagé par les vulgarisateurs et les projets de développement agricole, confirme les réticences de certains exploitants agricoles à l'adoption de la technique avec fossé isohypse à cause de cette perte de superficie cultivable, surtout dans des conditions d'exiguïté des terres cultivables. La valorisation des fossés par des cultures adaptées à des quantités importantes d'eau comme le bananier pourrait atténuer ces réticences.

## V. CONCLUSION

Les résultats de cette recherche montrent l'intérêt d'une combinaison de la haie mixte (Bana grass - Calliandra - Grevillea) à un fossé isohypse. Cette technique de lutte antiérosive a un effet positif sur les rendements de la pomme de terre et du maïs. A Gashikanwa, malgré des différences statistiquement non significatives au seuil de 5 %, les rendements des parcelles à haie combinée au fossé isohypse sont supérieurs à ceux des parcelles à haie seule et des parcelles non aménagées. Pour certaines années, les suppléments de rendements peuvent aller jusqu'à 30 % et à 44 % respectivement pour la parcelle non aménagée et celle à haie seule.

L'analyse des résultats des productions ligne par ligne montre une forte diminution en amont des haies aussi bien pour la haie seule que celle combinée au fossé. Pour la technique à haie seule, cette chute de production se retrouve aussi en aval. Par contre, une forte augmentation de production s'observe directement en aval du fossé. Cette situation serait attribuable à une humidité plus accrue résultant de l'infiltration des eaux de pluie au niveau du fossé mais aussi à un effet barrière du fossé qui agit comme un cernage pour les racines de la haie.

Cette technique de haie combinée au fossé mise en œuvre au Burundi par les projets de développement agricole et dont l'application est encouragée par les services publics du Ministère en charge de l'agriculture et de l'environnement n'avait pas encore fait objet de recherche scientifique.

Une analyse financière de l'application de ces techniques de LAE à l'aide d'indicateurs économiques que sont la VAN (Valeur Actuelle Nette) et le taux de rentabilité interne (TRI) montre aussi une meilleure rentabilité de l'aménagement avec la haie combinée au fossé par rapport à la haie seule et au témoin. Cela est le cas dans un premier scénario qui n'attribue pas de valeur monétaire à la superficie cultivable perdue par l'aménagement des fossés. Ainsi, au taux d'actualisation économique de 10%, la VAN est de : - 1 641 608 BIF pour le témoin (G1), 6 998 328 BIF pour la parcelle à haie seule et 9 100 871 BIF pour la parcelle à haie combinée au fossé.

L'option de « non aménagement » n'est pas préférable au regard des résultats de l'analyse de la rentabilité. La VAN est négative, ce qui montre que ce traitement consomme plus de ressources qu'il n'en produit. En effet, dans les dispositifs avec haies, à côté des productions des cultures, les produits issus de la biomasse agroforestière apportent une valeur ajoutée à la rentabilité de ces techniques (28 à 32 % pour Gashikanwa, 34 à 40% pour Matongo). Dans un deuxième scénario où la superficie perdue par le creusement des fossés (évaluée à 5%) est comptabilisée dans les coûts, la technique à haie combinée au fossé devient 3 à 6 fois moins rentable que celle à haie seule. Il en est de même que celle à fossé seul dans le cas du site de Matongo malgré les rendements élevés des cultures.

Un autre résultat intéressant de cette recherche est que l'extension de la largeur occupée par la haie par une double ligne de Calliandra exacerbe la concurrence haie-culture. Les rendements des lignes au tour de la haie sont de 0,6 kg (M2) à 1,1 kg (M3) contre 4.5 à 5.5 kg respectivement pour la parcelle témoin (M1) et la parcelle à fossé seul (M4) en 2018-2019.

Les résultats de cette recherche nous paraissent utiles pour orienter de futures actions de vulgarisation et de recherche. Les propositions sont les suivantes :

1. Lorsque la technique de haie combinée au fossé isohypse est appliquée, une valorisation des fossés par des cultures adaptées à des quantités importantes d'eau comme le bananier pourrait contribuer dans la rentabilité des dispositifs de lutte anti-érosive avec fossés isohypses.
2. L'équivalence de la rentabilité des techniques de fossé seul et de fossé isohypse combiné à une haie conduit clairement au choix de la combinaison, de par la diversité des produits offerts à l'agriculteur par cette technique.
3. Une meilleure gestion des haies par le cernage atténue les effets de la concurrence haie-culture ( déjà suggérée par des recherches antérieures (Duchaufour et al., 1996).
4. L'élargissement de la largeur des haies mixtes au sein des parcelles cultivées est préjudiciable à la production des cultures associées. Des installations sur le contour des champs augmenterait les quantités produites. C'est une pratique déjà mise en oeuvre par les projets du FIDA au Burundi sous l'appellation d'embocagement.
5. Il y a nécessité d'une étude de rentabilité prenant en compte les coûts évités suite à l'efficacité du fossé dans la réduction des pertes en terre : économie en termes d'éléments nutritifs sauvegardés (diminution des quantités de fertilisants et d'amendements). D'autres études intéressantes concerneraient l'évaluation d'avantages écologiques comme la séquestration du carbone par les arbres de la haie mixte, l'amélioration de la biodiversité et la réduction de la pollution des eaux suite à des dispositifs de lutte antiérosive à base de haie mixte herbacée/arbustive/arborée.

## Remerciements

Les auteurs remercient les Projets VLIR/UOS et IFDC/PAGRIS pour les financements qui ont permis cette recherche et le Projet IFDC/PAGRIS pour avoir facilité la présentation des résultats durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi. Nos remerciements s'adressent de manière particulière aux agriculteurs qui ont accepté de mettre à notre disposition leurs parcelles pour la conduite des expérimentations et aux techniciens de terrain du MINEAGRIE qui en ont efficacement assuré le suivi.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Angima S. et M. K. O'Neill. 2000. Use of tree/grass hedges for soil erosion control in the central Kenyan highlands. *Journal of soil conservation*, vol.55, Issue 4.
2. Diatta M., E. Laye, M. Grouzis et P. Perez. 2001. Importance de la haie vive isohypse sur la gestion de l'eau du sol et le rendement des cultures dans un bassin versant de Thyssé-Kaymor, Sénégal. *Science et changements planétaires /Sécheresse*. Volume 12, Numéro 1, 15-24.
3. Duchaufour H., P. Guizol et M. Bizimana. 1996. Avantages et inconvénients comparatifs de la haie mixte Calliandra/Sétaria et du paillage comme dispositif antiérosif en milieu rural burundais, pp. 132-151, *Bulletin du Réseau Erosion* n° 16.
4. Jackson N. et C. Ong. 1995. Root quantity, activity and below-ground competition in *Grevillea robusta*. <https://www.researchgate.net/publication/229053978>.
5. Kaboneka S., C. Kwizera, S. Nijimbere, W. Irakoze, P. Nsengiyumva, S. Ndiokubwayo and B. Habonimana B. 2021. Direct and residual fertilizer values of maize (*Zea mays* L.) stover cocomposted with *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray green manure. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (ijasre)*. DOI : 10.31695/IJASRE.2021.34042. Volume 7, Issue 7, July 2021.
6. Ndayizigiye F., 1993. Effets des haies arbustives (*Calliandra* et *Leucaena*) sur l'érosion et les rendements des cultures en zone de montagne (Rwanda), pp. 41-49, *Bulletin du Réseau Erosion* n° 13.
7. Ndayizigiye F., 2015. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In Roose E.(ed.) *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens, Contribution à l'agroécologie*. IRD Editions, Montpellier.
8. République du Burundi, Ministère de la planification du développement et de la reconstruction nationale. Programme d'Appui à la Gouvernance. 2006. Monographie de la commune Matongo.
9. République du Burundi, Ministère de la planification du développement et de la reconstruction nationale. Programme d'Appui à la Gouvernance. 2006. Monographie de la commune Gashikanwa.
10. Rishirumsjhirwa T., 1993. Contribution des résidus du bananier en conservation de l'eau et du sol. *Réseau Erosion Bull.* no 13, p63-70.
11. Rishirumuhirwa, T., 1994. Facteurs anthropiques de l'érosion dans les montagnes et hauts plateaux au Burundi - Rwanda - Zaïre -. *Les cahiers d'Outre-Mer, Revue de Géographie de Bordeaux*, Tome XLVII, Talence, janvier-mars 1994. p 23-33.
12. Rishirumuhirwa, T., 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (Application au cas de la région du Kirimiro – Burundi). Thèse n° 1636, EPFL – Lausanne. 321 p.
13. Rishirumuhirwa T. et E. Roose E. 2015. Erosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi. In Roose E.(ed.) *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens, Contribution à l'agro-écologie*. IRD Editions, Montpellier.
14. Singh R.P., C.K. Ong and N. Saharan. 1989. Above and below ground interactions in alley-cropping in semi-arid India. *Agroforestry Systems* 9 : 259-274.
15. Sneha N., S. Priyanka S., C. Sagar C. and S. Digvijay. 2018. A Water Conservation Technique : Continuous Contour Trenches. *Vishwakarma Journal of Engineering Research*. Volume 2, Issue 4.

# Thème 9

## Analysis of Erosion Control Methods Effects on maize growth and production parameters at Matongo and Gashikanwa

C. Kwizera<sup>1</sup>, S. Ndhokubwayo<sup>1</sup>, B. T. Iro Ong' Or<sup>2</sup>, S. Kaboneka<sup>1</sup>, B. Habonimana<sup>1</sup>, J. Ndimubandi<sup>1</sup>, J. Van Orshoven<sup>3</sup>, T. Rishirumuhirwa<sup>4</sup>, S. Nijimbere<sup>1</sup>, P. Nsengiyumva<sup>1</sup> and D. Niyibaruta<sup>1</sup>

1. University of Burundi, Faculty of Agriculture and Bio Engineering, Department of Environment Sciences and Technologies, B.P 2940 Bujumbura, Burundi
2. Masinde Muliro University of Science and Technology, School of Engineering and Built Environment, Department of Civil and Structural Engineering, P.O. Box 190-50100, Kakamega, KENYA
3. University of Leuven in Belgium, Department of Earth Environmental Sciences, Belgium
4. Agrobiotechnology, Bujumbura –Burundi

\* **Corresponding Author : [kwizera.kwizera@u.edu.bi](mailto:kwizera.kwizera@u.edu.bi)**

### Abstract

Soil erosion washes away the topsoil and degrades soil structure, whence crop growth and yields reduction. It decreases organic matter and important crop nutrients, while this last is the key indicator of crops growth, production quantity and quality. To cope with these problems, two experiments have been undertaken at Matongo and Gashikanwa communes. At Matongo, the experiment was set on Bihunge hill with four different erosion control methods (MM1, MM2, MM3 and MM4) considered on four separated plots (P1, P2, P3 and P4). The first method, MM1 (traditional plowing method) was set as a control on P1; the second, MM2 (anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance), was implemented on P2; the MM3 (anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance coupled with anti-erosive ditches), set on P3, was third method; while the fourth was MM4 (anti-erosive ditches) set on P4. At Gashikanwa, the three first methods were considered on three separated plots and were named as GM1 (traditional plowing method), GM2 (anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance) and GM3 (anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance coupled with anti-erosive ditches). Through comparative analysis with advanced excel and PSS, the outcomes highlighted better effects of MM4 at Matongo. This method has improved the plant height, stem girth, and leaf area. Furthermore, the results revealed the enhancement of grains number, crop fresh production, grains

dry weight and dry production weight for this method. For all studied parameters, there were no significant difference between used methods. At Gashikanwa, all analyzed growth and production parameters were successfully enhanced by GM3 method at each date of data record. Whence this study suggests MM4 at Matongo and GM3 at Gashikanwa as the effective methods to improve crop maize growth and production for enhancement of household food security. However further studies were suggested on this crop maize in the region for more conclusions.

**Keywords : Soil erosion, maize crop, erosion control methods, production and growth parameters**

## Résumé

L'érosion du sol emporte la couche arable et dégrade la structure du sol, d'où une réduction de la croissance des cultures et du rendement. Il diminue la matière organique et les éléments nutritifs importants des cultures, alors que ces derniers sont des indicateurs clés de la croissance des plantes, la quantité et la qualité de la production agricole. Pour faire face à ces problèmes, deux expérimentations ont été entreprises dans les communes de Matongo et de Gashikanwa. A Matongo, l'expérience s'est déroulée sur la colline de Bihunge avec quatre différentes méthodes de contrôle d'érosion (MM1, MM2, MM3 et MM4) considérées sur quatre parcelles (P1, P2, P3 et P4). La première méthode, MM1 (méthode de labour traditionnelle), sur P1 et était considérée comme contrôle ; le second, MM2 (haies anti-érosives et quelques arbres d'importance agronomique), a été réalisé sur P2 ; le MM3 (haies anti-érosifs haies anti-érosives et quelques arbres d'importance agronomique couplés aux fossés), implémentés sur P3, était la troisième méthode ; tandis que le quatrième était le MM4 (fossés anti-érosifs) sur P4. A Gashikanwa, les trois premières méthodes ont été considérées sur trois parcelles et sont nommées comme GM1 (méthode de labour traditionnelle), GM2 (haies anti-érosives et quelques arbres d'importance agronomique) et GM3 (haies anti-érosifs haies anti-érosives et quelques arbres d'importance agronomique couplés aux fossés). Grâce à une analyse comparative avec Excel avancé et PSS, les résultats ont mis en évidence l'efficacité de la méthode MM4 à Matongo. Cette méthode a amélioré la hauteur de la plante, la circonférence de la tige et la surface des feuilles. De plus, les résultats ont révélé une amélioration du nombre de grains, du poids des grains sèche, de la production fraîche, et du poids de la production sèche pour cette méthode. Pour tous les paramètres étudiés, il n'y avait pas de différence significative entre les méthodes utilisées. À Gashikanwa, tous les paramètres de croissance et de production analysés ont été améliorés avec succès par la méthode GM3 à chaque date d'enregistrement des données. D'où cette étude suggère MM4 à Matongo et GM3 à Gashikanwa comme des méthodes efficaces pour améliorer la croissance et la production du maïs afin d'améliorer la sécurité alimentaire des ménages. Cependant, d'autres études ont été suggérées sur cette culture de maïs dans la région pour plus de conclusions.

**Mots clés : Érosion des sols, le maïs, méthodes de contrôle de l'érosion, paramètres de croissance et de production**

## 1. INTRODUCTION

Soil erosion washes away the topsoil and degrades soil structure, whence crop growth and yields reduction [1]. It is a natural process in which rocks, soil or dissolved material are moved from one location to another. Erosion reduces soil productivity so slowly that the reduction may not be recognized until the land is no longer economically suitable for growing crops [2]. Increased soil loss due to erosion of about 200 to 400 tons/ha/year has been revealed [3], as well as the removal of organic matter and important crop nutrients [3-4]. A study conducted at Iowa State University on 40 soil associations, reported reduced crop productivity due to soil erosion [5]. Excessive erosion decreases agricultural productivity due to upper nutrients loss [6] and organic matter reduction [7]. It generally increases runoff, resulting in decreased available soil water and reduced plant growth [8, 9].

Erosion affects a variety of soil functions relevant for crop growth such as nutrients levels, pH, water-holding capacity, texture, infiltration rates and soil organic matter [10]. In a review of most prominent land degradation assessments, Gibbs and Salmon (2015) estimated that 1-6 billion ha of land surface (up to 66%) is degraded to varying degrees due to erosion [11]. Most studies agree that erosion is one of the most serious soil degradation processes, especially in developing countries [12]. It negatively affects crops production, especially maize, one of the most crucial crops worldwide, which plays a vital role in global food security. Maize is an important ingredient in numerous food products, including flatbread, baked bread, tortillas, cereals, and

animal feed. Additionally, it serves as a dietary staple in many regions, providing a rich source of carbohydrates, fibre, and essential nutrients. In recent years, maize consumption has been linked to the reduction of chronic degenerative diseases such as cancer, obesity, type 2 diabetes, cardiovascular and metabolic problems [13]. This crop has been acknowledged as an important source of calories, proteins, peptides, carbohydrates and fibers [14]. It is known for lowering the risk of macular degeneration, cataracts, and other eyes contions [15].

Furthermore, maize contains antioxidant quercetin which plays an important role in treating prostatitis, an inflammation of the prostate affecting many men. Also, it plays a vital role in addressing food security challenges. Protein found in maize could prompt the immune system to produce antibodies against proteins that form toxic in the brain. Considering these maize benefits and erosion problems which limit its growth and production worldwide, especially in Burundi, two studies with erosion control methods have been undertaken in this country, specifically at Bihunge and Buhoro hills, to improve soil fertility to enhance crop maize production for improving household food security. These studies aimed to analyse the erosion control methods effects on maize growth and Production parameters.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Site description and soil properdines

The first experiment was carried out at Buhoro hill, in Gashikanwa commune of Ngozi province. The soil texture (0-40cm) was loam, with chemical properties shown in the following table 1 :

**Table 1. Buhoro Soil properties**

pH <sub>water</sub>	pH <sub>KCl</sub>	P (mg kg <sup>-1</sup> )	K( méq/100g)	N (%)	C (%)
5.38	3.81	13.7	0.14	0.42	1.28

The second experiment was undertaken at Bihunge hill in Matongo commune of Kayanza province with a soil properties displayed in the table 2 below.

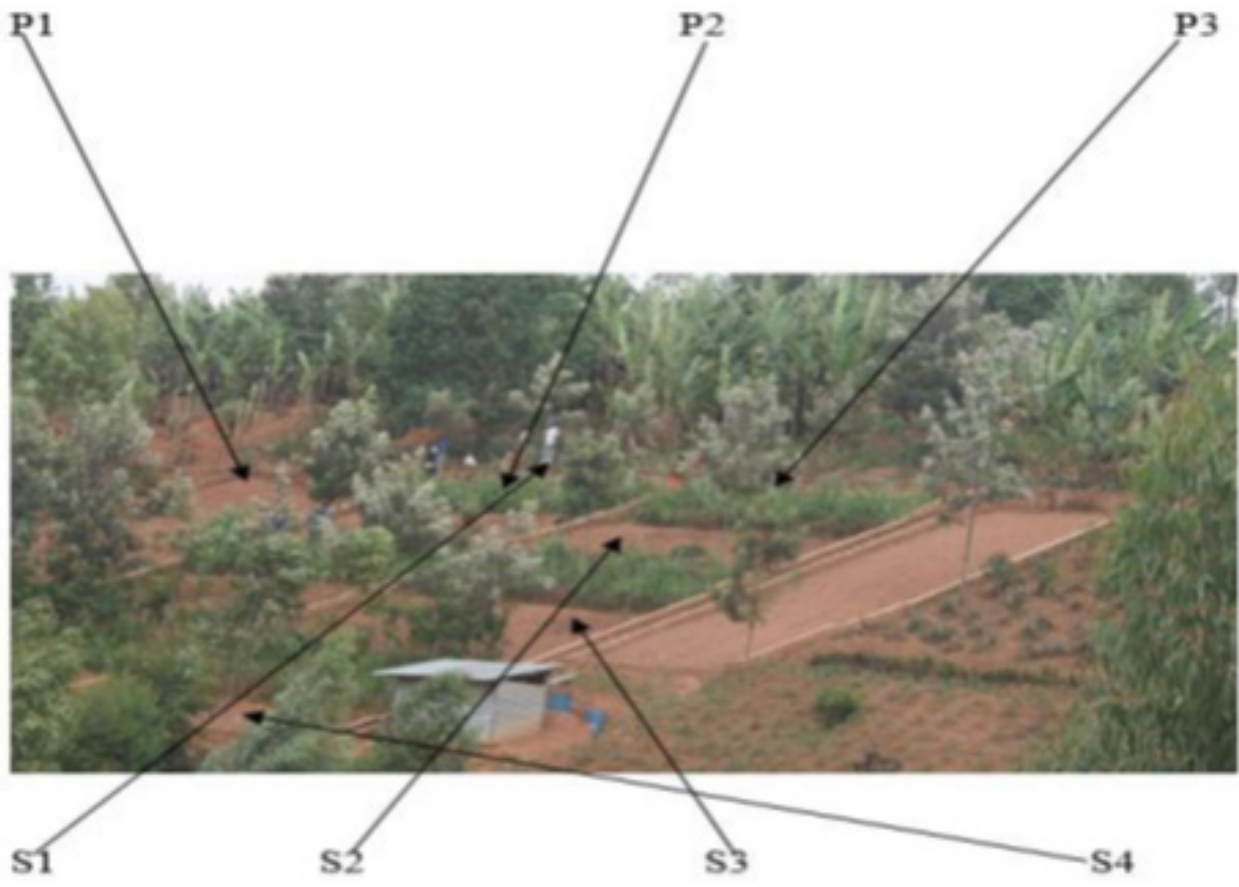
**Table 2. Bihunge soil Properties**

pH <sub>water</sub>	pH <sub>KCl</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )	K (méq/100g)	C (%)	N(%)
5.04	2.98	5.4	0.34	1.32	0.21

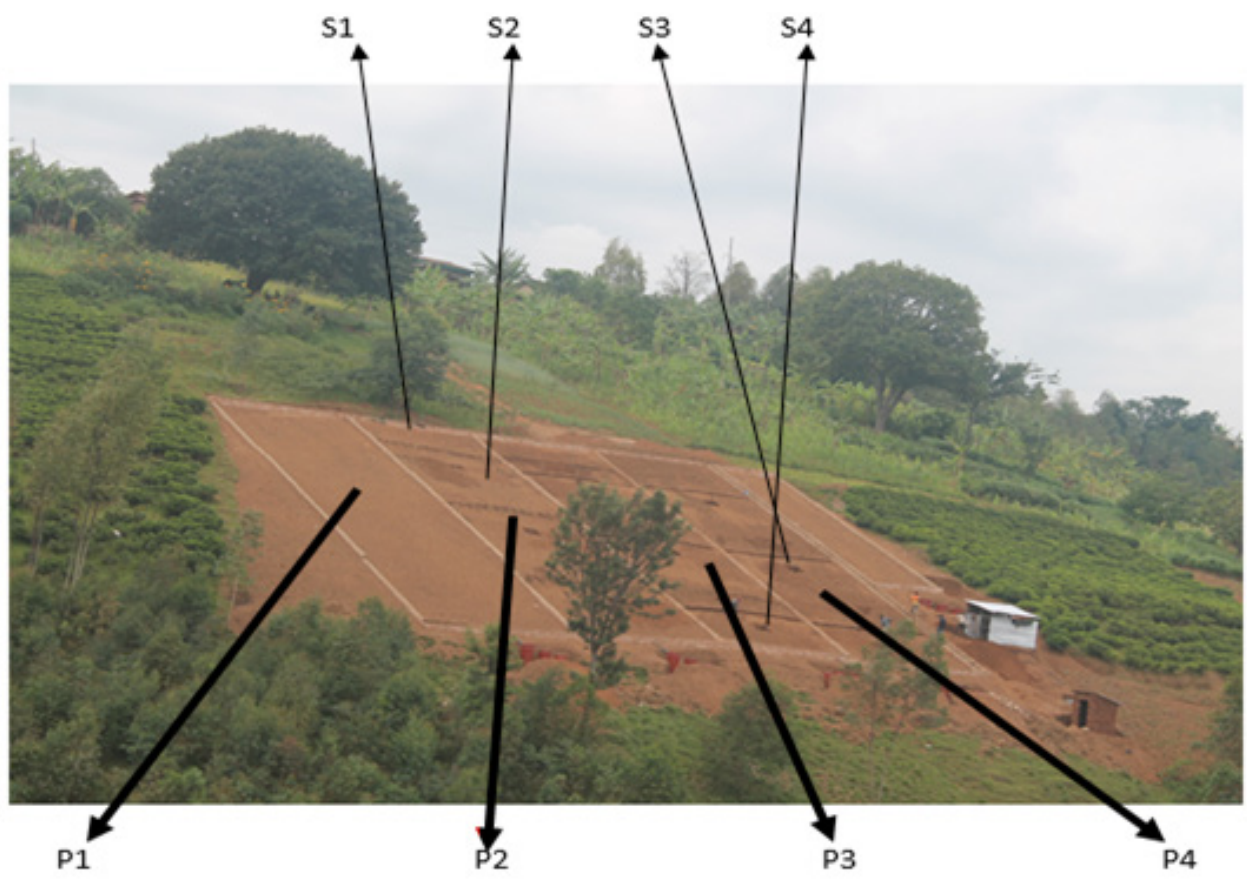
### 2.2. Experiments design

At Matongo, experiment was composed by four plots (P1, P2, P3 and P4) with four erosion control methods (MM1, MM2, MM3 and MM4). The first method, MM1 (traditional plowing method) was set as a control on P1; the second, MM2 (double anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance), was implemented on P2; the MM3 (anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance coupled with anti-erosive ditches), set on P3, was third method; while the fourth was MM4 (anti-erosive ditches) set on P4. At Gashikanwa, the three first methods were considered on three separated plots and were named as GM1 (traditional plowing method), GM2 (anti-erosive hedges and some tress of agronomic importance) and GM3 (anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance coupled with anti-erosive ditches).

Before sowing, these plots on both hills, were divided into four sub plot (S1, S2, S3, and S4) (Photos 1 and 2). With S1 the sub plot at upstream ; S2, the middle sub plot toward upstream ; S3, the middle sub plot toward downstream; and S4 the sub plot at downstream.



*Photos 1. Experiment of Gashikanwa*



*Photos 2. Experiment of Matongo*

Moreover, the fertilizers were applied as recommended, while during the growth period, diseases and pests were normally controlled. These erosion control methods were completed with the fertilizers application to maintain the fertilizers required level, while during the growth period, diseases and pests were normally controlled.

### 2.3. Sampling methods and data Collection

For sampling, three homogeneous regions : upstream, middle and down stream were considered for each sub-plot, while two lines were chosen at each region. During the study, plant height, leaf area, stem girth, and leaves number were determined. Moreover, the fresh and dry production weight were recorded, as well as the grains number and grains dry weight.

### 2.4. Statistical Analysis

Data were analyzed with applied Excel and SPSS through LSD (least significant difference) at  $P < 0.05$  in comparing the implemented methods, while figures were made by using Excel.

## 3. RESULTS

### 3.1. Matongo

#### 3.1.1. Plant growth parameters

##### 3.1.1.1. Effects of Erosion Control Methods on Stem Girth (SG)

The outcomes on stem girth (SG) were summed up in Figure 1. For the first tested date, the method MM4 was the most effective in improving stem girth parameters on S1 (2.01 cm) comparatively to others. It was followed by MM1 (1.99 cm), while the lowest of 1.85 cm was observed for MM3 method. The same trend was observed for S2 where MM4 recorded highest value of 2.17cm. For S3 and S4, stem girth higher value was observed for MM2 and MM3 respectively but no significant difference between treatment was observed for all sub plots.

For the second date, the first highest SG at S1 was still observed for MM4 with 2.18 cm followed by MM1 of 2.07 cm, while lowest was observed for MM3 by 1.73 cm. At S2 and S3, the maximum value was observed for MM4 with 2.08 and 2.07 cm respectively. On S4, the trend change, MM3 (2.06 cm) recorded the optimum value, whereas minimum was observed for MM2 (1.93 cm) method which showed also lowest values for S2 and S3 as can be seen in the small table of the figure.

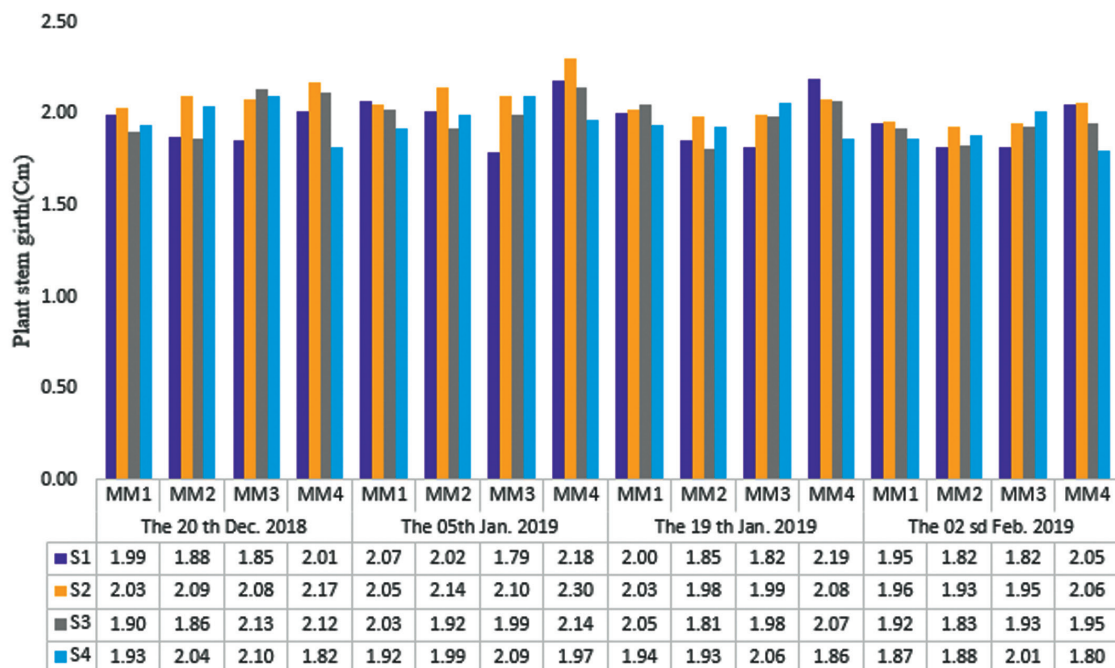


Figure 1. Effects of erosion control methods on Stem Girth (cm)

At the third and fourth tested date, the highest value was still observed for MM1 at S1, S2 and S3 section while at S4 the MM3 recorded the highest. However for both date and at each section, the lowest value was generally observed for MM2 method.

### 3.1.1. 2. Influences of Erosion Control Methods on Plant Height (cm)

142.22 cm was observed for MM3, while the shortest was recorded for MM1 with 61.41 cm. The same trend was also realized on S3 and S4 with plants of 81.45 and 83.18 cm respectively, while lowest was observed for MM1 of 61.8 and 60.63 cm successively.

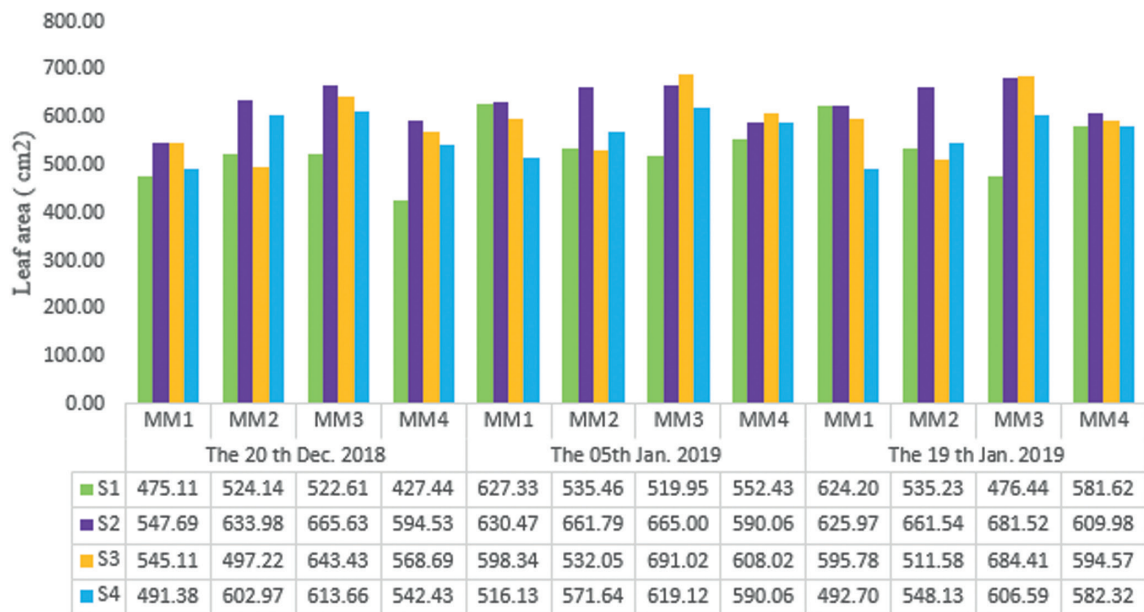
On January 5th, the maximum PH on S1 was observed for MM1 (121.51cm) comparatively to others, but there was no significance difference. The second highest was MM3 (113.86 cm) and lowest for MM2 (109.18cm). Regarding to S2, the maximum plant height was observed for the imple-mented method MM3 with 142.22 cm, followed by the method MM4 of 139.35 cm, while the minimum of 116.89cm was recprded for MM1 method. The same trend was observed on the S3 and S4 where MM3 method got the optimum PH of 137.33 and 133.6 cm respectively, whereas the minimum was observed for MM1 with 106 and 106.6 cm. Considering other tested dates, the PH was changing from a sub plot to another. Clearly, on S1 at the 19th January 2019, the maxi-mum of 196.43cm was recorded for MM1 method, followed by MM4 with 183.75 cm, and minimum for MM2 of 168.74 cm.

On S2, the highest plant was observed for MM3 with 204.33cm, whereas the method MM1 got the tallest plant of 179.82 cm. On S3, the experiment results showed highest PH value for the method MM3 (208.59 cm), followed by MM4 (197.15 cm), while the minimum was obtained for MM2 (163.64 cm). Regarding S4, the optimum PH was still observed for MM3 with 208.05cm.

**Table 3. Response of plant height (cm) to erosion control methods**

Date	Sub plot	S1	S2	S3	S4
	Method				
The 20 <sup>th</sup> Dec. 2018	MM1	66,23	61,41	61,80	60,63
	MM2	70,60	72,35	66,38	74,40
	MM3	69,18	142,22	81,45	83,18
	MM4	65,30	139,35	71,28	65,93
The 05 <sup>th</sup> Jan. 2019	MM1	121,51	116,89	106,00	106,55
	MM2	109,18	132,09	110,45	126,23
	MM3	113,86	142,22	137,33	133,60
	MM4	112,44	139,35	123,18	109,34
The 19 <sup>th</sup> Jan. 2019	MM1	196,43	179,82	167,23	162,68
	MM2	168,74	203,12	163,64	197,42
	MM3	171,03	196,79	208,59	208,05
	MM4	183,75	204,33	197,15	153,63
The 02 <sup>sd</sup> Feb. 2019	MM1	200,21	201,12	193,05	188,59
	MM2	194,37	191,08	191,08	208,12
	MM3	190,78	217,39	220,48	215,91
	MM4	197,64	226,35	197,60	214,59

At the 2<sup>nd</sup> Febuary 2019, the method MM1 on S1 still recording the highest plant of 200.2 cm. On the S2, the method MM4 with 226.35 cm showed the tallest plant, while on S3 and S4, the method MM3 was the most effec-tive method with highest plant of 220.48 and 215.91cm respectively. For all tested date and each sub-plot, there was no significance difference between the used methods.



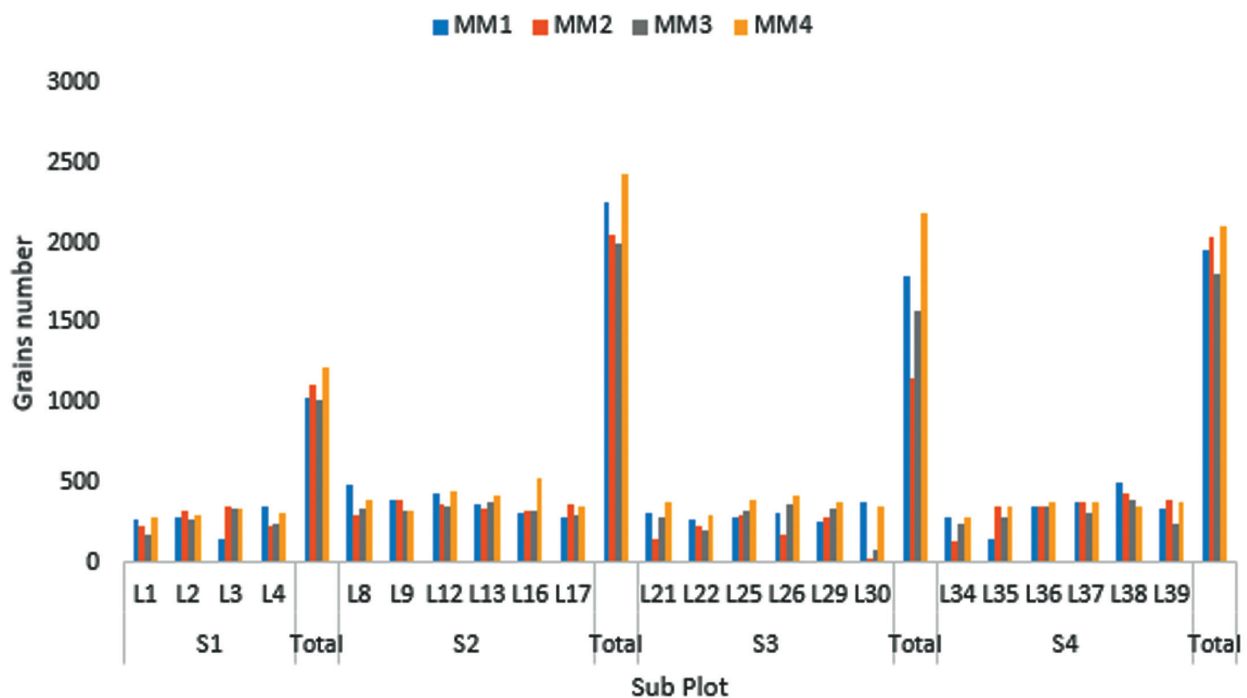
**Figure 2. Effects of erosion control methods on leaf area**

Regarding S2, the maximum LA in the first days was observed for MM3 method (665.63 cm<sup>2</sup>), followed by MM2 (663.98 cm<sup>2</sup>), while the minimum of 547.69 cm<sup>2</sup> was recorded for MM1. Considering S3, the first highest LA of 643.43 cm<sup>2</sup> was still observed for MM3, the second for MM4 with 568.69 cm<sup>2</sup>, and the last of 497.22 cm<sup>2</sup> for MM2 method. The same LA evolution trend was observed on S4, where the optimum LA was recorded for MM3 method with 613.97 cm<sup>2</sup>. On the second tested date, as it can be seen on Figure 3, the same trend was observed, with a maximum leaf area evolution for MM3 method on S2 with 627.33 cm<sup>2</sup>, and minimum for MM2 of 519.95 cm<sup>2</sup>. Regarding S3, higher leaf area (691.02 cm<sup>2</sup>) was still observed for MM3 and lowest for MM1 with 532.05 cm<sup>2</sup>. On S4, the maximum leaf area was also observed for MM3 (609.59 cm<sup>2</sup>) and minimum for MM1 of 516 cm<sup>2</sup>. On the last date of recording LA data, the maximum leaf area measure on S2, S3 and S4 was recorded for MM3 with 681.52 ; 684.41 and 606.5 cm<sup>2</sup>, while the minimum for MM1 was observed for S2 (652.57 cm<sup>2</sup>) and S4 (492.7 cm<sup>2</sup>). However for S3, the method MM4 showed the lowest value of LA by 594.57 cm<sup>2</sup>.

### 3.1.2. Production parameters

#### 3.1.2.1. Grains number response to erosion control methods

Results on grains number (GN) were summarized in Figure 3. For S1, the highest GN of 1212 grains was recorded for the MM4 method followed by MM2 with 1111 grains, while the lowest was observed for MM3 with 1013 grains. On S2, the same trend was observed with maximum GN of 2432 grains for MM4 and the minimum for MM3 by 1998 grains.

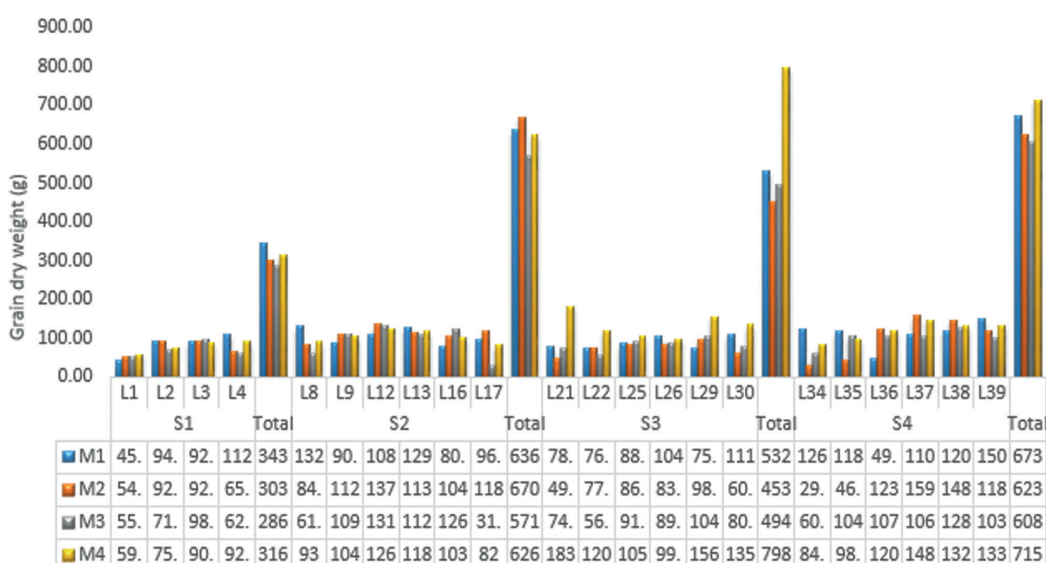


**Figure 3. Response of grains number to erosion control methods**

As for the two first sub plot, the first place on S3 and S4 was occupied by MM4 with 2183 and 2104 grains respectively, while the last for S3 was observed for MM2 (1147 grains) and MM3 (1804 grains) for S4. For this parameter, the statistical analysis showed no significance difference between these methods.

### 3.1.2.2. Grains dry weight (g)

The grain dry weight (GDW) was effectively influenced by ero-sion control methods as can be seen on Figure 4. Regarding S1, the optimum GDW was observed for MM1 of 343.67 g, followed by MM4 and MM2 with 316.33 and 303 g respectively, while the lowest was recorded for MM3 of 286.67 g. On S2, the highest GDW was observed for MM2 (670.17 g), followed by MM1 (636.67 g) and MM4 (626 g), whereas the method MM3 (571.17 g) got the lowest value of GDW.



**Figure 4. Effects of erosion control methods on dry grains weight**

Considering S3, the maximum GDW of 798 g was recorded for MM4 method, followed by MM1 and MM3 with 532 g and 494 g respectively. The minimum of 453 g was observed for MM2. On S4, the highest GDW was still observed for MM4 with 715 g, and was followed by MM1 and MM2 with 673 g and 623 g, whereas the methods MM3 obtained the minimum of 608 g.

### 3.1.2. 3. Production Fresh weight (g)

Fresh weight evolution is displayed in Figure 5. As for the above parameters, fresh weight (FW) changed with the applied methods, and the sub plot. The maximum FW was observed for MM4 (721.33 g), followed by MM1 (600 g) and minimum for MM3 method with 494 g. On S2, as it can be seen in the figure, method MM4 still at the first position with a maximum FW of 1408 kg but did not significantly differed from the following method MM2 which got the second highest fresh production of 1205 g.

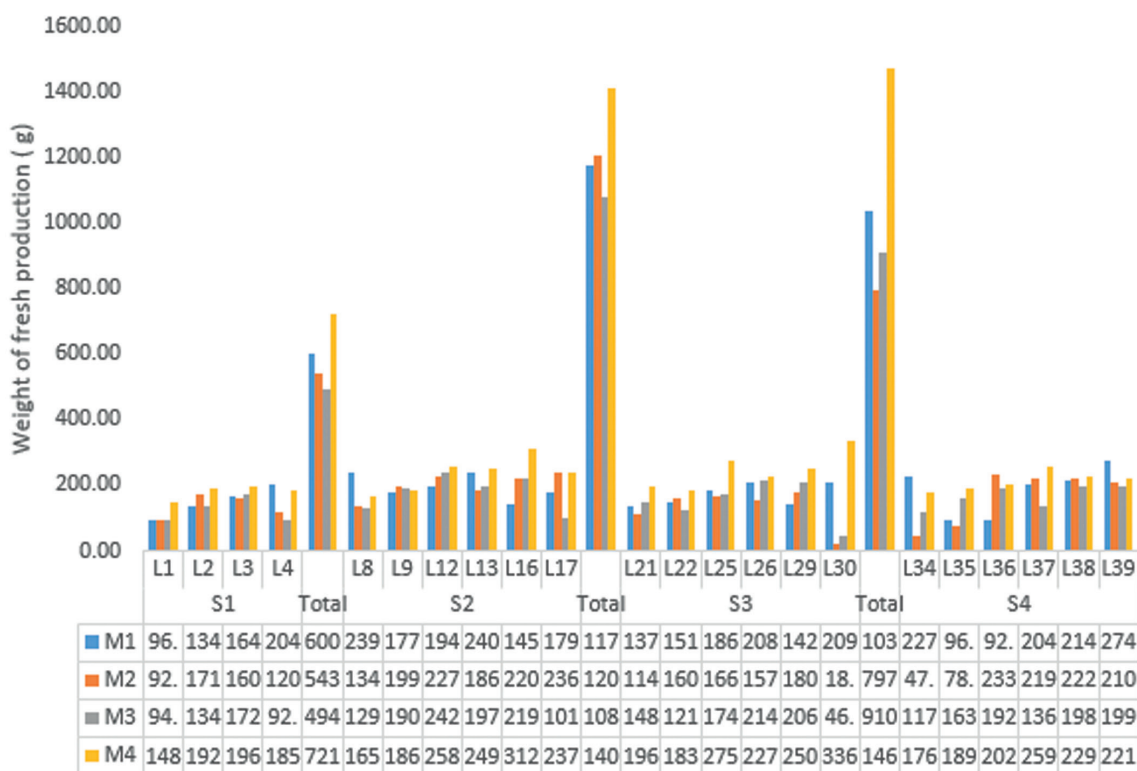


Figure 5. Response of production fresh weight (kg) to erosion control methods

Data registration on S3 highlighted the effectiveness of MM4 in improving production fresh weight with highest value of 1468.67 g, while lower weight was observed for MM2 of 797 g. Regarding to S4, the maximum fresh production weigh was recorded for MM4 of 1278 g. In regard to these outcomes, MM4 got almost the higher production weight comparatively to others. Likewise, the results showed lower production weight for the crops on the lines near the anti erosive hedges comparatively to the previous lines.

### 3.1.2.5. Production dry weight (g)

Production dry weight (PDW) is an indicator closely related to the synthesized matter in the plant and which are needed by the population to improve their health, whence it has been assed in this study (Figure 6). Considering this figure, the dry weight at S1 section was very hight with MM4 (487.33 g), followed by MM1 (371 g), while the lowest was observed for method MM3 (345.33g). Considering S2, the minimum PDW was also recorded for MM4 with 984.33 g, followed by MM2 of 844 g and minimum for MM3 with 688.33 g.

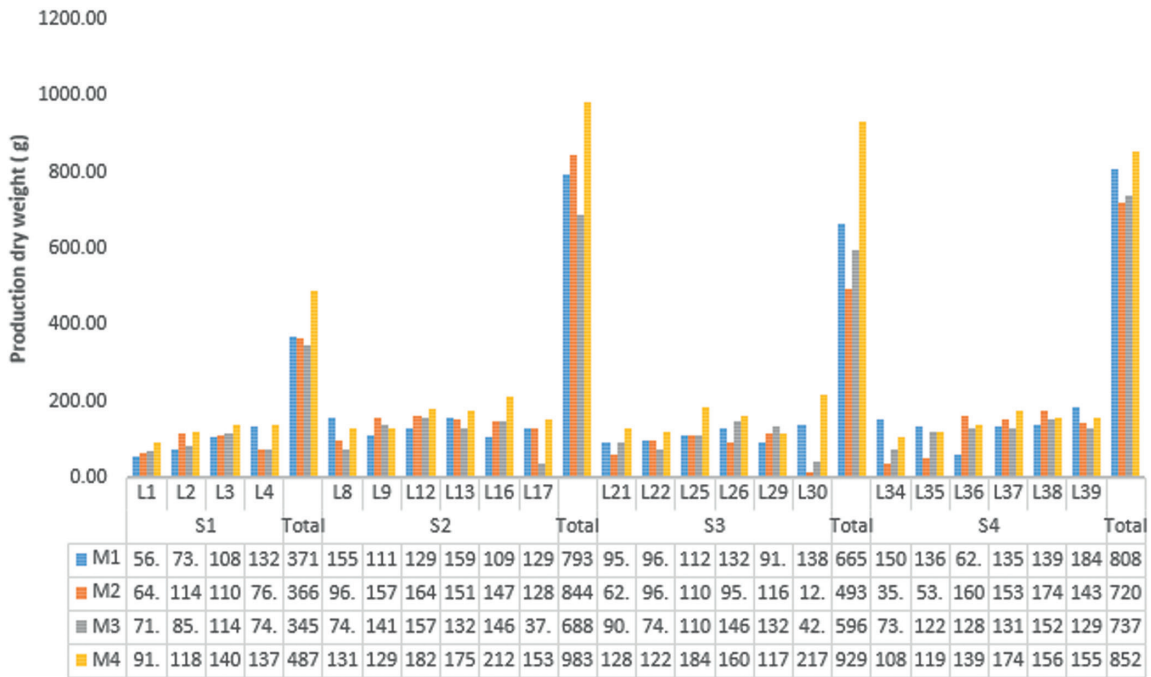


Figure 6. Effects of erosion control methods on crop dry weight production

The outcomes of this figure displayed the method MM4 as the effective method in improving PDW on section S3 and S4. Clearly, it recorded highest PDW of 929.33 g and 852.33g respectively, while the following was MM1 for both sections (S3 and S4) with 665 g and 808 g and lowest for MM2 of 493.33 g and 720.17 g respectively. As for crop production, the PDW for the crop on the lines near the anti erosive hedge was very low. More over, the PDW was very high at the down stream sub plot S4 comparatively to others.

## 3.2. Gashikanwa

### 3.2.1. Growth parameters

#### 3.2.1.1. Effects of erosion control on leaves number (LN)

In the first days, the leaves number (LN) was effectively influenced by ero-sion control methods (Figure 7). Clearly, on S1 the method GM1 recorded the highest number of 11 leaves and shortest for GM3 of 8 leaves. On S2, no significant difference was recorded. Specifically, the maximum LN of 10 was recorded for both GM1 and GM3 methods, and minimum for GM2 with 9 leaves. Regarding to S3 and S4, the method M3 showed Higher leaves with 10 and 11 leaves respectively.

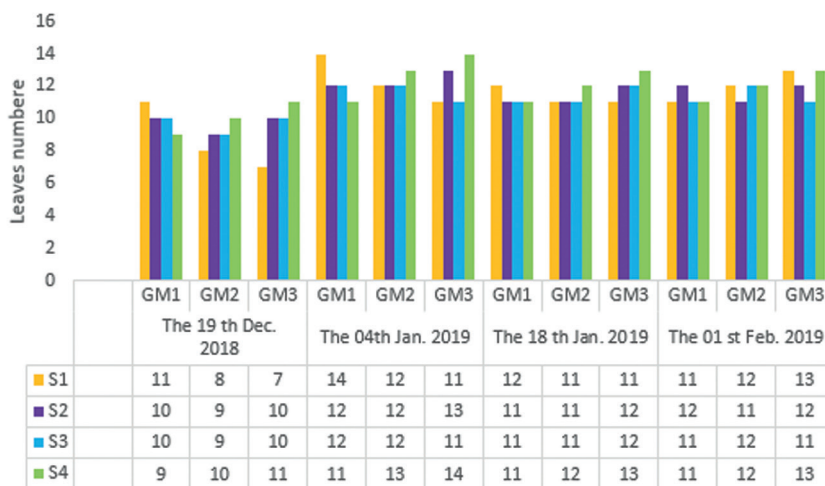
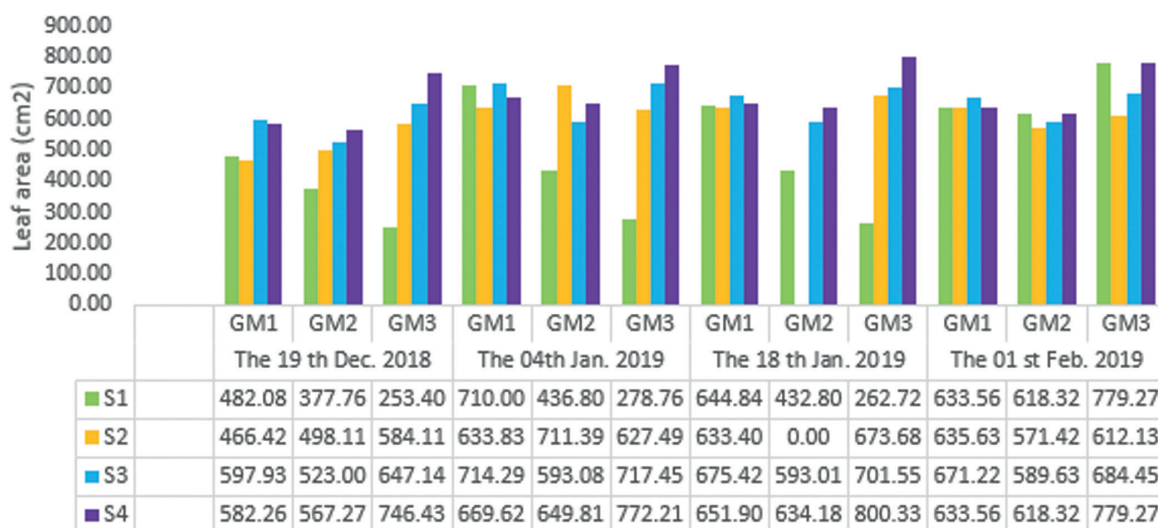


Figure 7. Influences of erosion control methods on leaves number

On the 4th Jan 2019, the maximum LN was observed for the implemented method GM1 with 14 leaves, while the minimum of 11 leaves was observed for GM3 method. On S3, the maximum was recorded for GM2 and GM2 with 12 leaves. Regarding to S2 and S4, the method GM3 got the optimum LN of 13 and 14 respectively. At the 18 th Jan 2019, on all sub plots except S1 where GM1 got the highest number of 12 leaves, the maximum LN of 12 ; 12 and 13 leaves. At the 1 stth Feb. 2019, the optimum LN for all sub plot was recorded for GM3 with 13 ; 12 ; 12 and 13 leaves.

### 3.2.1.2. Effects of erosion control on leaf area (cm<sup>2</sup>)

The results on leaf area (LA) were summarized in Figure 8. For S1 at 19th dec. 2018, the highest LA of 482.08 cm<sup>2</sup> was recorded for the GM1 method.



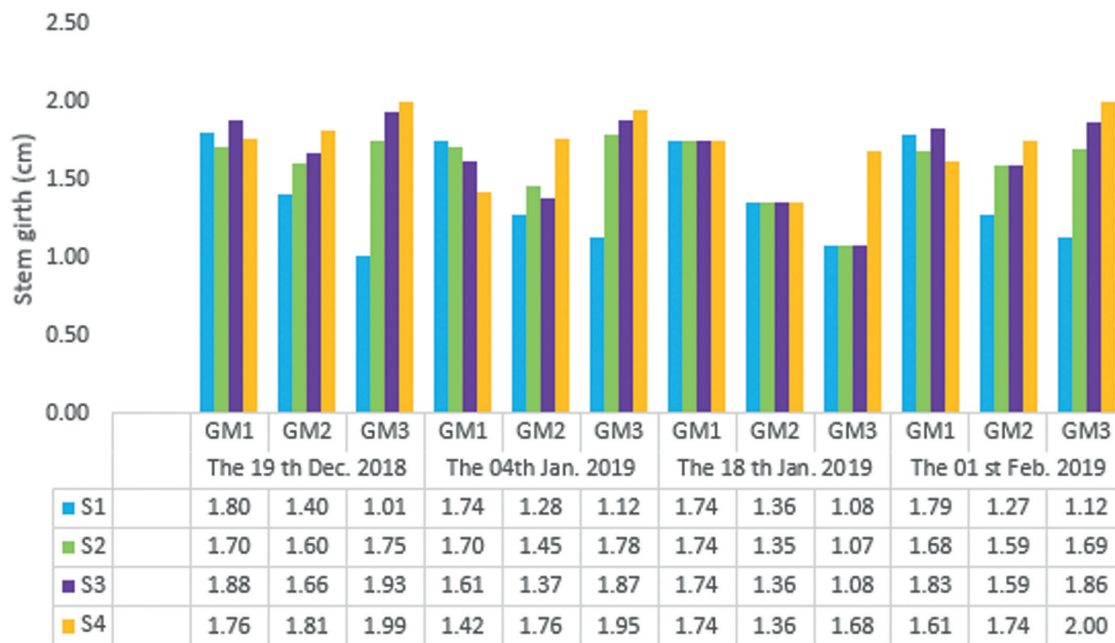
**Figure 8. Effects of erosion control methods on leaf area**

Regarding to S2, the maximum LA was observed for the implemented method GM3 with 584.41 cm<sup>2</sup>, while the minimum of 466.4 cm<sup>2</sup> was observed for M1 method. ON S3 and S4, the trend change, GM3 method got the optimum LA of 647 cm<sup>2</sup> and 743.43 cm<sup>2</sup> respectively.

The same trend was observed on the others tested date where GM3 recorded biggest leaf area especially on S3 and S4 as can be seen in the figure. This increase of leaf area could protect soil against evaporation whence more water for plant growth and development.

### 3.2.1.3. Effects of erosion control methods on stem girth (cm)

The stem girth (SG) was effectively influenced by erosion control methods (Figure 9). Specifically, on S1 at the 19th dec. 2018, the method GM1 recorded the biggest SG with 1.8 cm and shortest for GM3 of 1.01 cm on S1. Regarding S2, the optimum ST was observed for M3 of 1.75 cm. For S3 the maximum SG value was observed GM1 with 1.93 cm, while for S4, the highest value was obtained for GM3 of 1.99 cm. On the 4th Jan 2019, the maximum SG was observed for the implemented method GM1 with 1.78cm, while the minimum of 1.12cm was observed for GM3 method. The same trend was observed on S2, S3 and S4 where GM3 method got the optimum SG of 1.78, 1, 87 cm and 1.95cm respectively, while the minimum was observed for GM2 of 1.45 and 1.37 cm successively for S2 and S3. At the 18 th Jan 2019, on all sub plots, the maximum SG of 1.74cm was recorded for GM1 method, and minimum for GM3 with 1.07, 1.08 cm on S2 and S4, while for S4, the minim of 1.36 cm was observed for GM2.

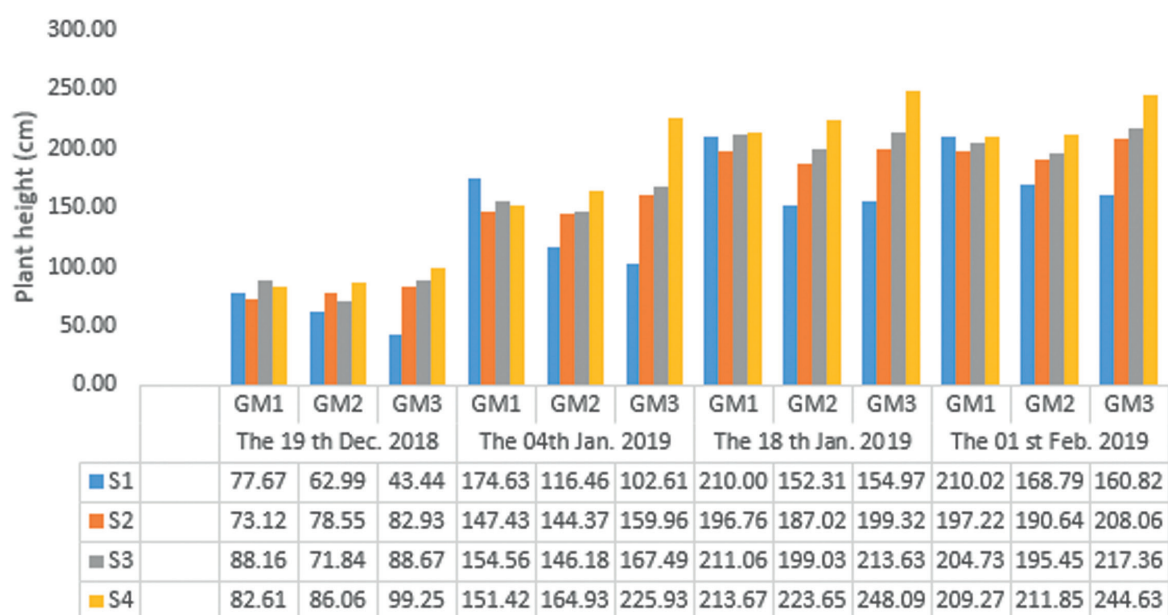


**Figure 9. Stem girth response to erosion control methods**

On the 1<sup>st</sup> Feb. 2019, except S1 where the maximum SG value was recorded by GM1 of 1.79 cm, the optimum SG for all sub plot was recorded for GM3 with 1.69, 1.86 and 2 cm. However, the minimum change with the sub plot. At S2 and S3, it was recorded for GM2 with 1.59 for both sub plot, while for S1 and S4, the smallest SG value of 1.12 and 1.61 was recorded for GM3 and M1 respectively.

#### 3.2.1.4. Influences of erosion control methods on plant height

Results on plant height for the first date of recording data, on S1, highlighted the method GM1 as the effective method in improving this parameter. It showed higher PH for all tested date with 77.67 ; 174.63 ; 210 and 210.02 cm respectively and minimum by either GM2 or GM3 but there was no significant difference between the used methods.



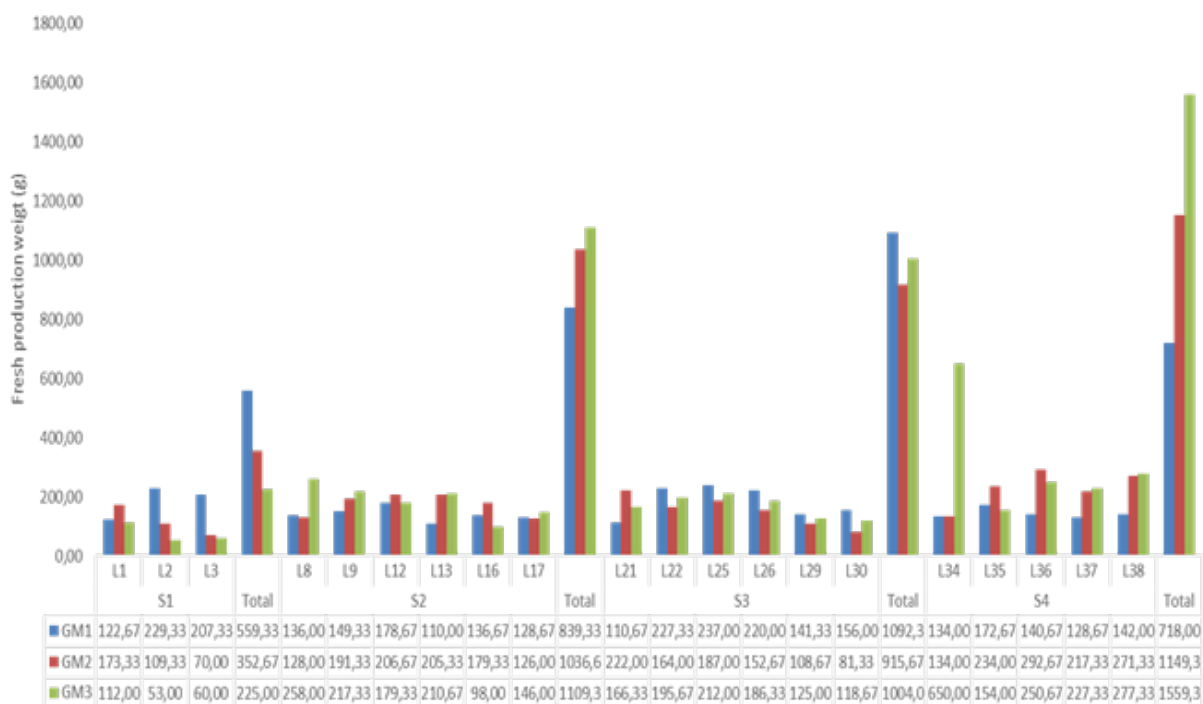
**Figure 10. Evolution of plant height under erosion control methods**

For other sub plot, the method GM3 was the most effective method in enhancing this parameter with maximum value of at each tested date as can be seen it the above figure. Clearly, it was 82.93 ; 159.96 ; 199.32 and 208.06 cm for S2 respectively, while for S3 it was 88.67 ; 167.49 ; 213.63 and 217.36 cm successively. For S4, at each tested date GM3 method showed highest values of 94.25, 225.93, 248.04 and 244.63 cm respectively. This improvement of plant height was more important especially that it is related to the photosynthesis parameter. Whence this method has played a key role in improving somehow crop quality.

### 3.2.2. Production parameters

#### 3.2.2.1. Analysis of fresh production

The fresh production (FW) was recorded at gashikanwe and showed significance difference between methods at S1.

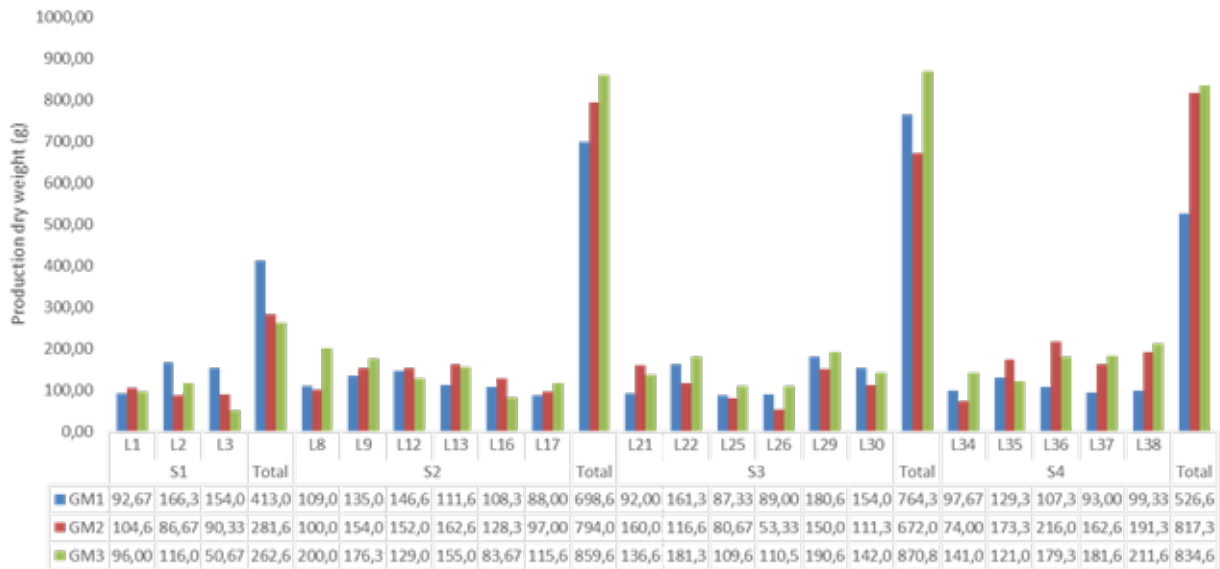


**Figure 11. Effects of erosion control methods on fresh production (g)**

Specifically, GM1 highlighted maximum value of 559.33 g and was significantly different to the following GM2 with 352.69 g, as well as to GM3, which recorded lowest value of 225 g. On S2, the evolution of FW changed, the results analysis showed GM3 as the most effective method with higher FW of 1109.33g, followed by GM2 of 1036.67 g, while GM1 method recorded the lowest weight with 839.33 g. The same trend was observed for S4 where GM3 leading others methods with maximum FW of 1559.33 g. However it did not show significant difference to the following, GM2, of 1149 g, but both significantly differed to GM1, method with lowest weight which takes the tail with 718 g. At S3 sub plot, the highest value was recorded by GM1 and GM3 methods with 1092.33 g and 1004 g respectively. The GM2 methods showed lowest FW of 915.67 g.

### 3.2.2.2. Production dry weight (PDW) analysis

Dry weight of the production at gashikanwa has been also analyzed and synthesized in the figure 12.

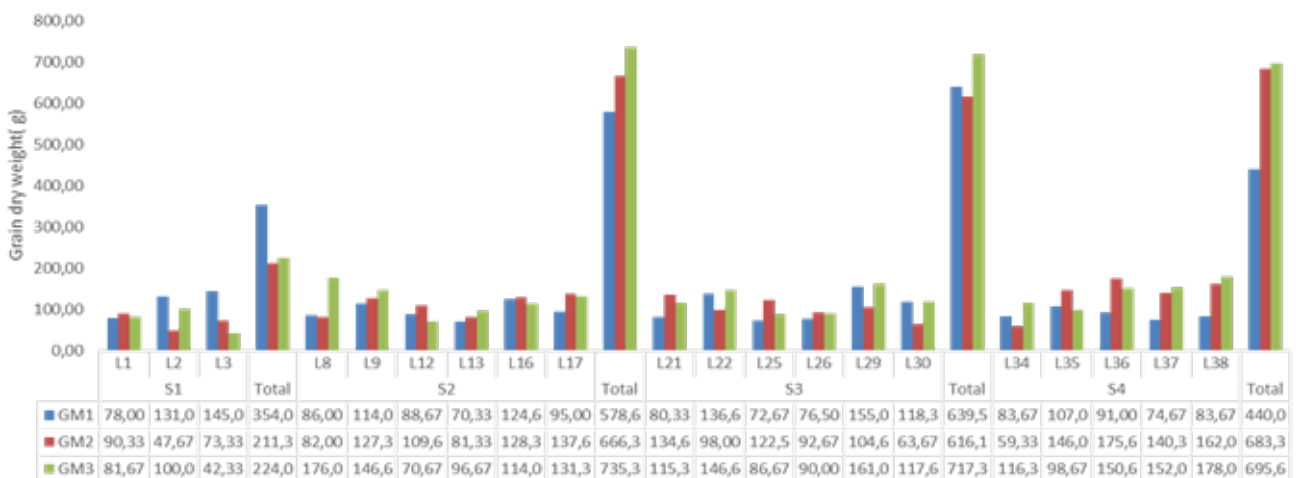


**Figure 12. Response of production dry weight to erosion control methods**

Considering this figure, the maximum PDW, on the S1, was observed for GM1, 413 g, followed by GM2, 281.67g, while GM3, 262.67 g, got the minimum. On S2, the optimum PDW of 853.67 g was observed for GM3, followed by GM2 with 794 g, while the minimum 698.67 g was obtained for GM1. Similarly, on S3, the method GM3 of 870.83 g was the first having higher production dry weight, GM2 method with 764.33 g was the second while GM1 672 g was the last. The same pattern was observed for S4, the results highlighted GM3 as the most effective methods comparatively to GM1 and GM2 as shown in Figure 12. Although GM3 did not show significant difference to the following, GM2, of 817.33 g, they both significantly differed to GM1 method which recorded lowest weight of 526.67 g.

### 3.2.2.3. Erosion control method's effects on grain dry weight

The effects of erosion control methods on grains dry weight was summed up in the following figure 13.



**Figure 13. Effect of erosion control methods on grains dry weight**

With this figure, on S1, the results showed higher grains dry weight for GM1 (354 g), followed by GM3 (224 g) and lowest weight for GM2 (211.33 g). On S2, the optimum GDW of 735.33 g was observed for GM3 which recorded highest value but there was no significant difference between other method. The second highest was the method GM2 with 666.33 g, and minimum for GM1 method of 578.67 g. For S3 and S4, the same trend was observed with maximum value for GM3 of 717.33 and 695 g respectively. The following for S3 sub plots was GM1 of 639.5 g, while it was GM2 of 683.33 g for S4. At this sub plot, statistical analysis showed significance difference between method. The methods GM3 and GM2 were significantly differed to GM1 but there was no significance difference between them.

### 3.2.2.4. Grain number response to erosion control methods

The evolution of grain number under erosion control methods has been analyzed as displayed in the figure 14 below. The GN evolution on S1 was not apparent, with a little discrepancy from a used method to another. Specifically, higher value of 1058 grains was recorded for GM1, followed by GM2 by 770 grains and minimum for GM3 with 673 grains. Considering S2, the optimum GN, 2211 grains, was observed for GM3 method, followed by method GM2 with 2035 grains, and minimum for GM1 method of 1528 grains. However these two first methods did not show significant difference but both significantly differed to method GM1. The same GN evolution was observed on S3 and S4 where the maximum GN was recorded for GM3 with 2199 grains and 2008 grains respectively.

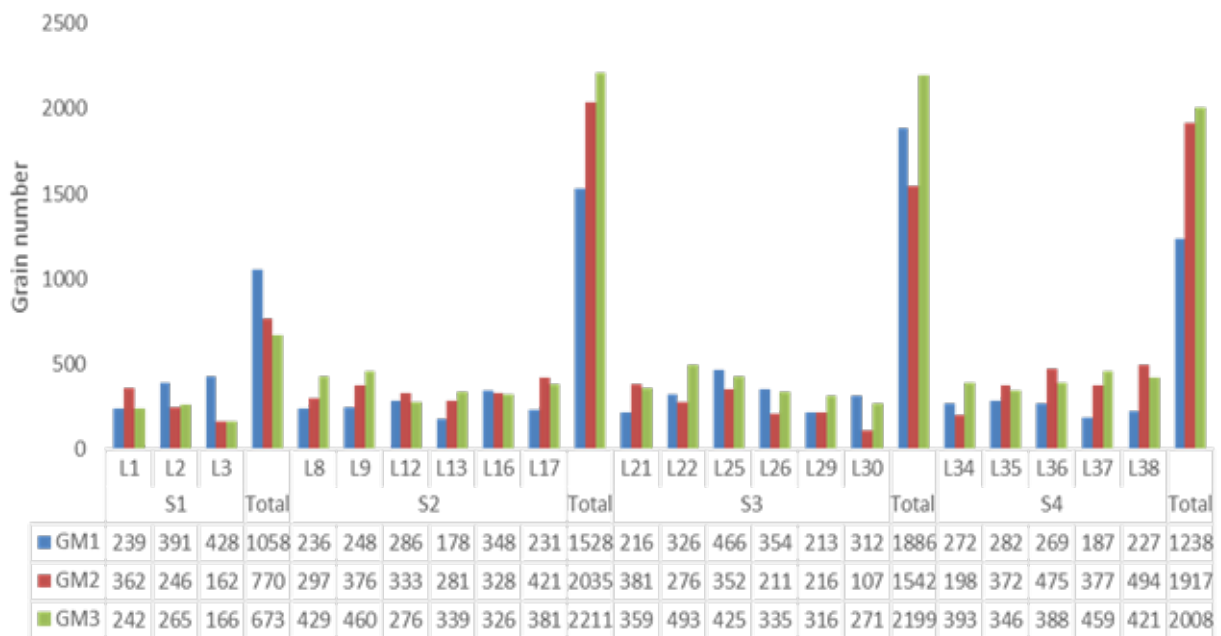


Figure 14. Grains number response to erosion control methods

As for grain dry weight, the following for S3 sub plots was GM1 of 1886 grains and GM2 method of 1917 grains for S4. At this sub plot, significance difference between method was observed. Specifically, both methods GM3 and GM2 significantly differed to method GM1, but did not show significant difference between them. Regarding the total average grains number, the highest value for plot 2 (GM2) and plot 3 (GM3) were observed on S2 with 2035 and 2211 grains, while for plot 1 it was recorded for S3 by about 1886 grains.

## 4. DISCUSSION

At Matongo, crops growth parameters on S2, S3 and S4 were effectively improved by MM4 and MM3, while for S1, MM1 was the first effective. However production parameters were significantly enhanced by the method MM4 at all sub plots. For gashikanwa, all studied parameters were effectively improved by GM3 at each sub plot except growth parameters on S1 where the traditional method GM1 was showing the improved results. This effectiveness of GM1 was due to higher quantity of small stones in this sub plot which can limit the erosion control hedges activities leading to reduced plant soil nutrients and water availability in S1 with anti erosive hedges. Moreover,

this problem coupled with root competition will result in reduced growth for GM2 and GM3, whereas GM1 showed the improved plant growth at S1 sub plot. However the comparative analysis highlighted the effectiveness of MM4 (anti-erosive ditches) at Matongo and GM3 (anti-erosion hedges and some trees of agronomic importance coupled with anti-erosive ditches) at Gashikanwa. These methods have efficiently improved plant growth parameters (Stem girth, plant height, leaves number, leaf area) and production features (fresh crop production, dry production, fresh grains number, and the dry grains weight). The effectiveness of MM4 and GM3 was probably due to the ability of these methods in controlling erosion through ditches as well as hedges and ditches coupling. These methods have the ability of retaining more water and nutrient that plant could use for its growth and development. Likewise, the efficiency of these methods in improving crop production parameters was due to their effectiveness in maintaining soil productivity as affirmed by George et al. (2018) who affirmed that the significant benefit of erosion control practices is to maintain soil productivity.

The improved leaf area and leaves number result in enhanced soil protection and water availability. Furthermore, bigger plant leaf area protect soil against evaporation and splash effect, whereas soil water and nutrient stabilization leading to higher plant growth and development. These results endorsed those of Vacca et al (2000) who reported an improved soil protection due to increased LA with applied erosion control method [16]. The enhancement of stem girth fosters plant nutrients assimilation. Moreover, it plays a key role in plant fixation. Improved growth parameters were also confirmed by Chantal et al., 2019 [17]. On one hand, increased plant height promotes photosynthesis activity which results in the synthesis of a lot of dry matter. On the other hand, plant height is one of the requirements of photosynthesis function, its achievement results in improved harvest, whereas nourished harvest. This supports the results of Todd (2017) who highlighted improved crop yield due to erosion control [18]. Furthermore, they support the results of Martha et al. (2007) [19] and Loise et al. (2016) who affirmed an enhanced crop yield due to erosion control [20]. Moreover, they endorse the finding of Chantal et al. (2021) who highlighted improved crop production due to different erosion control methods [21], as well as the results of Victor and Carmen (2008) who revealed increased crop production due to improved soil nutrients and water caused by erosion control [22].

## 5. CONCLUSION

At Matongo and Gashikanwa, methods with ditches were the most effective in improving crop growth and production parameters. At Matongo, MM4 was the identified method in improving growth parameters and production parameters comparatively to others. Furthermore, MM3 has also played an important role in improving growth parameters. At Gashikanwa, the method GM3 was recorded as the effective method for sub plots S2, S3 and S4 while for S1 the traditional method GM1 was showing the improved studied parameters. However the comparative analysis of these methods highlighted MM4 at Matongo and GM3 at Gashikanwa as the effective methods which can be used to control efficiently erosion and reduce its aggressiveness resulting in enhanced crop growth and production leading to reduced food insecurity.

The general improvement of all parameters on these sub plots could be attributed to the effectiveness of anti-erosive hedges and ditches which could effectively control erosion by decreasing the loss of soil, water and nutrients hence soil stabilization, water and nutrients availability resulting in enhanced studied parameters. However more studies are recommended especially at Gashikanwa with anti-erosive ditches alone and at Matongo with beans crops.

## Acknowledgements

The authors address heartfelt thanks to VLIR-UOS and IFDC-PAGRIS projects for funding research pertaining to the present article as well as IFDC/PAGRIS for allowing its presentation during the Forum on Soil Water Erosion Forum in Burundi.

# REFERENCES

1. Zhang S., X. Zhang, X. Ruffman, X. Liu, J. Yang (2011) Influence of topography and land management on soil nutrient variability in Northeast China. *Nutri Cycl Agroecosyst* 89 (3) : 427–438. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9406-0>
2. Krauss H. A., and R.R. Allmaras. Technology masks soil erosion effects on soil productivity—a case study in Whitman County, ~Yashington. In *Determinants of Soil Loss Tolerance*. Am. Soc. Agron., Madison, Wise. 1981, volume 16 pp.61. Doi :10.2134/asaspecpub45.c7
3. Role of banana in the functioning of farms in the highlands of East Africa (application to the case of the Kirimiro-Burundi region) [Internet]. [cited 1997]. Available from : [https:// translate.google.com/translate?hl=en&sl=fr&u=https://infoscience.epfl.ch/record/32113/%3Fln%3Den&prev=sea rch](https://translate.google.com/translate?hl=en&sl=fr&u=https://infoscience.epfl.ch/record/32113/%3Fln%3Den&prev=sea%20rch).
4. Scherr S. J. A downward spiral ? Research evidence on the relationship between poverty and natural resource degradation. *Food Policy*. 2000 ; 25(4):479–98. [https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(00\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0306-9192(00)00022-1).
5. Soil erosion: An agricultural production challenge [Internet]. [cited 2018]. Available from : <https://crops.extension.iastate.edu/soil-erosion-agricultural-production-challenge>.
6. Quantifying human impacts on rates of erosion and sediment transport at a landscape scale [Internet]. [cited 2015 Feb 01]. Available from: <https://pubs.geoscience-world.org/gsa/geology/article-abstract/43/2/171/131810/quantifying-human-impacts-on-rates-of-erosion-and?redirectedFrom=fulltext>. <https://doi.org/10.1130/G36272.1>.
7. Dormaar J.F, C.W. Lindwall, G.C. Kozub. 1988. Effectiveness of manure and commercial fertilizer in restoring productivity of an artificially eroded Dark Brown Chernozemic soil under dryland conditions. *Canadian Journal of Soil Science* 68 :669–79. <https://doi.org/10.4141/cjss88-064>.
8. Possible effects of wind erosion on soil productivity [Internet]. [cited 1975 Dec ]. Available from : [https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew\\_pdf/1466.pdf](https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/1466.pdf).
9. Soil and water conservation for productivity and Environmental Protection 4th Edition [Internet]. [cited 2003 May 17]. Available from : <https://www.amazon.com/Water-Conservation-Productivity-Environmental-Protection/dp/0130968072>.
10. Biggelaar den C. et al. 2001. Impact of soil erosion on crop yields in North America. *Adv. Agron.*
11. Gibbs, H.K. and J.M. Salmon, 2015. Mapping the world's degraded lands. *Appl. Geogr.*, 57, 12–21, doi :10.1016/J.APGEOG.2014.11.024. Gideon Neba, S., M. Kanninen, R. Eba'a Atyi, and D.J. Sonwa, 2014: Assessment and prediction of above-ground biomass in selectively logged forest concessions using field measurements and remote sensing data: Case study in South East Cameroon. *For. Ecol. Manage.*, 329, 177–185, doi :10.1016/J.FORECO.2014.06.018
12. Tony W. C., J. Balkovič, E. Paul. Dodds, C. Folberth, R. Skalsky. 2021. The impact of water erosion on global maize and wheat productivity. *Elsevier, Agriculture, Ecosystems & Environment*. Volume 322, 1 December 2021, 107655
13. Chaturvedi N, P, K. Shuka K, R. Singh, S. Yadav. 2011. Cereals nutraceuticals, health ennoblement and diseases obviation : A comprehensive review. *Journal of applied Pharmaceutical* 1 : 6 – 12
14. Cadaval A. and B.G. Escuriaza, U. Barrumtia, P.R. C. Aranceta and L. Serra. 2015. Alimentos funcionales Para Una alimentacion mas saludable. *Sociedad Espanola de Nutricion Cmunitaria (SENC)*. p. 7-8. Available from <http://www.piaschile.cl/wp-content/uploads/2015/04/Alimentos-funcionales-para-una-alimentaci%C3%B3nmas-saludable.pdf>. <https://www.webmd.com/food-recipes/corn-health-benefits>
15. Vacca A, S. Loddo, G. Ollesch, R. Puddu, G. Serra, D. Tomasi, A. Aru A. 2000. Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardinia (Italy). *Catena* 40(1):69–92. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00088-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00088-6).
16. Kwizera C., S. Ndiokubwayo, B. T. Iro Ong' Or, B. Habonimana, S. Kaboneka, S. Nijimbere and D. Niyibaruta. Effects of Erosion Control Methods on Bean Growth Parameters. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 12(35), DOI : 10.17485/ijst/2019/v12i35/130234, September 2019

17. Kamp T. 2017. Soil Nutrients and erosion control methods | Cover Crops / Geringhoff. Geringff, 2017. Available at <https://www.geringhoff.com/blog/soil-nutrients-and-erosion-control-methods>. Access on the 6th September 2018.
18. M. M. Bakker, G. Govers, A. R. Jones and D.A. M. Rounsevell. 2007. The Effect of Soil Erosion on Europe's Crop Yields, Springer-Verlag Volume 10, Issue 7, pp 1209–1219. DO I: 10.1007/s10021-007-9090-3
19. Wachira L., 2016. Soil erosion control and monitoring interventions. In Mau Mara Serengeti sustainable water initiative. Find at <http://mamase.org/news/soil-erosion-control-and-monitoring-interventions/> (accessed on the 29th August 2018)
20. V. H. D. Zuazo and C. R. R. Pleguezuelo. 2008. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA 28 (1), pp.65-86. <https://doi.org/10.1051/agro>

# Thème 10

## Dispositifs expérimentaux de lutte contre l'érosion hydrique de Gashikanwa et Matongo : Pertes physico-chimiques dans les sédiments et les eaux de ruissellement

S. Kaboneka<sup>1\*</sup>, T. Rishirumuhirwa<sup>2</sup>, S. Nijimbere<sup>1</sup>, B. Habonimana<sup>1</sup>, C. Kwizera<sup>1</sup>, S. Ndishokubwayo<sup>1</sup>, J. Ndimubandi<sup>3</sup>, J. van Orshoven<sup>4</sup>, P. Nsengiyumva<sup>1</sup> et D. Nibaruta<sup>1</sup>

1. Université du Burundi. Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie. Département Sciences Agronomiques et Environnementales. B.P. 2940 Bujumbura, Burundi.
2. Agrobiotech. BP 5667 Bujumbura, Burundi : agrobiotec2002@yahoo.fr
3. Université du Burundi. Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie. Département de Socio-Economie Rurale. B.P. 2940 Bujumbura, Burundi.
4. University of Leuven ; Department of Earth Environmental Sciences. Belgium

\* **Auteur pour correspondance : [salvator.kaboneka@gmail.com](mailto:salvator.kaboneka@gmail.com)**

### Résumé

Les études antérieures menées sur l'érosion dans les années 1990 par l'ISABU dans le Mumirwa Central (Rushubi) ont prouvé la supériorité des méthodes biologiques et culturales (0,05-11 T/ha/an) par rapport aux méthodes physiques (90-200 T/ha/an). Avec l'appui du projet VLIR/UOS-SADeR et le projet IFDC/PAGRIS, la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi suit depuis 2015 (Gashikanwa) et 2016 (Matongo) des expérimentations similaires. Dans ces dernières expérimentations, les paramètres mesurés incluent les pertes physiques et les pertes chimiques (C organique, Azote total, pH, CEC, Ca échangeable, Mg échangeable, K échangeable et P assimilable). En résumé, les pertes physiques et chimiques en terre 3-5 fois plus élevées à Matongo qu'à Gashikanwa. Dans les deux sites, par rapport aux parcelles traditionnelles sans dispositif antiérosif, la méthode de LAE basée sur la combinaison fossé isohypse + haie herbacée + arbustive + arbre agroforestier réduit très sensiblement les pertes physiques en terre. Les pertes chimiques en terre dans les sédiments et les eaux de ruissellement suivent la même tendance. Plus intéressant, ces expérimentations ont mis en lumière l'effet acidifiant de l'érosion hydrique, qui appauvrit significativement le sol en cations basiques ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) et le concentre en cations acides ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ). De là, la lutte antiérosive biologique s'impose comme une approche préventive de lutte contre l'acidification des sols, beaucoup plus économique que la pratique

chimique de chaulage. Elle diversifie le répertoire des productions au niveau de l'exploitation, en plus.

**Mots clés : Sédiments, dispositif antiérosif, fertilité, diversification, acidification**

## Abstract

Previous studies conducted on soil erosion during the 1990's by ISABU in the Central Mumirwa agro-ecological zone have proven the biological and cultural practices (0,05-11 T/ha/year) as the best erosion control methods, compared to solely physical ones (90-200 T/ha/year). With the financial support of the VLIR/UOS-SADeR and the IFDC/PAGRIS project, the Faculty of Agronomy and Bio-Engineering (FABI) of the University of Burundi conducted since 2015 (Gashikanwa) and 2016 (Matongo) erosion experimental studies testing the comparative efficacy of selected erosion control methods. Measured parameters are related to physical (loss of sediments and runoff water) as well as chemical nutrient loss (Organic C, Total N, pH, CEC, P, Exchangeable  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Al^{3+}$  and  $H^+$ ). When the two experimental sites are compared, soil physical and chemical losses are 3-5 times higher in Matongo than in Gashikanwa. Moreover, in both sites, in comparison with agriculture plots without erosion control methods, the combination ditch + herbaceous hedge + shrub + agroforestry tree drastically reduce soil loss. Soil chemical losses in both sediments and runoff water follow similar trends. More importantly Gashikanwa and Matongo experiments have highlighted the acidifying effect of surface water erosion, with selective losses of basic cations ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ), and, simultaneously, concentration in soil of acidic cations ( $Al^{3+}$ ). Hence, biological soil erosion control methods appear as an effective preventive process to soil acidification, as well as a cost effective approach, compared to lime application. Additionally, biological methods (hedges) increase and diversify household's productions and revenues.

**Key words : Sediments, antierosive structure, soil fertility, diversification, soil acidification**

## 1. INTRODUCTION

Au cours de la décennie 1980-90, l'érosion au Burundi a fait objet d'attention dans les recherches de l'ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi) à travers des essais sur des parcelles expérimentales de type Wischmeier (ISABU, 1992) et à l'échelle des bassins versants (Rushubi et Kanyosha, Mumirwa). C'est aussi pendant cette même période que Rishirumuhirwa (1997) à l'IRAZ (Institut de Recherche Agronomique et Zootechnique) a réalisé des essais sur le bananier à Mashitsi/Gitega, dans la région naturelle du Kirimiro.

Les risques d'érosion hydrique en nappe ont été estimés à 200-400 T/ha/an en moyenne (Rishirumuhirwa, 1997 ; ISABU, 1991). Plus de 20 ans après, avec l'accroissement de la pression démographique sur les terres et ses corollaires (déforestation, mise en culture des terres marginales, dégradation chimique et physique des sols, ...), les effets de l'érosion n'ont probablement fait que s'accroître. Et à un tel rythme de pertes en terres par érosion, la couche arable (25-30 cm) est décapée en quelques années, aboutissant à la disparition de la matière organique, la perte de la structure et des éléments nutritifs du sol et à l'accumulation de particules graveleuses et de pierres en surface.

Ces expérimentations ont permis de quantifier les différents facteurs de l'érosion : indice d'agressivité climatique (R), indice d'érodibilité des sols (K), le volume des pertes en terre dans différentes conditions, d'hierarchiser l'importance de chacun des facteurs, de déterminer l'efficacité des techniques antiérosives utilisées et de choisir les techniques culturales les plus appropriées et les plus facilement acceptables en milieu paysan. C'est ainsi que l'efficacité de différents dispositifs antiérosifs, mécaniques (terrasses radicales, fossés, lignes de pierres et andains de déchets végétaux) et biologiques (boisements, haies vives, bananeraies aménagées, paillage) ont été évalués et comparés quant à leur efficacité vis à vis des pertes en terres. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité des dispositifs agronomiques/biologiques (paillage, boisements, haies mixtes) par rapport aux structures mécaniques (rangées de pierres, banquettes) et surtout par rapport aux fossés aveugles pour lesquels près de 100 T/ha/an ont été enregistrés

dans le Mumirwa. De ce fait, l'efficacité des fossés isohypses a été à l'époque mise en cause (ISABU, 1991).

Il apparaît dès lors que, à part les deux travaux précités, la zone la plus étendue du pays (52 %), la plus peuplée et partant la plus intensivement exploitée pour des activités agricoles, à savoir les plateaux centraux, n'a bénéficié que de peu d'attention dans ce genre de recherche. De plus, à cause de la crise sociopolitique qui a prévalu au Burundi dès 1993 et qui a duré plus de 15 ans, les résultats des recherches ci-haut citées n'ont pas pu être vulgarisés et valorisés à grande échelle, au-delà des zones d'expérimentation de Rushubi et Kanyosha (Mumirwa) et de Kirimiro.

C'est pour cette raison qu'a été proposée une étude qui vise à diagnostiquer les problèmes d'érosion dans les provinces de Ngozi (2014) et de Kayanza (2016) faisant partie de la zone des plateaux centraux et aux régions naturelles du Buyenzi et du Mugamba.

Dans le but de documenter l'état de la situation et faire des propositions concrètes aux agriculteurs, nous avons entrepris cette étude sur le potentiel de la haie mixte et des fossés isohypses pour la réduction de l'érosion dans les zones densément peuplées du Nord du pays. L'étude s'intègre dans le cadre du Projet SAdER (Sécurité Alimentaire pour le Développement Rural) financé par la coopération interuniversitaire belgo-burundaise – VLIR/UOS). Le défi majeur auquel fait face quotidiennement l'agriculteur est de pouvoir augmenter la productivité des terres lorsque la taille de l'exploitation s'amenuise de plus en plus et que l'exploitant doit satisfaire aussi bien ses besoins en alimentation, en fourrage et en bois énergie à partir de cette même petite exploitation.

Les haies vives fonctionnent comme des micro-barrages perméables très efficaces contre l'érosion et le ruissellement (Roose, 2017). Mais sont-elles aussi ou plus efficaces que les fossés isohypes ? Ou alors leur combinaison donnerait de meilleurs résultats ? D'autre part, qu'en est-il de la rentabilité de ces techniques et de la pénibilité du travail pour leur mise en œuvre ? Ce sont là des éléments pouvant influencer l'adoption de la technologie par l'agriculteur.

Les dispositifs expérimentaux de mesure de l'érosion à partir desquels les données traitées dans cette note ont été générées ont été installés en commune Gashikanwa de la province Ngozi et à Matongo de la province Kayanza (Figure 1), au sein même des exploitations agricoles, un moyen d'y associer l'agriculteur et stimuler dès le départ son intérêt et sa participation à leur évaluation.

Les objectifs et les activités du « sous-projet Erosion », une des composantes du projet SAdER, sont détaillés dans l'article présenté par Habonimana et al. (2024) paru dans ce même document. En résumé, le sous-projet « Erosion » vise l'amélioration de la productivité du capital foncier par une proposition de techniques expérimentées en milieu réel. L'objectif ultime est d'améliorer la productivité des terres et la sécurité alimentaire des populations de la zone d'étude avec comme objectifs spécifiques :

1. Comprendre les phénomènes, causes et impacts de l'érosion dans les provinces du Nord du Burundi densément peuplées ;
2. Evaluer l'efficacité comparée de la pratique culturelle traditionnelle et les techniques antiérosives innovantes sur la gestion conservatoire des eaux et des sols ;
3. Contribuer à la vulgarisation des techniques de conservation des eaux et des sols jugées efficaces et économiquement rentables.

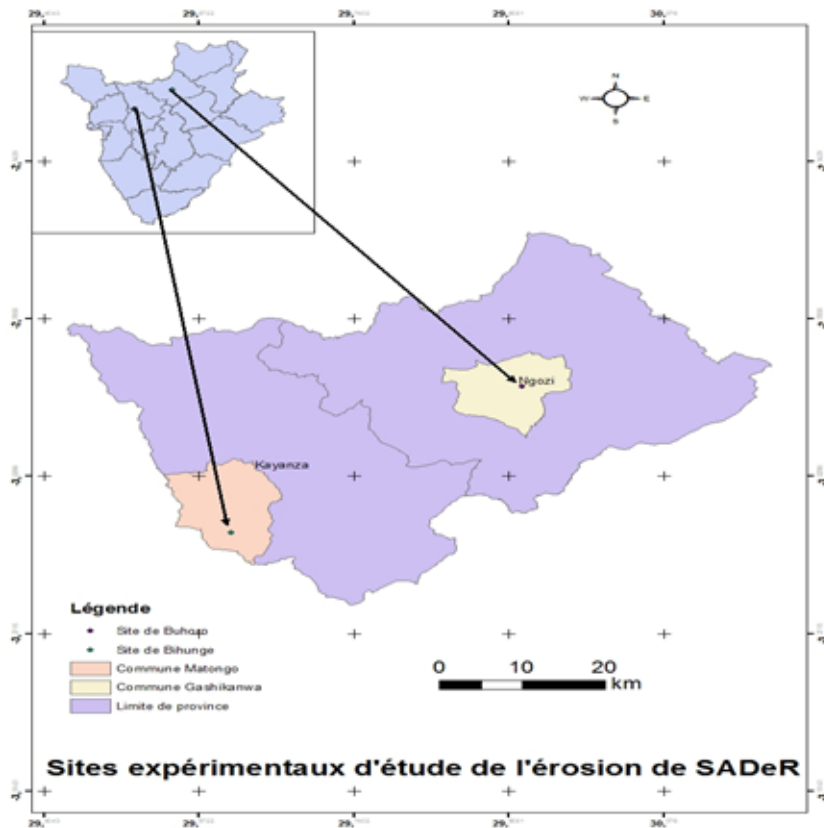


Figure 1. Localisation des sites expérimentaux d'étude sur l'érosion hydrique à Gashikanwa et Matongo

## 2. MATERIELS ET METHODES

### a. Description des dispositifs antiérosifs

Les dispositifs expérimentaux utilisés ont été largement décrits par Habonimana et al. (2024). Ils se sont inspirés du modèle de Wischmeier et Smith (1978) qui lie les pertes en terre à une série de facteurs avec effet multiplicateur, selon l'équation ci-après.

$$A = R * K * LS * C * P$$

A = Pertes en terres (T/ha) - mesurées

R = Agressivité ou Erosivité des pluies (J/ha)

K = Erodibilité ou susceptibilité des sols à l'érosion (T/J)

L = Longueur de la pente (m)

S = Pente (%)

C = Mode cultural/techniques culturales (0-1)

P = Dispositifs antiérosifs (0-1)

Le dispositif expérimental mis en place s'inspire des travaux de Rishirumuhirwa (1997). Les parcelles sont séparées par des murets pour éviter toute communication ou fuite des eaux de ruissellement. La collecte des eaux de ruissellement et des pertes en terres est assurée par un système de fûts (montés en série de 3 par parcelle) communiquant par des partiteurs (Figure 2). Les fûts sont munis de couvercles pour ne collecter que les eaux issues des parcelles expérimentales et sont placés en bas de chaque parcelle à laquelle ils sont connectés par des tuyaux PVC.



**Figure 2. Système de collecte des pertes en terre et des eaux de ruissellement utilisé dans les expérimentations de Gashikanwa et Matongo.**

Dans chacune des parcelles expérimentales, les pertes en terre sont collectées en aval des parcelles expérimentales par un système de fûts en série interconnectés par des tuyaux. Les deux premiers fûts sont munis de 10 partiteurs qui facilitent l'évacuation par terre de surplus d'eaux de ruissellement (Figure 2). Un seul des 10 partiteurs est connecté au fût suivant. Les pertes en terre totales, de même que le ruissellement total sont estimés avec un facteur multiplicatif de 10 entre le deuxième et le premier fût et un facteur multiplicatif de 100 entre le troisième et le premier fût. Les différentes parcelles sont définies comme suit :

- G<sub>1</sub>** Parcelle dite traditionnelle sans aucune mesure de lutte antiérosive (Témoin).
- G<sub>2</sub>** Parcelle comportant 3 haies mixtes isohypses : deux lignes de Bana grass espacées de 50 cm x 50 cm, une ligne de Calliandra calothyrsus et des arbres de Grevillea robusta espacés de 4 m dans la même ligne que le calliandra.
- G<sub>3</sub>** Parcelle combinant la haie mixte et le fossé isohypses de 50 cm de largeur x 50 cm profondeur.
- G<sub>4</sub>** Parcelle dite de Wischmeier fait 100 m<sup>2</sup> (20 m x 5 m), une parcelle témoin pour les études de pertes en terre et les eaux de ruissellement régulièrement nettoyée de toute végétation.

Le dispositif expérimental est installé sur une pente de 42 % suivant le modèle Gashikanwa (pente de 41 %), sauf qu'il comporte une parcelle avec un fossé isohypse seul (M5). La haie mixte comprend aussi une double ligne de Calliandra, à la différence de Gashikanwa où une seule haie à Calliandra était installée. Ainsi les traitements sous expérimentations à Matongo sont :

- M<sub>1</sub>** Parcelle non aménagée.
- M<sub>2</sub>** Parcelle à haie mixte.
- M<sub>3</sub>** Parcelle à haie mixte combinée au fossé isohypse.
- M<sub>4</sub>** Parcelle avec fossé isohypse seul.
- M<sub>5</sub>** Parcelle (témoin) de Wischmeier de la même dimension qu'à Gashikanwa.

## 2.2 Paramètres mesurés

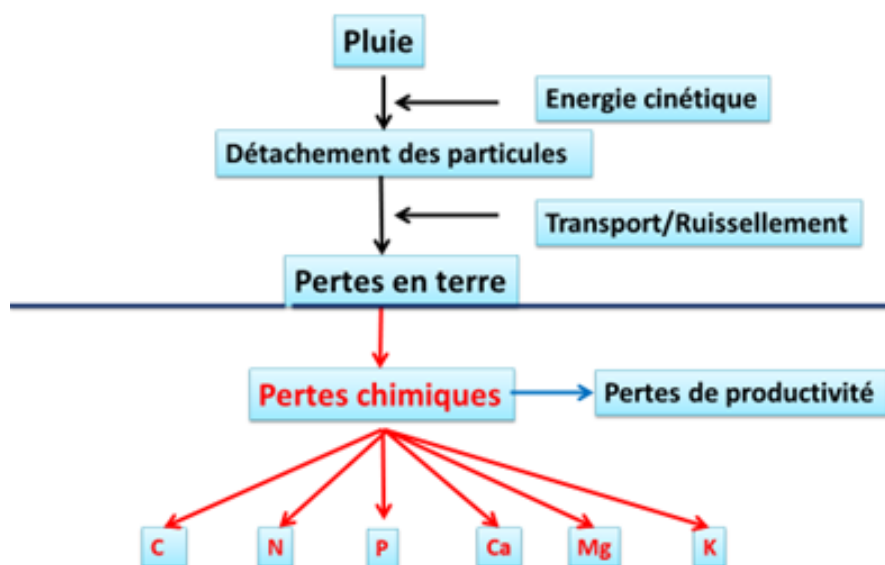


Figure 3. Schéma d'analyse physique et chimique des pertes en terre

Deux des valeurs ajoutées des expérimentations de Gashikanwa et Matongo par rapport aux précédentes études menées au Burundi sont constituées des analyses chimiques dans les sédiments et les eaux de ruissellement. Auparavant, les études étaient beaucoup plus concentrées sur les pertes physiques (tonnages). Plus que les pertes physiques, les pertes chimiques expriment mieux la dégradation chimique et la perte de fertilité des sols et de leur productivité. A la fin des expérimentations de Gashikanwa et de Matongo (premier semestre 2023), notre intérêt a porté sur les pertes chimiques dans les eaux de ruissellement, en plus de leur quantification volumétrique.

Les paramètres mesurés étaient les suivants : Pluviométrie journalière, mensuelle et annuelle, hauteur des pluies ruisselées, taux de MS et contenus en eau des sédiments, volume d'eau ruisselée, pluies érosives, pluies ruisselantes, ratio sédiments (kg)/ruissellement (L) pour appréhender l'effet filtre, % de ruissellement annuel moyen (Kram), % de ruissellement maximum (K<sub>rmax</sub>), analyses chimiques : pH<sub>eau</sub>, % C organique, % N Total, Ca, Mg, K, Capacité d'Echange Cationique (CEC), Al et équivalents engrais/amendements des pertes chimiques en terre (DAP, KCl, CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>).

Les analyses chimiques des sédiments et des eaux de ruissellement ont été effectuées au Laboratoire de l'ISABU (LASPA) suivant les méthodes standards. Le protocole suivi pour l'enregistrement des pertes en terre et des eaux de ruissellement comprend les étapes suivantes :

- Mesurage de la hauteur (H1 en cm) des eaux de ruissellement collectées dans les fûts à l'aide d'une latte graduée (50 cm) (à partir du bord supérieur des fûts jusqu'au niveau des eaux de ruissellement collectées dans les fûts) ;
- Décharge des eaux de ruissellement par siphonage ;
- Mesurage de la hauteur (H2 en cm) d'accumulation des pertes en terre dans les fûts : la différence entre H2 et H1 donnant la hauteur de l'eau surnageante, c'est à dire une partie des eaux ruisselées, l'autre partie qui est mélangée aux sols érodés est estimée après étuvage. Le volume des eaux surnageantes est évaluée par la formule suivante :  $V \text{ (Litre ou dm}^3\text{)} = (H2-H1) \times (C^2/4 \pi) \times 1.000$ , avec C = circonférence du fût (cm) ; H2-H1= hauteur de l'eau surnageante (cm) ;  $C^2/4 \pi$  = surface de base du fût.
- Mesurage des terres collectées à l'aide d'une balance. Les quantités totales (sols + eaux) sont notées dans un registre.
- Prise d'un échantillonnage de sol + eau (1 kg, 2 pots) pour étuvage et estimation de la matière sèche des pertes en terre et du reste des eaux ruisselées (en plus de l'eau surnageante estimée ci-haut).

- Bien nettoyer à l'eau les fûts après chaque opération de mesurage ;
- Etuvage des échantillons de sol (+ eaux) ;
- Mesurage des pertes sèches de sol après étuvage et extrapolation au niveau des parcelles expérimentales et de la surface de référence MKSA (ha);
- Estimation après étuvage de l'eau de ruissellement collectée avec les échantillons étuvés et l'ajouter aux quantités d'eaux de ruissellement mesurées par la méthode de la différence des hauteurs (H1 et H2).

La quantité des terres perdues par période (semaine, mois, année) est estimée par sommation des pertes en terre enregistrées à chaque événement pluvieux durant cette période. Les pertes chimiques dues à l'érosion sont calculées sur base des analyses chimiques des échantillons de sol. A chaque événement pluvieux ayant causé du ruissellement et des pertes en terre, ces dernières, collectées dans les fûts étaient quantifiées, après mesure des hauteurs d'eau surnageante. Les boues restant après siphonage de l'eau surnageante étaient mesurées à l'aide d'une balance et un échantillon est pris pour calculer la matière sèche et le contenu en eau après étuvage à 105°C pendant 48 heures.

Par la suite, les valeurs de matières sèches des sédiments ont été utilisées pour estimer les pertes totales enregistrées par hectare sur base des dimensions des parcelles expérimentales. Dans le but d'évaluer les pertes en principaux éléments nutritifs, aussi bien dans les sédiments que dans les eaux de ruissellement, des analyses chimiques ont été effectuées pour le pH, le % C organique, % N organique, Phosphore, Ca, Mg, K, CEC et l'acidité échangeable.

Les mêmes analyses ont été effectuées au démarrage de l'étude pour caractériser le sol. Le pH a été mesuré dans une suspension sol/eau dans un rapport 1 : 5. L'azote a été dosé par la méthode de Kjeldahl et le C organique par la méthode de Walkley-Black. La CEC et les bases échangeables ont été dosés par la méthode utilisant l'acétate d'ammonium 1N tamponnée au pH = 7,0. Les bases échangeables ont été dosées par spectrophotométrie d'absorption atomique. L'ion ammonium adsorbé a été désorbé par percolation d'une solution de KCl 10 %, pH = 3,0 et dosé par distillation et titrage pour déterminer la CEC du sol. Les détails des protocoles analytiques sont décrits par Kibiriti et al., 1986.

## 3. RESULTATS ET DISCUSSION

### a. Caractéristiques des sols

Les sols de Gashikanwa sont argileux, lourds et fertiles. Les sols de la commune Matongo sont des ferrisols anthropiques argileux et améliorés par des labours fréquents et des apports organiques. Ils sont globalement pauvres en éléments, particulièrement en P (carence élevée) et en cations basiques (Ca, Mg et K) avec des risques de toxicité aluminique (Tableau 1).

Cette situation est beaucoup plus manifeste à Gashikanwa qu'à Matongo. Dans tous les deux cas, les ordres de grandeur des éléments cationiques sont à dominance aluminique dans l'ordre décroissant suivant : Al > Ca > Mg > K. De plus, dans le sol de Gashikanwa, le seul Al représente près de 8 fois la somme des cations basiques Ca, Mg et K, et autant dans le sol de Matongo. A Gashikanwa, le K échangeable représente la moitié de la somme du Ca et du Mg échangeable, alors que les deux sols sont autant riches en Mg qu'en K échangeable.

**Tableau 1. Caractéristiques chimiques des sites de Gashikanwa et Matongo**

Paramètre	Gashikanwa	Matongo
pHeau	5,38	5,04
% C organique	1,28	1,32
% N total	0,42	0,21
C/N	3,05	6,29
P (O-D) (mg/kg)	13,7	2,98
CEC (cmolec/kg)	13,2	10,5
Ca échangeable (cmolec/kg)	0,17	1,12
Mg échangeable (cmolec/kg)	0,10	0,42
K échangeable (cmolec/kg)	0,14	0,34
Al échangeable (cmole c/kg)	3,27	1,70
Al/(Ca + Mg + K)	7,98	0,90
K/(Ca + Mg)	0,52	0,22
Mg/K	0,71	1,24

### 3.2 Ruissellement

Le ruissellement a été appréhendé sous 5 aspects : (i) les moyennes des pluies érosives et des pluies ruisselantes qui ont effectivement causé les pertes en terre et le ruissellement tels que mesurés dans les systèmes de collecte en aval des parcelles expérimentales ; (ii) le ratio sédiments (kg)/ruissellement (L) ; les taux de ruissellement moyens (Kram) et maximum (K<sub>rmax</sub>). Le coefficient de ruissellement est donné par le rapport entre la quantité d'eau recueillie dans le dispositif de collecte et la quantité totale tombée sur chaque parcelle, exprimé en %. Il est calculé pour chaque averse (K<sub>r</sub>), avec un pas de temps décadaire, mensuel et annuel. On en déduit le ruissellement mensuel et annuel moyen (Kram). On s'intéresse aussi au ruissellement maximal (K<sub>rmax</sub>) correspondant au plus fort ruissellement enregistré au cours d'une averse pendant l'année (Rishirumuhirwa, 1997).

Au lecteur est rappelé que la parcelle de Wischmeier (G4 et M4) est constituée par une parcelle nue continuellement sarclée qui n'a aucun intérêt en vulgarisation. Elle est utile pour déterminer le facteur K de l'équation universelle des pertes en terre de Wischmeier et Smith (1978), autrement appelé le facteur d'érodibilité ou susceptibilité du sol à l'érosion. Ainsi, à Gashikanwa, le traitement G3 constitué de la haie mixte avec fossé isohypse est caractérisé par des valeurs les plus faibles de pluies ayant causé de pluies érosives (16), de ratio sédiments/ruissellement (0,017), de Kram (4 %) et K<sub>rmax</sub> (25,4 %). De l'autre côté, sur la parcelle traditionnelle (G1), les pluies érosives sont 63 % plus élevées que dans la parcelle G3. Pareils chiffres de comparaison sont + 94,1, + 67,5 et 78,3 % pour les paramètres « pluies ruisselantes », % Kram et % K<sub>rmax</sub>. Le traitement G2 constitué de la seule haie mixte occupe une position intermédiaire entre G1 et G3.

Le paramètre « pluies ruisselantes » ne permet pas clairement de dissocier les traitements testés et montre même un plus grand nombre de pluies ruisselantes pour le traitement G3 considéré comme le plus efficace contre l'érosion sur base des autres paramètres : pluies érosives, ratio sédiments (kg)/ruissellement (L), et les % de ruissellement.

**Tableau 2. Paramètres d'érosion sur les parcelles expérimentales de Gashikanwa : 2015-2023**

Paramètre	G1	G2	G3	G4
Pluies érosives (moyenne)	26,1	18,7	16	28,7
Pluies ruisselantes (moyenne)	81,4	81,8	89	82,1
Ratio Sédiments (kg)/Ruissellement (L)	0,033	0,017	0,017	0,05
% Ruissellement moyen (Kram)	6,7	6,5	4	16,2
% Ruissellement max (K <sub>rmax</sub> )	45,3	38,3	25,4	52,6

Dans le cas du site de Matongo, le tableau 3 met en parallèle les traitements M3 (haie mixte + fossé) et M4 (fossé seul) qui affichent des performances comparables vis-à-vis du ruissellement. Ils sont cependant largement supérieurs aux traitements M1 et M2 sur base des paramètres de ruissellement considérés. Le traitement M3 limite plus efficacement les pluies érosives, réduit le ratio sédiments (kg)/ruissellement (L) et le % Kram par rapport au traitement M4, lequel réduit plus les pluies ruisselantes et le % Kmax. Seule une analyse économique pourrait démontrer la hiérarchisation entre les deux traitements, considérant que le traitement M3 fournit en plus de la biomasse produite avec les composantes herbacées, arbustives et arborées associées au fossé isohypse.

Cependant, dans pratique, pour un bon fonctionnement des fossés, des opérations régulières de curage sont nécessaires. Il est de coutume d'appliquer les sédiments issus du curage en amont des fossés, engageant de ce fait de la main d'œuvre utilisée pour les travaux de curage. Cette activité supplémentaire a été tenue en compte dans l'analyse de rentabilité des différents traitements antiérosifs dans une autre analyse présentée ailleurs (Habonimana et al., 2024).

**Tableau 3. Paramètres d'érosion sur les parcelles expérimentales de Matongo : 2017-2023**

Paramètre	M1	M2	M3	M4	M5
Pluies érosives (moy.)	40,2	32,7	22,7	24,5	37
Pluies ruisselantes (moy.)	83,1	77,9	78,4	72,7	84,6
Ratio Séd.(kg)/Ruissel. (L)	0,17	0,11	0,08	0,09	0,08
% Ruissel. moyen (Km)	9,6	10,2	5,9	6,3	21,4
% Ruissel. max (Kmax)	51,3	62,1	49,9	37,2	74,3

Les figures 4 et 5 qui détaillent les ruissellements observés sur les sites de Gashikanwa (2015-2023) et de Matongo (2017-2023) confirment l'analyse précédente : le traitement G3 est plus efficace contre le ruissellement à Gashikanwa, tandis les traitements M3 et M4 montrent une efficacité comparable. Ces derniers dispositifs antiérosifs réduisent considérablement le ruissellement et comme sera relevé par après, les pertes en terre aussi, puisque le ruissellement constitue la force de transport des particules de sol hors champ. Son efficacité vis-à-vis du ruissellement est comparable aux résultats obtenus ailleurs au Burundi avec des dispositifs antiérosifs biologiques. C'est ainsi que Duchaufour et al. (1992) ont observé des taux de ruissellement annuels de l'ordre de 3,9 à 6,7 % sur des caféiers paillés tous les 10 m et avec des haies mixtes Calliandra + Setaria sur des pentes de 45 % dans le Mumirwa central. Parallèlement, les travaux de Rishirumuhirwa (1992) à Mashitsi dans le Kirimiro ont avancé des taux de ruissellement de la magnitude. Le paillis complet du bananier réduit le ruissellement annuel moyen à moins de 1% contre 20% sur la parcelle nue, 4,8 à 6,2% pour le paillis en couronne et 2% pour le paillis en bandes.

Ces différents travaux confirment l'efficacité des structures antiérosives biologiques dans trois régions naturelles du Burundi, plus enclin à l'érosion hydrique, de par leur topographie et l'occupation spatiale à fortes densités de la population.

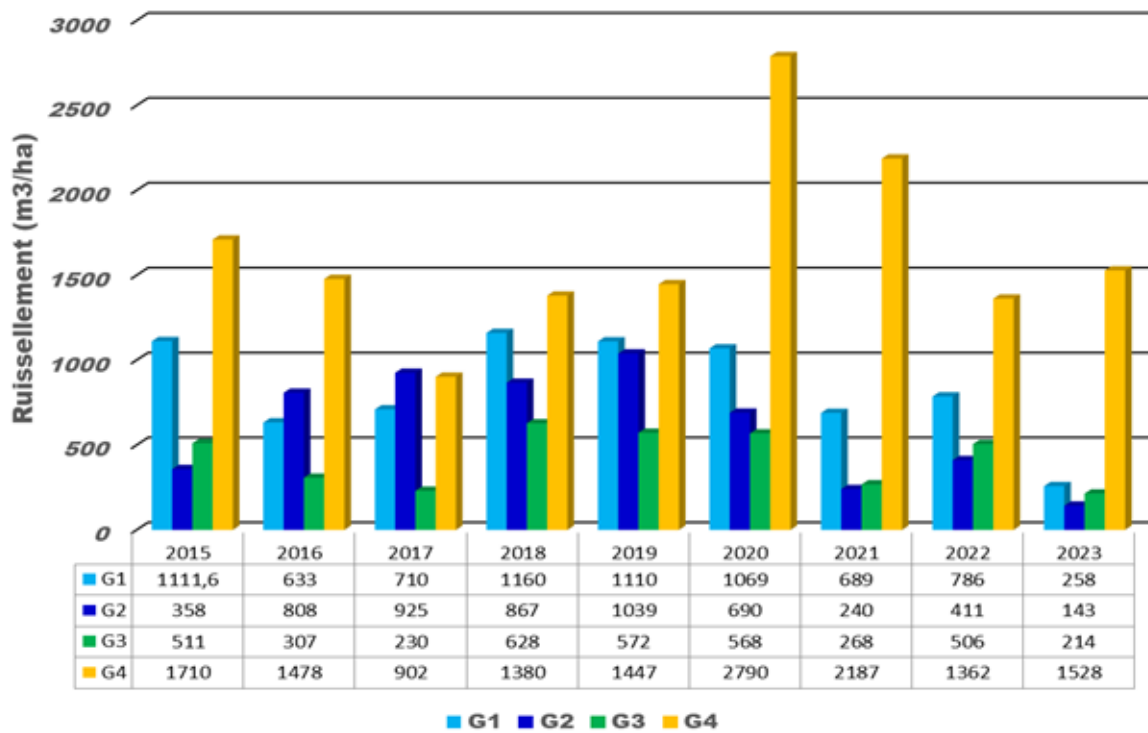


Figure 4. Evolution du ruissellement ( $m^3/ha$ ) au site de Gashikanwa de 2015 à 2023 (9 ans)

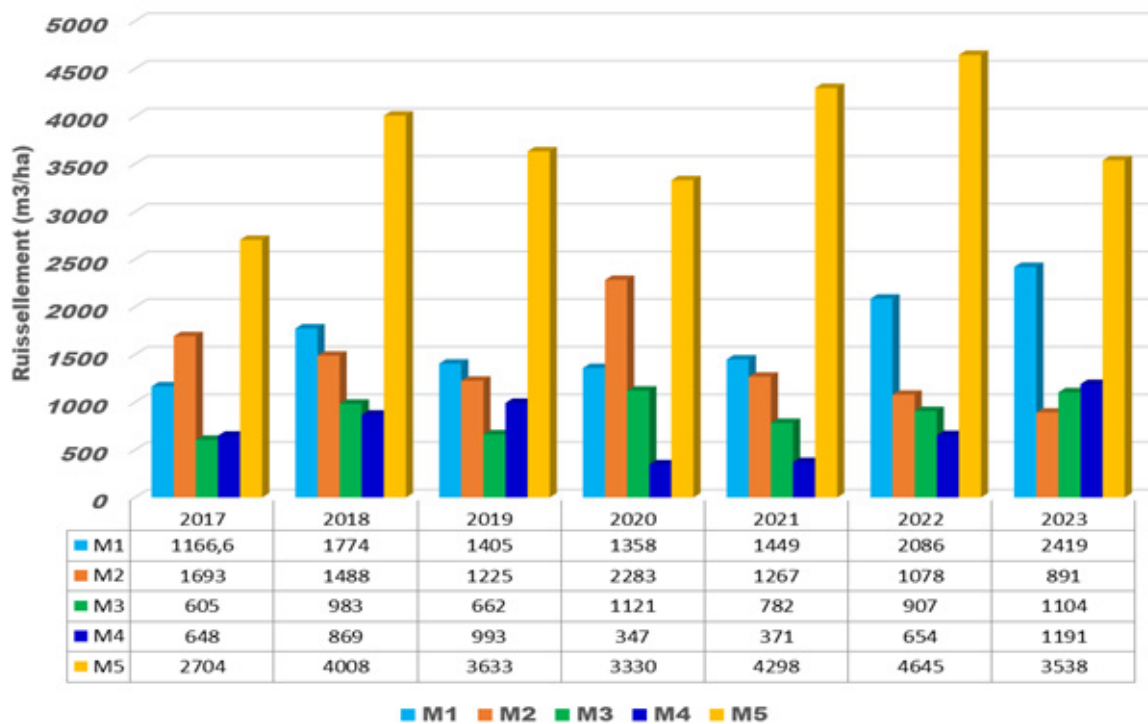


Figure 5. Evolution du ruissellement ( $m^3/ha$ ) au site de Matongo de 2017 à 2023 (7 ans)

### 3.3 Pertes en terre (sédiments)

Les pertes en terre correspondent au paramètre A de l'équation universelle des pertes en terre de Wischmeier et Smith (1978). Deux représentations des pertes en terre ou sédiments sur les sites de Gashikanwa (2015-2023) et Matongo (2017-2023) sont proposées : les pertes cumulées (Tableaux 4 et 5) et les pertes réparties sur la durée des études pour illustrer d'éventuelles variabilités interannuelles (Figures 6 et 7). C'est la même approche qui a été utilisée pour le ruissellement.

**Tableau 4. Pertes en terre et ruissellement cumulés à Gashikanwa : 2015-2023 (9 ans) Paramètre**

Paramètre	G1	G2	G3	G4
Sédiments (T/ha)	256,6	90,4	31,9	384
Ruissellement (m <sup>3</sup> /ha)	7527	5481	3804	14784

**Tableau 5. Paramètres d'érosion sur les parcelles expérimentales de Matongo : 2017-2023 (7 ans)**

Paramètre	M1	M2	M3	M4	M5
Sédiments (T/ha)	1757	1059	386	545	1976
Ruissellement (m <sup>3</sup> /ha)	11658	9925	6164	5073	26156

Les tableaux 4 et 5 présentent l'intérêt de mettre en comparaison les deux sites de Gashikanwa et de Matongo, mais également les deux indicateurs physiques de l'érosion hydrique : les pertes en terre ou sédiments et le ruissellement.

Sur 9 ans d'expérimentation à Gashikanwa, la haie mixte associée au fossé isohypse réduit les pertes en terre (sédiments) de près de 3 fois (2,83) par rapport à la haie mixte seule et de 8 fois par rapport à la culture traditionnelle sans dispositif antiérosif. Pour ce qui du ruissellement, les mêmes calculs relèvent que la haie mixte consolidée par le fossé isohypse (G3) diminue les pertes en terre de 2 fois par rapport au traitement G1 et de 1,4 fois en comparaison du traitement G2. De l'autre côté, sur une période de 7 ans de recherche sur le site expérimental de Matongo, la haie mixte associée au fossé isohypse réduit les pertes en terre de près de 3 fois (2,82) les pertes en terre (sédiments) par rapport à la haie mixte seule (M2) et de 4,6 fois par rapport à la culture traditionnelle sans dispositif antiérosif (M1). Ceci est une confirmation de l'efficacité de la double structure biologique (haie mixte) et physique (fossé antiérosif). Par contre, sur le site expérimental de Matongo, le traitement M4 est plus efficace dans la réduction du ruissellement par rapport aux traitements M3, M2 et M1. Il réduit en effet de 1,2 fois le ruissellement par rapport au traitement M3, 2 fois par rapport au traitement M2 et de 2,3 fois par rapport à la culture traditionnelle sans dispositif antiérosif. C'est une encore une fois une confirmation de l'efficacité de la double structure biologique (haie mixte) et de la structure physique (fossé antiérosif) dans la lutte contre l'érosion hydrique au Burundi.

La répartition des pertes en terre sur toute la période des expérimentations de Gashikanwa (9 ans) et Matongo (7 ans) engendre les figures 6 et 7, respectivement pour le site de Gashikanwa et le site de Matongo.

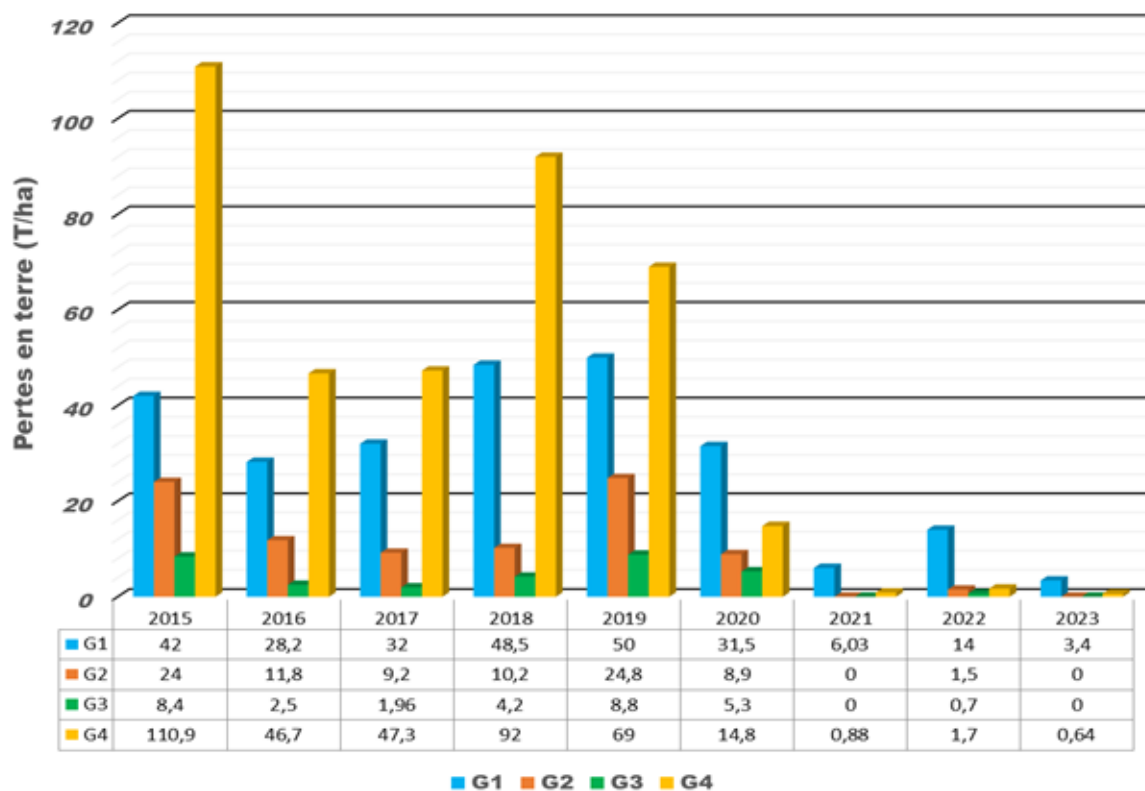


Figure 6. Evolution des pertes en terre (T/ha) au site de Gashikanwa de 2015 à 2023 (7 ans)

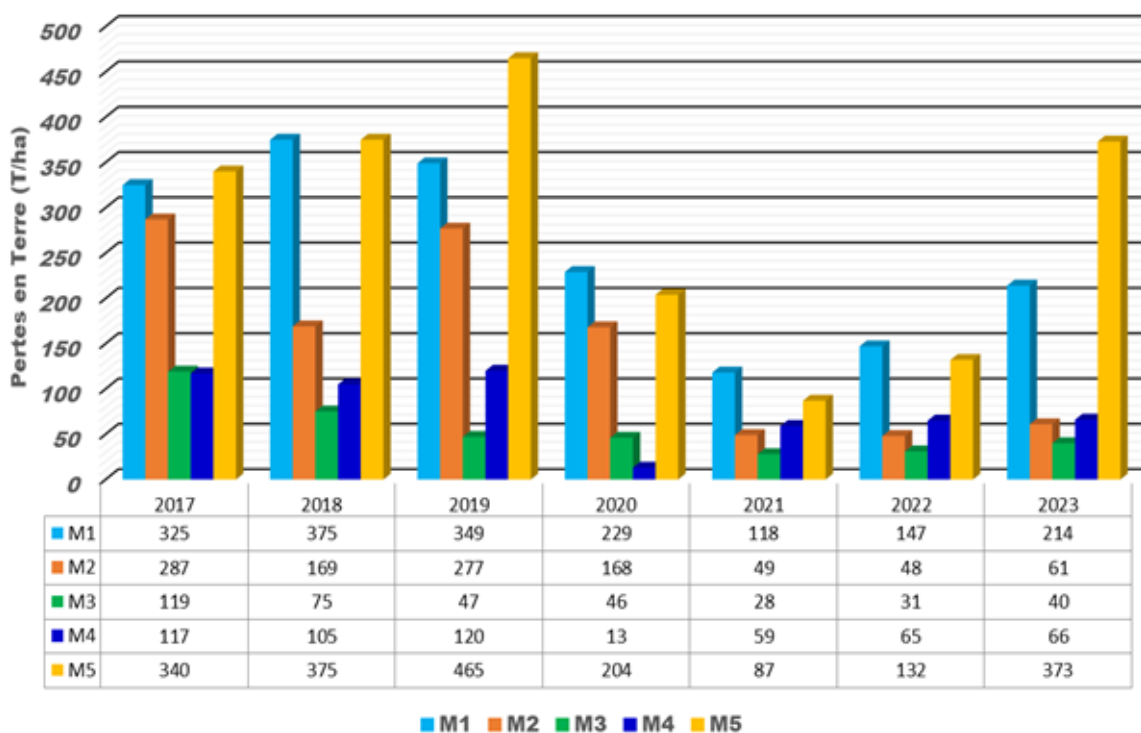


Figure 7. Evolution des pertes en terre (T/ha) au site de Matongo de 2017 à 2023 (7 ans)

Les figures 6 et 7 ont l'avantage de démontrer la variabilité interannuelle des pertes en terre ou sédiments sur les sites d'étude de l'érosion hydrique de Gashikanwa et de Matongo. Dans l'ensemble, il apparaît que les pertes en terre diminuent progressivement et de manière sensible à partir de l'année 2020 : la 5<sup>ème</sup> année d'expérimentation au site de Gashikanwa et la 4<sup>ème</sup> au site de Matongo. Cette période correspond à une stabilisation de l'effet antiérosif des dispositifs antiérosifs d'un côté et la disparition quasi complète de la terre arable sur la parcelle de Wischmeier, laissant apparaître une pierrosité.

Un aperçu des travaux similaires effectués dans le pays ou dans la région montrent des résultats similaires ou comparables aux résultats obtenus aux sites de Gashikanwa et Matongo. A titre d'exemple, Rishirumuhirwa et Roose (2017) rapportent des pertes moins importantes sur une pente de 8 % à Mashitsi près de Gitega dans la région naturelle du Kirimiro. Les quantités de pertes en terre enregistrées sur les parcelles cultivées variaient entre 16,7 T/ha sur 3 ans pour des bananiers espacés de 2 x 3 m à 57,8 T/ha sur la même période de 3 ans sur du bananier avec un plus large espacement (5 m x 3 m). De l'autre côté, des expérimentations similaires menées au Rwanda à la station de Rubona avec des pentes variant entre 15 et 35 % (Ndayizeye, 2017) rapportent des pertes en terre allant de 250 à 500 T/ha/an sur la parcelle (nue) de Wischmeier et de 40 à 270 T/ha/an sur la parcelle traditionnelle témoin. Par contre, l'auteur rapporte des pertes en terre sensiblement inférieures sur des parcelles aménagées avec des haies arbustives à base de Calliandra ( $\leq 36$  T/ha/an), de Leucaena ( $\leq 70$  T/ha/an) et de haies mixtes Calliandra + Setaria ( $\leq 30$  T/ha/an). L'efficacité de ces structures biologiques augmente avec le temps jusqu'à réduire les pertes en terre à moins de 1 ou 2 T/ha/an après 3 à 4 ans d'expérimentation. Cette tendance de diminution des pertes en terre avec le temps est vérifiée sur nos sites d'expérimentation (Figures 6 et 7). D'autres études conduites par l'ISABU (Duchaufour et al., 2017) sur un sol ferrallitique argileux humifère profond et acide du Mumirwa sur des pentes de 28 % ont montré un minimum des pertes en terre ( $\leq 1$  T/ha/an) observé avec des haies herbacées (Setaria) et arbustives (Calliandra) et le paillage épais (7-10 cm) et léger en plein (1,5-2 cm). La haie mixte renforcée avec le fossé antiérosif montre les mêmes quantités de pertes en terre (Figures 6 et 7) dans les sites expérimentaux de Gashikanwa et Matongo.

### 3.4 Variation mensuelle des pertes en terre

Logiquement, les pertes en terre et le ruissellement suivent une distribution bimodale calquée sur la distribution bimodale des précipitations. Ainsi, les événements pluvieux les plus érosifs sont observés aux mois de mars, avril, octobre et novembre, comme l'illustre la figure 8 choisie comme exemple illustratif sur l'année 2016 à Gashikanwa. Cette figure 8 indique effectivement que plus des 3/4 des pertes en terre (75 %) sont enregistrées au cours de ces 4 mois. De ce fait, ces 4 mois de l'année sont les plus critiques en matière de lutte antiérosive. Autrement dit, il faudrait s'assurer que pendant cette période spécifique de l'année, les fossés isohypses sont curés et que les haies mixtes agroforestières jouent de manière optimale leur effet filtre et barrière. Ceci est d'autant capital que cette période de l'année correspond aussi aux travaux, tels que la préparation de terrain, le semi/plantation des cultures et le sarclage qui constituent des opérations conductrices à plus d'érosion hydrique en nappe.

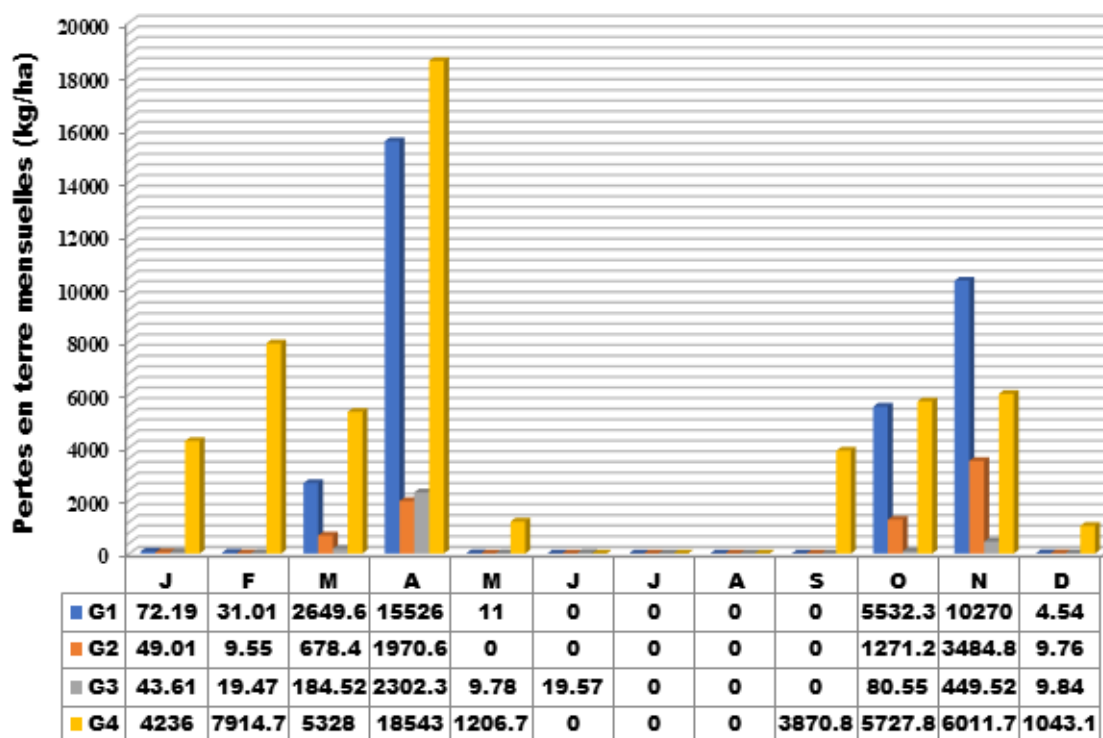


Figure 8. Distribution bimodale mensuelle des pertes en terre : Exemple de Gashikanwa – 2016.

### 3.5 Indice d'efficacité antiérosive (IEAE)

Lorsqu'on compare les pertes en terre enregistrées dans les parcelles expérimentales protégées par des dispositifs (fossé seul, fossé consolidé avec haie mixte ou haie mixte seule) à la parcelle non protégée (parcelle dite traditionnelle), nous définissons ce que l'on peut appeler « l'indice d'efficacité antiérosive (IEAE) » qui varie de 0 à 1. La valeur de référence 1 correspondant à la parcelle traditionnelle non aménagée (G1 à Gashikanwa et M1 à Matongo). Un dispositif antiérosif est d'autant plus efficace que sa valeur IEAE est proche de 0.

De la sorte, à Gashikanwa, les valeurs de cet indice IEAE sont respectivement de 0,35 pour la haie mixte (G2) et de 0,12 pour la haie mixte renforcée avec le fossé antiérosif seul (G3). A Matongo, les valeurs correspondantes sont de 0,6 pour la haie seule (M2), 0,22 pour le fossé renforcé avec la haie (M3) et de 0,31 pour le fossé seul (M4). L'analyse de ces résultats confirme que la combinaison du fossé antiérosif et la haie triple herbacée, arbustive et arborée est plus efficace contre l'érosion hydrique en nappe dans les conditions de Gashikanwa et de Matongo.

### 3.6 Pertes en éléments chimiques

Les résultats d'analyses de sol effectuées sur les sédiments (Tableaux 6 à 7) ont été utilisés pour évaluer les pertes par hectare en C organique, N total, P disponible, cations échangeables basiques (Ca, Mg et K) et acides (Al). En raison de la cherté des analyses chimiques, la détermination des éléments ci-dessus a été effectuée sur un échantillon composite obtenu après mélange complet de tous les échantillons des pertes en terre collectés au cours du premier et deuxième semestre sur les périodes d'expérimentations à Gashikanwa (9 ans) et Matongo (7 ans). Les pertes en différents éléments nutritifs ont été estimées en considérant les pertes en terre (Pt en kg/ha), les contenus en C et N organiques (%) et ceux en Ca, Mg et K (cmolec/kg de sol), ainsi que les équivalents des éléments concernés, rapportés à l'hectare.

## C organique

A l'image des pertes en terre, les pertes totales cumulées les plus élevées en C organique sont observées sur la parcelle de Wischmeier (témoin universel) aussi bien à Gashikanwa (12 T/ha) qu'à Matongo (22 T/ha) sur la période de 9 ans à Gashikanwa et 7 ans à Matongo, respectivement. Sur le même site de Gashikanwa, les plus faibles pertes en C organique s'observent sur le traitement avec haies mixtes agroforestières renforcées par des fossés isohypses (G3), avec 1,06 T/ha. La parcelle traditionnelle sans dispositif antiérosif (G2) a enregistré sur la même période de 9 ans un total cumulé de 9,3 T/ha, démontrant ainsi l'efficacité du traitement G3 vis-à-vis des pertes en C organique. A Matongo, c'est le traitement M4 (fossé antiérosif) qui enregistre moins de pertes en C organique (< 5 T/ha) pour 27 T/ha sur la parcelle traditionnelle (Tableau 8 et 9). Il est suivi par le traitement M3 (haie mixte + fossé antiérosif) avec 5,5 T/ha de pertes cumulées de C organique.

**Tableau 6. Pertes cumulées (kg/ha) en nutriments à Gashikanwa : 2015-2023**

Paramètre	G1	G2	G3	G4
C organique	9360,5	2524,7	1060,8	11815
N Total	1088,5	376,6	119,7	1122,1
P (mg/kg)	8,53	4,29	1,39	8,77
Ca échangeable	306	110,3	62	344,1
Mg échangeable	50,5	18,7	3,4	38,3
K échangeable	77,8	21,6	7,3	51,5

**Tableau 7. Pertes cumulées (kg/ha) en nutriments à Matongo : 2017-2023**

Paramètre	M1	M2	M3	M4	M5
C organique	26958	16487	5521	4878	22426
N Total	5788	4124	1274	1236	5118
P	29,3	20,2	8,2	2,43	10,21
Ca	626,5	490	379	150	768,5
Mg	115,2	108	35,1	26,7	141,7
K	360,6	182,6	59	54,9	211,9

## N Total

Les pertes en N total suivent les mêmes tendances que le C organique (Tableaux 8 et 9). A Gashikanwa, elles suivent l'ordre décroissant suivant : témoin universel ou G4 (1,12 T/ha) > témoin traditionnel ou G1 (1,09 T/ha) > traitement avec haie mixte agroforestière ou G2 (0,37 T/ha) > traitement haies + fossé isohypse ou G3 (0,12 T/ha). Un classement similaire appliqué au site de Matongo indique l'ordre suivant : M1 (5,8 T/ha) > M5 (5,1 T/ha) > M2 (4,1 T/ha) > M3 (1,3 T/ha) > M4 (1,2 T/ha).

## P assimilable

Bien qu'elles suivent la même tendance entre les traitements et les années d'expérimentation sur les sites de Gashikanwa et Matongo, à l'opposé des autres nutriments, les pertes en P assimilable enregistrées sont peu significatives (Tableaux 8 et 9). A Gashikanwa, elles suivent l'ordre décroissant suivant : témoin universel ou G4 (8,8 kg/ha) > témoin traditionnel ou G1 (8,5 kg/ha) > traitement avec haie mixte agroforestière seule ou G2 (4,3/ha) > traitement haies + fossé isohypse ou G3 (1,4 kg/ha). Un classement similaire appliqué au site de Matongo indique l'ordre suivant : M1 (29 kg/ha) > M2 (20,2 kg/ha) > M5 (10,2 kg/ha) > M3 (8,2 kg/ha) > M4 (2,43 kg/ha). Ceci est dû au caractère peu mobile du P dans le sol, particulièrement dans les sols acides comme celui de Gashikanwa et de Matongo, où il est soumis au processus de fixation chimique (abiotique) par les oxydes et hydroxydes d'Al caractéristique des sols (Sanchez et al., 1997).

## Ca échangeable

A côté du C et de N organiques, le Ca est l'élément quantitativement représenté dans les sédiments (et dans les eaux de ruissellement) consécutifs à l'érosion hydrique en nappe. A Gashikanwa, les pertes en Ca échangeable sont dans l'ordre décroissant suivant : témoin universel ou G4 (344 kg/ha) > témoin traditionnel ou G1 (306 kg/

ha) > traitement avec la haie mixte agroforestière seule ou G2 (110,3 kg/ha) > traitement haies + fossé isohypse ou G3 (62 kg/ha). Un classement similaire appliqué au site de Matongo montre l'ordre suivant : M5 (768,5 kg/ha) > M1 (626,5 kg/ha) > M2 (490 kg/ha) > M3 (379 kg/ha) > M4 (150 kg/ha).

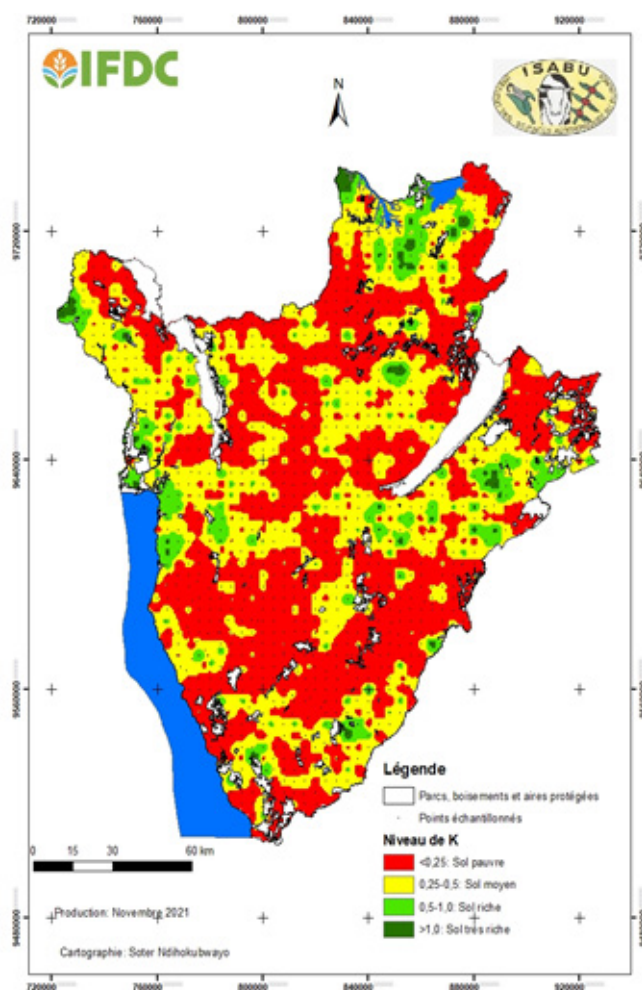
## Mg échangeable

Les résultats des tableaux 8 et 9 indiquent des pertes en Mg échangeable selon l'ordre décroissant ci-après à Gashikanwa : témoin traditionnel ou G1 (50,5 kg/ha) > témoin universel ou G4 (38,3 kg/ha) > traitement avec haie mixte agroforestière seule ou G2 (18,7 kg/ha) > traitement haies + fossé isohypse ou G3 (3,4 kg/ha). Par contre, le classement des traitements au site de Matongo indique que les pertes en Mg échangeable sont plus élevées avec la parcelle de Wischmeier suivant l'ordre suivant : M5 (141,7 kg/ha) > M1 (115,2 kg/ha) > M2 (108 kg/ha) > M3 (35,1 kg/ha) > M4 (26,7 kg/ha).

## K échangeable

S'agissant du K échangeable, un cation monovalent, contrairement aux Ca et Mg qui sont bivalents, les pertes en cet élément ont été aussi mesurées dans les sédiments. A Gashikanwa, les pertes en K échangeable sont dans l'ordre décroissant suivant : témoin traditionnel ou G1 (77,8 kg/ha) > témoin universel ou G4 (51,5 kg/ha) > traitement avec la haie mixte agroforestière seule ou G2 (21,6 kg/ha) > traitement haies + fossé isohypse ou G3 (7,3 kg/ha). Un classement similaire appliqué au site de Matongo montre l'ordre suivant : M1 (360,6 kg/ha) > M5 (211,9 kg/ha) > M2 (182,6 kg/ha) > M4 (54,9 kg/ha) > M3 (59 kg/ha).

Une analyse rapprochée des tableaux 8 et 9 montre des pertes en K échangeable, il est vrai inférieures à celles du Ca (le cation basique le plus souvent représenté dans les sols), mais plus élevées que celles du Mg échangeable (normalement le cation basique le plus représenté dans le sol après le Ca échangeable). Cet appauvrissement en K a été prouvé par la récente cartographie des sols (2022) du Burundi élaborée par l'ISABU avec l'appui du projet IFDC/PAGRIS. Celle-ci relève une déficience de plus en plus étendue du K dans les sols du Burundi (Figure 9), en raison notamment des effets de l'érosion hydrique. Dans le processus, cette situation interpelle logiquement un ajustement de la fertilisation K des sols du Burundi. A ce titre, il n'est pas superflu de souligner que la majorité des formules de fertilisation au Burundi sont vieilles de plus de 30 ans.



**Figure 9. Carte des niveaux de fertilité K au Burundi**

### 3.7 Sélectivité ionique de l'érosion hydrique en nappe

Les pertes les plus élevées sont bien évidemment enregistrées avec le C organique et N total, indiquant un appauvrissement de la matière organique des sols soumis à l'érosion. S'agissant des pertes en cations, l'ordre de grandeur observé dans les deux sites est le suivant :  $Ca > Mg > K > Al$ . C'est fondamental de s'attarder sur cette propension du K échangeable, un cation monovalent, à être plus perdu par l'érosion hydrique en nappe par rapport au Mg échangeable, un cation bivalent. D'autre part, les tableaux 8 et 9 ci-après illustrent la faible concentration de l'Al échangeable dans les sédiments, contrairement aux sols d'origine qui étaient caractérisés par des concentrations élevées avec des risques de toxicité Al (Tableaux 1 et 2). Les mêmes tableaux 8 et 9 confirment que l'érosion hydrique en nappe concentre les sédiments en éléments nutritifs, y compris le P disponible, tout le contraire de l'Al échangeable qui en est pratiquement dépourvu.

**Tableau 8. Composition chimique moyenne des sédiments à Gashikanwa : 2015-2023**

Paramètre	G1	G2	G3	G4
% C organique	3,37	2,89	3,14	2,95
% N total	0,39	0,42	0,32	0,62
C/N	8,64	6,88	9,81	4,76
P (mg/kg)	33,7	30,5	37,1	29,1
CEC	18,1	18,5	17,5	16,1
Ca	5,39	6,55	10,3	4,33
Mg	1,58	1,8	0,86	0,76
K	0,82	1,16	0,63	0,35
Al	0,58	0,61	0,18	0,50
Al/(Ca+Mg+K)	0,07	0,06	0,02	0,09
K/(Ca+Mg)	0,12	0,14	0,06	0,07
Mg/K	1,94	1,55	1,36	2,18

**Tableau 9. Composition chimique moyenne des sédiments à Matongo : 2017-2023**

Paramètre	M1	M2	M3	M4	M5
% C organique	1,08	1,08	0,95	1,19	1,01
% N total	0,24	0,21	0,25	0,22	0,20
C/N	4,5	5,14	3,80	5,41	5,05
P	8,4	9	6,7	7	8,04
CEC	9,1	9,1	9	9,2	12,3
Ca	1,05	1,22	1,63	1,44	1,33
Mg	0,28	0,35	0,42	0,41	0,25
K	0,45	0,31	0,23	0,35	0,33
Al	1,07	1,36	1,01	0,90	1,03
Al/(Ca+Mg+K)	0,60	0,73	0,45	0,41	0,54
K/(Ca+Mg)	0,34	0,20	0,11	0,19	0,21
Mg/K	0,63	1,13	1,84	1,16	0,75

L'analyse des deux tableaux suscités démontre que l'Al est quasi existant dans les sédiments, impliquant que l'érosion hydrique est ioniquement sélective. Elle emporte préférentiellement les cations basiques avec à la tête le Ca échangeable suivi par le Mg ou même le K échangeable (voir parcelles M1, M2, M5 à Matongo). Il en découle que l'érosion hydrique en nappe concentre l'Al dans les sols érodés, ce qui est synonyme d'acidification. Par ce principe, nous pouvons donc avancer que le processus d'érosion hydrique en nappe est un processus acidifiant.

Que ce soit pour les cations, les matières organiques et le P assimilable, cette situation de sélectivité (ou d'enrichissement) est plus objectivement démontrée sur les parcelles de Wischmeier (G4 et M5) qui

n'ont pas (par principe) reçu d'intrants agricoles, durant les deux expérimentations. Par ce que nous l'avons pas souligné assez, les parcelles cultivées (G1-G2-G3, M1-M2-M3-M4) étaient à chaque saison fertilisées et même chaulées chaque fois que de besoin, suivant les recommandations de la recherche ISABU. Ce phénomène de sélectivité de l'érosion hydrique en nappe a été également rapporté par Roose et Barthès (2006). Il est en effet accepté que l'érosion hydrique en nappe emporte sélectivement les particules fines et les plus fertiles, c'est-à-dire les argiles, les limons, la matière organique et les nutriments (C, N, P, bases échangeables) qui constituent la richesse physique, chimique et biologique des sols. Roose et Barthès (2006) rapportent que, proportionnellement, on retrouve bien plus de colloïdes et d'éléments nutritifs dans les terres érodées que dans le sol en place. Tel est le cas pour le carbone, azote, phosphore, et plus particulièrement pour les bases échangeables (Ca, Mg, K). Au contraire, une sélection négative s'observe pour l'Aluminium dont le contenu dans les sédiments est très faible à nul. C'est le processus même d'acidification des sols auquel contribue l'érosion hydrique.

Nous nous sommes proposés d'estimer les indices de sélectivité (IS) ou facteurs d'enrichissement (FE) de l'érosion hydrique en nappe appliqués au % C organique, % N Total, CEC, Ca, Mg, K, Al échangeables et au P assimilable. Ces indices de sélectivité (IS) ou facteurs d'enrichissement (FE) sont calculés en faisant le rapport entre la composition chimique des sédiments et celle des sols d'origine sur la parcelle de Wischmeier. Les indices ou facteurs calculés sont indiqués dans le tableau 10. Un indice IS (FE) > 1 signifie enrichissement d'un élément donné dans les sédiments par rapport au sol d'origine. Un indice IS (FE) < 1 est indicatif d'un appauvrissement d'un élément nutritif donné dans les sédiments par rapport au sol d'origine. Un indice IS (FE) proche de 1 signifie ni enrichissement ni appauvrissement dans les sédiments par rapport au sol d'origine.

C'est ainsi qu'à Gashikanwa, tous les paramètres étudiés, sauf l'Al, montrent des IS supérieurs à 1, signifiant un enrichissement des sédiments en ces éléments spécifiques. Les plus grandes valeurs IS sont obtenues avec le Ca échangeable (25,5), le Mg échangeable (7,6) et le K échangeable (2,5). L'Al échangeable est caractérisé par un IS très faible, un signe d'appauvrissement des sédiments en cet élément chimique. Les données calculées de l'IS (FE) pour le sol de Matongo ne montrent pas tant une tendance tranchée. C'est ainsi que le % C organique, le % N total, le Mg et le K échangeables sont plutôt dans la catégorie des éléments appauvris (ou ni enrichis, ni appauvris) dans les sédiments par rapport au sol d'origine. Par contre, le P et, dans une moindre mesure le Ca échangeable et la CEC sont caractérisés par des valeurs IS > 1, synonyme d'enrichissement dans les sols érodés (sédiments).

**Tableau 10. Indices de Sélectivité ou Facteur d'enrichissement des éléments nutritifs dans les sédiments (Gashikanwa et Matongo)**

Elément	IS (FE)-Gashikanwa	I.S (FE)-Matongo
% C organique	2,3	0,8
% N Total	1,5	1
P assimilable	2,1	2,7
Ca échangeable (cmolec/kg de sol)	25,5	1,2
Mg échangeable (cmolec/kg de sol)	7,6	0,6
K échangeable (cmolec/kg de sol)	2,5	1
Al échangeable (cmolec/kg de sol)	0,15	0,6
CEC (cmolec/kg de sol)	1,2	1,2

Roose et Barthès (2006) avancent deux principales raisons à la base de la sélectivité de l'érosion hydrique en nappe vis à vis des éléments nutritifs présents dans le sol. Primo, l'énergie du ruissellement en nappe est trop faible pour déplacer les particules grossières à cause principalement de la rugosité de la surface du sol. C'est ainsi que seules les matières organiques, les argiles, les limons et les nutriments qui leurs sont associés sont emportés hors champs par les eaux de ruissellement. Secundo, les horizons de surface du sol qui sont en premier lieu affectés par l'érosion hydrique en nappe sont plus riches en matière organique (avec des CEC plus élevées) et en nutriments, surtout en bases échangeables.

### 3.8 Comparaison des pertes chimiques dans les sédiments et les eaux de ruissellement

A la fin des expérimentations sur l'érosion hydrique dans les sites de Gashikanwa et Matongo (premier semestre 2023), nous nous sommes intéressés à la quantification des pertes en éléments nutritifs dans les sédiments d'une part, et dans les eaux de ruissellement, d'autre part. La collecte des sédiments et de leurs analyses a été abordée dans les paragraphes précédents. Pour les eaux de ruissellement, avant siphonage, l'eau surnageante a été mélangée et un petit échantillon de 10 mL a été collecté consécutivement à chaque évènement pluvieux. Les échantillons collectés pendant le premier trimestre 2023 étaient stockés dans un sceau fermé jusqu'à leur analyse. Les résultats de ces échantillons composites d'eaux de ruissellement sont consignés dans les tableaux 11 (Gashikanwa) et 12 (Matongo).

**Tableau 11. Pertes comparées des nutriments (kg/ha) dans les sédiments et dans les eaux de ruissellement à Gashikanwa : Janvier - Juin 2023**

Paramètre	Type de pertes	G1	G2	G3	G4
<b>N</b>	Sédiments	13,1	0,3	0,2	2
	Ruissellement	5	1,33	2,56	16,05
<b>P</b>	Sédiments	0,3	0	0	0,01
	Ruissellement	0,05	0,03	0,04	0,11
<b>Ca</b>	Sédiments	4,96	0,14	0,13	0,55
	Ruissellement	1,82	2,50	3,98	9,62
<b>Mg</b>	Sédiments	0,02	0,02	0,23	0
	Ruissellement	0,6	0,38	0,62	1,56
<b>K</b>	Sédiments	0,41	0,01	0,01	0,09
	Ruissellement	0,83	0,64	0,96	5,78
<b>Al</b>	Sédiments	0	0	0	0
	Ruissellement	0	0	0	0

A Gashikanwa, la comparaison des pertes en nutriments dans les sédiments et les eaux de ruissellement s'est intéressée à N total, P assimilable, Ca, Mg, K et Al échangeables. Sauf dans la parcelle traditionnelle (G1) où les pertes en nutriments dans les sédiments représentent au moins 70 % du total de N et Ca perdus, entre 70-100 % de ceux-ci sont perdus dans les eaux de ruissellement dans le reste des parcelles étudiées, pour Mg et K dans la parcelle G1 et pour tout le reste des parcelles (G2, G3, G4). Les données des tableaux 11 et 12 confirment la sélectivité de l'Al qui n'est pas traçable ni dans les sédiments, ni dans les eaux de ruissellement.

A Matongo par contre, les sédiments constituent de 52 à 90 % la principale source des éléments nutritifs étudiés (Ca, Mg et K). Les pertes à travers les eaux de ruissellement représentant entre 10-48 %, ce qui reste significatif. Dans tous les cas, cette différence de comportement entre les deux sites mérite ample réflexion et investigation.

**Tableau 12. Pertes comparées des nutriments (kg/ha) dans les sédiments et dans les eaux de ruissellement à Matongo : Janvier – Juin 2023**

Paramètre	Type de pertes	M1	M2	M3	M4	M5
Ca	Sédiments	80,4	21,6	20,8	24,1	97,7
	Ruissellement	7,7	5,5	5,9	7,2	27,6
Mg	Sédiments	9,2	5,7	6,7	8,5	68,9
	Ruissellement	3,5	2,3	2	2,3	7
K	Sédiments	17,5	3,4	3,6	5,3	22
	Ruissellement	3,4	3,2	3,3	4,6	17,6
Al	Sédiments	0	0	0	0	0
	Ruissellement	0	0	0	0	0

### 3.9 Facteur d'érodibilité ou susceptibilité des sols à l'érosion - K

Le paramètre K d'érodibilité du sol peut être estimé par le rapport entre les pertes en terre sur les parcelles de Wischmeier (G4 et M5) et  $R (=500)$ , facteur d'agressivité ou d'érosivité climatique estimé à partir de la carte (Figure 10) élaborée par Rishirumhirwa. (1997).

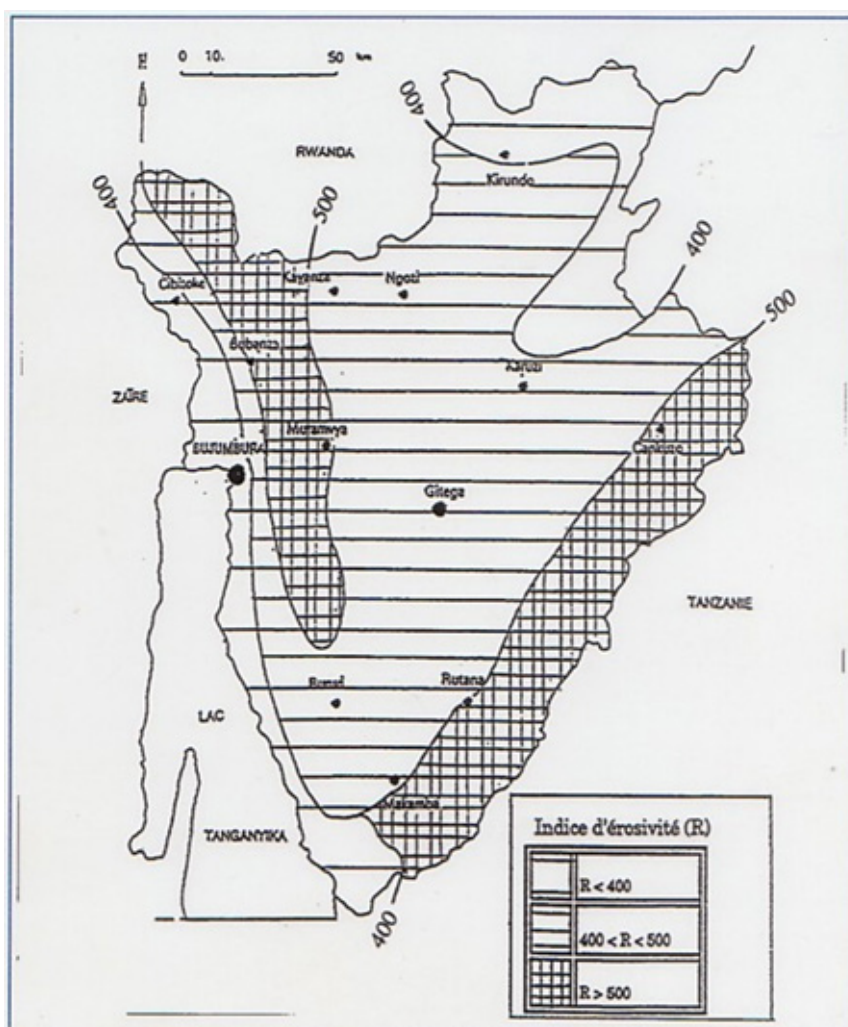


Figure 9. Carte d'érosivité climatique au Burundi

Le facteur topographique (LS) de l'équation universelle des pertes en terre de Wischmeier et Smith (1978) est calculé sur base de l'équation suivante :

$$LS = (L/22,1)^{0,5} (0,065 + 0,045 S + 0,0065 S^2)$$

où S = Pente (slope en anglais) exprimée en %

Considérant que C=P=1 sur la parcelle de Wischmeier, l'équation des pertes en terre devient  $A = R \cdot K \cdot LS \cdot 1 \cdot 1$ . Dans ce cas,  $K=A/(R \cdot LS)$ . L'application de cette dernière relation à Gashikanwa (L=20 m, S =41 %), donne une valeur de K = 0,037 sur les 5 premières années d'expérimentation (2015-2019). Les années 2020-2023 ont été exclues du calcul par ce que les pertes en terre enregistrées étaient presque nulles, la parcelle de Wischmeier étant pratiquement complètement érodée. Pour le cas de Matongo, sur les 7 ans qu'a duré l'expérimentation, la valeur estimée est de K = 0,044. Selon les normes établies par Wischmeier et Smith (1978), ces valeurs de K (< 0,05) sont caractéristiques des sols intrinsèquement peu érodibles.

A titre de comparaison, ISABU (1991) rapporte des valeurs de K variant entre 0,075-0,13 sur un ferrisol humique et de 0,02-0,07 sur un sol ferralitique à Rushubi dans le Mumirwa Central. Rishirumuhirwa (1997) rapporte un facteur d'érodibilité plus élevé (K = 0,13) à Mashitsi dans la région naturelle du Kirimiro.

### 3.10. Equivalents engrais et amendements des pertes en nutriments (coûts de l'inaction)

Les analyses en éléments nutritifs contenus dans les sédiments nous permettent d'estimer les équivalents en engrais et amendements emportés en dehors des parcelles par l'érosion hydrique en nappe. De fait, un des effets les plus perceptibles, autant par les agriculteurs que par les décideurs de l'érosion hydrique en nappe (dite insidieuse partant peu directement perceptible) est le niveau de pertes en fertilité des sols encourues à travers les pertes en nutriments. A titre illustratif, les pertes chimiques en P, K, Ca et Mg ont été convertis en équivalents engrais (DAP, KCl) et amendements minéraux ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ) pour générer les tableaux 13 (Gashikanwa) et 14 (Matongo).

Du tableau 13 (Gashikanwa), nous retenons que les plus faibles pertes de fertilité en termes d'équivalents DAP, KCl et amendements minéraux ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ) s'observent avec le traitement  $G_3$ , constitué de la triple haie mixte renforcée par le fossé isohypse. Par rapport à la haie mixte seule ( $G_2$ ), le traitement  $G_3$  réduit les pertes en équivalents engrais de 29 de DAP, 27 kg de KCl et 269 kg dolomie ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ). Plus important, par rapport à la parcelle traditionnelle sans aménagement antiérosif ( $G_1$ ), ce gain ou cette épargne en engrais et amendements devient : 71 kg de DAP, 135 kg de KCl et 870 kg de dolomie.

A Matongo (Tableau 14), c'est la parcelle  $G_4$  qui enregistre le minimum de pertes de fertilité en termes de DAP, KCl et dolomie : 24 kg de DAP, 92 kg de KCl et 468 kg de dolomie. Le traitement suivant est constitué par la parcelle mixte renforcée par le fossé isohypse ( $M_3$ ) avec des pertes en équivalents DAP de 81 kg, 113 kg de KCl et 1071 kg de dolomie. En fin de compte, l'adoption de l'une ou l'autre technique antiérosive permet un gain de 209 à 266 kg de DAP, 586 à 597 kg de KCl et 900 à 1500 kg de dolomie. Ces quantités constituent des coûts d'inaction correspondants à la non adoption de techniques antiérosives. Dans ces conditions, le choix devrait être clair pour l'agriculteur !

**Tableau 13. Cumul des équivalents en engrais et amendements des pertes en nutriments à Gashikanwa : 2015-2023**

Equivalent (kg)	G1	G2	G3	G4
DAP	85	43	14	87
CaCO <sub>3</sub>	765	276	60	860
MgCO <sub>3</sub>	177	65	12	34
CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub> (Dolomie)	942	341	72	894
KCl	149	41	14	98

**Tableau 14. Cumul des équivalents en engrais et amendements des pertes en nutriments à Matongo : 2017-2023**

Equivalent (kg)	M1	M2	M3	M4	M5
DAP	290	200	81	24	101
CaCO <sub>3</sub>	1566	1225	948	375	1921
MgCO <sub>3</sub>	403	378	123	93	496
CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub> (Dolomie)	1969	1603	1071	468	2417
KCl	689	181	113	92	742

Nous devons indiquer que les parcelles G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub> à Gashikanwa et M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> et M<sub>4</sub> à Matongo ont été fertilisées et amendées à chaque saison culturale (Habonimana et al., 2024). Autrement dit, les nutriments perdus dans ces 7 parcelles expérimentales proviennent à la fois des réserves du sol et des engrais et amendements appliqués. Ceci est une répétition voulue, le dispositif antiérosif constitué de la combinaison haie mixte agroforestière et fossé isohypse (G<sub>3</sub> et M<sub>3</sub>) est plus efficace contre le ruissellement et les pertes en terre. Il permet aussi de préserver la fertilité des sols en réduisant significativement les pertes en nutriments par rapport à la parcelle sans aménagement antiérosif (G<sub>1</sub> et M<sub>1</sub>), et à celle avec haie mixte agroforestière seule (G<sub>2</sub> et M<sub>2</sub>).

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En complément aux précédentes études sur l'érosion hydrique en nappe menées à Rushubi (Mumirwa Central) et Mashitsi (Kirimiro), les expérimentations conduites à Gashikanwa (Buyenzi) et à Matongo (Mugamba) confirment une chose : les structures biologiques qui produisent de la biomasse permettent en prime à l'agriculteur de lutter efficacement contre l'érosion hydrique en nappe. Plus spécifiquement, la combinaison de la haie mixte agroforestière et du fossé isohypse (G<sub>3</sub> et M<sub>3</sub>) a prouvé son efficacité contre le ruissellement et les pertes en terre sur 9 ans d'expérimentation à Gashikanwa et 7 ans à Matongo. Cette triple structure antiérosive biologique et physique permet aussi de préserver la fertilité des sols en réduisant significativement les pertes en nutriments par rapport à la parcelle sans aménagement antiérosif (G<sub>1</sub> et M<sub>1</sub>), et à celle avec haie mixte agroforestière seule (G<sub>2</sub> et M<sub>2</sub>). D'autre part, à la lumière des résultats sur les pertes chimiques en nutriments (C, N, Ca, Mg, K), il est clairement apparu que la non adoption des pratiques antiérosives aboutit à un déséquilibre accéléré des nutriments, suivi inévitablement d'une dégradation biologique (matière organique), chimique et physique des horizons superficiels des sols cultivés. Celle-ci conduit progressivement à la squelettisation des sols caractérisée par l'accumulation de particules grossières (pierrosité) à la surface du sol, à l'accumulation de l'Al dans les sols érodés au détriment des cations basiques (Ca, Mg, K) plus enclins à l'érosion hydrique en nappe par le principe de sélectivité. Cette accumulation sélective de l'Al couplée à la désaturation en cations basiques dans le sol conduit à la longue à son acidification. Ainsi donc, le processus d'érosion hydrique en nappe est un processus acidifiant. Partant, la lutte contre l'érosion hydrique en nappe est une approche préventive plus efficace contre l'acidification des sols en tout cas plus économique que l'action curative à travers le chaulage. Nous sommes d'avis que les résultats des recherches menées à Gashikanwa et à Matongo, successivement avec les appuis des projets VLIR/UOS et IFDC/PAGRIS contribueront à la mise en œuvre du DOSABV.

# Remerciements

Les auteurs remercient le Projet VLIR/UOS et IFDC PAGRIS pour les financements qui ont permis cette recherche et le Projet IFDC PAGRIS pour avoir facilité la présentation des résultats durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi. Nos remerciements s'adressent de manière particulière aux agriculteurs qui ont accepté de mettre à notre disposition leurs parcelles pour la conduite des expérimentations et aux techniciens de terrain du MINEAGRIE qui en ont efficacement assuré le suivi.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDÉES

1. B. Habonimana B. C. Kwizera, S. Kaboneka, P. Nsengiyumva, S. Ndiokubwayo, D. Niyibaruta, E. Barankira, N. Nimenya, S. Nijimbere, T. Rishirumuhirwa, J. Ndimubandi, J. Van Orshoven. 2024. Rentabilité financière et effets de la haie mixte (Bana grass + Calliandra calothyrsus + Grevillea robusta), du fossé isohypse et de la haie combinée au fossé comme techniques de lutte anti-érosive sur le rendement de la pomme de terre et du maïs en zone densément peuplée du Nord Burundi (Kayanza-Ngozi). Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi. Bujumbura ; Restautant La Détende. 24-25 janvier 2024.
2. Duchaufour H., Bizimana M., E. Roose, Mikokoro C. 2017. Efficacité des haies mixtes, du fumier et du paillage pour la conservation de l'eau et la restauration de la productivité d'un sol ferrallitique argileux acide du Burundi. In E. Roose (edit.) Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie. pp. 603-611.
3. Duchaufour H., Bizimana M., Mikokoro C., 1992. Les acquis de la recherche à l'ISABU en matière de protection et de restauration des sols. Séminaire sur l'érosion au Burundi, 24 p.
4. ISABU 1991. Rapport annuel 1989-1990, Programme Agroforesterie, Sylviculture et Erosion, 265 p.
5. ISABU/IFDC.2021. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi
6. Kibiriti C., Ndayiragije S., Gourdin J. et Hollebosch. 1986. Analyse des sols. Sol 4 : Détermination du pH et de la conductivité. Analyse de la matière organique. Fiche Labo N° 12. ISABU. 35 p.
7. Kibiriti C., Ndayiragije S., Gourdin J. et Hollebosch. 1986. Analyse des sols. Sol 2 : Analyse des bases échangeables, de la CEC et de l'acidité échangeable. ISABU, 33 p.
8. Ndayiragije F. 2017. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides au Rwanda. In E. Roose (edit.) Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie. pp. 591- 603.
9. Rishirumuhirwa T. et E. Roose. 2017. Erosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi. In E. Roose (ed.) Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie, pp. 211-222.
10. Rishirumuhirwa, T., 1997. – Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro-Burundi). Thèse n°1636, EPFL, Lausanne.
11. Roose E. 1994. Introduction à la Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bull. Pédologique, FAO, Rome 70, 420 p.
12. Roose E., B. Barthès. 2006. Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions. In Roose E., Lal R., Teller C., Barthès B., Stewart B.A. (eds). Soil erosion and carbon dynamics, Advances in Soil Science, CRC, Taylor and Francis, Boca Raton, Floride, USA : 55-72.
13. Roose E., Z. Boli et T. Rishirumuhirwa. 2017. Les sols tropicaux et leur dégradation en fonction des types d'érosion. In E. Roose (ed.) Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie, pp. 29-40.

14. Roose, E (Ed). 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie. IRD Editions, Montpellier, Juillet 2017.
15. Sanchez, P.A, Shepherd, J.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., Izac, A.M.N, Mukwonye, A.U., Kwesiga, F. R., Ndiritu, C.G and Woome, P.L. 1997. Replenishing Soil Fertility in Africa. SSSA Special Publication N° 51. Soil Science Society of America. Madison, USA. Pp 1-46.
16. Simonard, T., H. Duchaufour, M. Bizimana et C. Mikokoro. 1994. La conservation des sols en milieu paysan burundais. Etude et hiérachisation des stratégies antiérosives. Cahiers d'Outre-Mer 47 (185) : 49-64.
17. Tessens E. et Gourdin J. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Fiche Labo N° 19. ISABU. 36 p.
18. Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to soil conservation planning. USDA Handbook 282, 58 p.

# Thème 11

## Valorisation agronomique des résidus de récolte et de la biomasse agroforestière par co-compostage

S. Kaboneka<sup>\*</sup>, P. Nsengiyumva<sup>1</sup>, S. Ndiwokubwayo<sup>1</sup>, C. Kwizera<sup>1</sup>, S. Nijimbere<sup>1</sup>, B. Habonimana<sup>1</sup>

1. Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). B.P.2940. Bujumbura, Burundi.

\* Auteur pour correspondance : [salvator.kaboneka@gmail.com](mailto:salvator.kaboneka@gmail.com)

### Résumé

En plus des études d'érosion physique et chimique des sols et des rendements des cultures et des structures antiérosives, les expérimentations de Gashikanwa (Buyenzi) et de Matongo (Mugamba) ont évalué les opportunités de production in situ de fertilisants organiques par co-compostage des résidus de récolte (maïs) et de biomasse agroforestière (*Calliandra calothyrsus* Meisn, *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray). Sur une culture de maïs (variété ZM 605), le compost à base de résidus de maïs + biomasse foliaire de *Calliandra* + NPK 45-60-30 (5,7 T/ha) a donné le même rendement que la formule de fertilisation standard ISABU à base de fumier de vache + 45-60-30 (5,8 T/ha). Sur la culture de pomme de terre (variété Victoria), le compost à base de *Calliandra* (9 T/ha) a produit 2 T de plus que la formule de fertilisation standard ISABU (7 T/ha). *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray, une astéracée largement envahissante a été testée parallèlement au *Calliandra* en co-compostage avec les résidus de maïs sur une culture de pomme de terre. Les résultats obtenus dans cette deuxième série d'essai indiquent des productions de 6,4 T/ha pour le co-compost à base de *Tithonia*, 5,9 T/ha pour le co-compost à base de *Calliandra*, au moment où la formule standard ISABU de fertilisation du maïs donne un rendement de 6 T/ha. Ainsi donc, le co-compost des résidus de maïs + *Tithonia* ou résidus de maïs + *Calliandra* peut constituer un substitut viable à la formule standard ISABU (fumier + 45-60-30), ou tout au moins au fumier associé. A la fin, en tout état de cause, au-delà de ses limitations environnementales associées à son caractère invasif prouvé, le *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray n'a-t-elle pas sa place sur les structures antiérosives, en lieu et place du *Calliandra calothyrsus* Meisn, qui produit peu de biomasse et dont la dissémination autant que régénérative que végétative semble peu maîtrisée dans les conditions actuelles ? Un débat scientifique légitime, sans exclure les autres espèces agroforestières potentielles

**Mots clés :** Co-compost, résidus de maïs, *Tithonia*, *Calliandra*, valeur fertilisante

## Abstract

In addition to studies on soil physical and chemical soil losses, crop and agroforestry biomass yields, Gashikanwa and Matongo experiments have evaluated in situ production of organic fertilizers through co-composting maize stover and foliar biomass of *Calliandra calothyrsus* Meisn and *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. On a maize crop (variety ZM 605), compost based on maize stover + *Calliandra* foliar biomass + NPK 45-60-30 (5,7 T/ha) yielded the same as the ISABU recommended fertilizer made of Farm manure + 45-60-30 (5,8 T/ha). On the other hand, with potato (variety Victoria), compost maize stover + *Calliandra* (9 T/ha) yielded 2 T higher than the ISABU fertilization standard (7 T/ha). *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray, an invasive species of the Asteraceae family was also co-composted with maize stover. *Tithonia*-based co-compost with maize stover applied to a potato crop (variety Victoria) produced 6,4 T/ha, *Calliandra*-maize-based compost yielded 5,9 T/ha, compared to 6 T/ha obtained with the ISABU recommended fertilization formula. All in all, maize stover + *Tithonia* or maize stover + *Calliandra* co-composts could be sound and viable alternatives to the ISABU potato fertilizer standards (Farm manure + 45-60-30), or at least to farm manure. In the end, beyond its environmental A la fin, en tout état de cause, au-delà de ses limitations environnementales, le *Calliandra calothyrsus* Meisn et *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray n'a-t-elle pas sa place sur les structures antiérosives, en lieu et place du *Calliandra calothyrsus* Meisn, qui produit peu de biomasse et dont la dissémination autant que régénérative que végétative semble peu maîtrisée dans les conditions actuelles ? Un débat scientifique légitime, sans exclure les autres espèces agroforestières potentielles

**Key words :** Co-compost, maize stover, *Tithonia*, *Calliandra*, fertilizer value

## 1. INTRODUCTION

Les fumiers animaux et les résidus de récolte constituent d'importantes sources d'éléments nutritifs pour la productivité des sols du Burundi, où la majorité des agriculteurs n'ont pas suffisamment de moyens pour accéder aux intrants agricoles exyérieurs à leurs exploitations (Van den Berghe, 1991). Les doses d'application de ces matières organiques sont généralement situées entre 5 et 10 T/ha sur base de matières fraîches. Ces grandes quantités de matières organiques sont difficilement accessibles à beaucoup d'exploitants agricoles. Dans ces conditions, ils recourent à des combinaisons de matières organiques comme sources d'éléments nutritifs nécessaires à la production de leurs aliments (Zai et al., 2008 ; Zai et al., 2010).

Ajouter à cet état de fait que, globalement ces fumiers et ces résidus de récolte sont insuffisants dans la plupart des exploitations agricoles et qu'ils sont également pauvres en éléments nutritifs (Lausa and Lausa, 2013). Cependant, la qualité fertilisante de ces matières organiques peut significativement être améliorée par l'addition de biomasse foliaire de certes espèces arbustives, légumineuses ou non. Nous nous sommes intéressés à deux espèces en particulier (Lausa and Lausa, 2013 ; Izerimana and Hirwa, 2019 ; Kaboneka et al., 2021) : *Calliandra calothyrsus* Meisn largement utilisé sur les haies antiérosives, comme dans les sites expérimentaux de lutte contre l'érosion de Gashikanwa et Matongo et *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray très répandu et à la limite envahissante le long des routes, des chemins et sentiers. Ces deux espèces constituent des sources de N et de C organique facilement assimilable par les microorganismes décomposeurs.

*Calliandra calothyrsus* Meisn et *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray sont d'intéressantes espèces arbustives dont les biomasses foliaires peuvent booster le compostage des matières végétales de faible décomposabilité, comme les résidus de maïs. Deux récentes publications (Kaboneka et al., 2021 ; Kaboneka et al., 2021) ont évalué la valeur améliorante des biomasses de *Calliandra calothyrsus* Meisn *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray sur la qualité de composts issus des résidus de maïs (*Zea mays* L.). Ces deux investigations ont travaillé sur les cultures de maïs et de pomme de terre.

Le présent document met en parallèle les effets de *Calliandra calothyrsus* Meisn et de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray sur l'amélioration des rendements du maïs (Saison 2020 A) et de la culture suivante de pomme de terre (Saison 2020 B). Ces effets sont comparés à ceux des formules de fertilisation recommandées par la recherche, ainsi qu'aux nouvelles formulations organo-minérales récemment introduites dans les programmes de fertilisation des sols au Burundi. Les questions directrices de notre recherche étaient : (i) les composts à base de résidus de maïs améliorés avec les biomasses de *Calliandra* et de *Tithonia* donnent-ils des productions de maïs et de pomme supérieures, égales ou inférieures à celles générées par les formules de fertilisation recommandées par la recherche sur base des engrais minéraux (DAP, KCl, Urée) et des engrais organo-minéraux (FOMI) ? (ii) les composts à base de résidus de maïs peuvent-ils substituer les fumiers animaux, toute autre chose étant par ailleurs en terme de disponibilité ?

## 2. MATERIELS ET METHODES

Plus de détails sur ce chapitre peuvent être trouvés dans les publications susmentionnées dans l'introduction (Kaboneka et al., 2021 ; Kaboneka et al., 2021). Les deux essais en question ont été installés sur la colline Bihunge, Commune Kayanza, Province Kayanza dans les environs de la station expérimentale d'étude sur l'érosion financée successivement par le projet VLIR/UOS-UB et PAGRI-UB. Le sol utilisé est considéré de qualité pauvre, acide et déficient en certains éléments : P, B, Ca, Mg et en même saturé en Al avec des risques de toxicité en cet élément (Nduwimana et al., 2013). Les analyses du sol effectuées, de même que les techniques analytiques sont décrites ailleurs (Kaboneka et al., 2021).

Les principales caractéristiques du sol support des essais sur la valeur agronomique des composts à base de résidus de maïs améliorés avec les biomasses foliaires issues de *Calliandra calothyrsus* Meisn et de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray sont rapportées dans le Tableau 1.

La culture de maïs (*Zea mays* L.), variété ZM 605) a été installée en saison 2020A au mois de Septembre 2019. Tous les détails phytotechniques des deux essais peuvent être consultés ailleurs (Kaboneka et al., 2021; Kaboneka et al., 2021), de même que la procédure de compostage, les analyses chimiques effectuées sur le sol et les matières végétales utilisées, les analyses statistiques effectuées, ainsi que les paramètres ayant fait l'objet de mesures. Y compris les rendements de maïs et de pomme de terre sur lesquels le présent papier est concentré.

## 3. RESULTAS ET DISCUSSION

### 3.1. Caractéristique du sol

Les caractéristiques chimiques du sol utilisées sont indiquées dans le Tableau 1. Celui montre que le sol est fortement acide, pauvre en P disponible, déficient en  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  avec un sérieux risque de toxicité Al (Tessens et Gourdin, 1993). C'est un sol typiquement caractéristique des sols d'altitude lessivés et désaturés en base (Cartographie Sols).

**Tableau 1. Caractéristiques chimiques du sol**

Paramètre	Valeur
pHH <sub>2</sub> O	4,03
% C	4,12
% N	0,48
C/N	8,50
P Olsen (ppm)	10,20
CEC (cmolc/kg sol)	6,80
Ca <sup>2+</sup> Echangeable (cmolec/kg sol)	2,84
Mg <sup>2+</sup> Echangeable (cmolec/kg sol)	0,25
K <sup>+</sup> Echangeable (cmolec/kg sol)	0,15
Al <sup>3+</sup> Echangeable (cmolec/kg sol)	3,29
H <sup>+</sup> Echangeable (cmolec/kg de soil)	1,49
Saturation Al (%)	48,38
Ca <sup>2+</sup> /Mg <sup>2+</sup>	11,36
Mg <sup>2+</sup> /K <sup>+</sup>	1,67
(Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> ) /K <sup>+</sup>	20,6

### 3.2. Analyses chimiques des matières organiques utilisées

Le contenu en éléments nutritifs des matières organiques utilisées dans les investigations est donné dans le Tableau 2. Il est intéressant de remarquer que les feuilles de Calliandra ont un pH acide et à tendance acidifiante, mais que le compost contenu par combinaison des résidus de maïs avec Calliandra augmente le pH de 0,6 unités de pH par rapport à ce dernier. Ce pH est comparable à celui des résidus de maïs seuls (pH=6,11). De l'autre côté, le Tithonia seul (pH=6,82) ou combiné aux résidus de maïs (sous forme de compost) est caractérisé par des valeurs de pH proches de la neutralité. Le pH du fumier est typiquement alcalin (pH = 7,77). Cette différence de pH affecte-t-elle les rendements des cultures de maïs et de pomme de terre ? C'est une hypothèse à vérifier à travers les analyses des résultats sur le paramètre rendement.

**Tableau 2. Composition chimique des matières organiques utilisées.**

Matière organique	pHH <sub>2</sub> O	% C	% N	% P	% K	% Ca	% Mg
Fumier de ferme	7,77	17,84	1,89	0,40	1,78	1,08	0,25
Compost + Calliandra	6,11	10,48	0,73	0,13	0,22	0,53	0,10
Compost + Tithonia	6,69	4,15	1,24	0,14	0,26	0,38	0,07
Résidus de maïs	6,19	44,05	0,81	0,18	1,52	0,36	0,03
Feuille de Tithonia	6,82	42,77	3,87	0,50	3,79	1,35	0,25
Feuille de Calliandra	5,56	43,46	3,46	0,36	1,18	1,04	0,25

En terme de % N, comme attendu, les biomasses de Calliandra et de Tithonia contiennent des valeurs élevées d'azote utiles pour réduire le rapport C/N des résidus de maïs co-compostés et en améliorer la qualité. Les feuilles de Tithonia contiennent systématiquement plus de N, P, K, Ca et autant de Mg que les feuilles de Calliandra. Dans le même sens, le compost +Tithonia contient plus de 70 % N, 8 % de P, 18 % de K, mais moins de Ca et de Mg que le compost + Calliandra. Ces différences devraient impacter les différences de rendements de maïs et de pomme de terre cultivés avec ces deux types de composts.

### 3.3 Rendements en grains de maïs

Le Tableau 3 ci-dessous résume les rendements correspondants aux traitements appliqués à la culture de maïs, variété ZM 605 en saison 2020 A.

Traitement	% Gain de Rdt comparé à T1	Rdt (T/ha)	% Gain de Rdt à T5
<b>Compost+Tithonia</b>	+ 1 233	1,20±0,66abc	- 40
<b>Compost + Tithonia (T4)</b>	+ 1 033	1,02±0,11bc	- 49
<b>Fumier</b>	+ 2 122	2,00±0,15ab	-
<b>Compost + Calliandra (T3)</b>	+ 844	0,85±0,03bc	- 58
<b>Fumier + Imbura + Totahaza (T8)</b>	+ 2 900	2,70±0,50a	+ 35
<b>Fumier (T2)</b>	+ 1 278	1,24±0,18abc	- 38
<b>Compost + Calliandra</b>	+ 1 567	1,50±0,31abc	- 25
<b>Témoin intégral (T1)</b>	-	0,09±0,03c	- 96

Les traitements suivis des mêmes lettres ne dans la première colonne sont pas significativement différents à  $p < 0,05$ .

L'analyse statistique et la comparaison des moyennes appliquées aux rendements associés aux traitements sous investigation relèvent la supériorité de la formule de fertilisation du maïs recommandée par l'ISABU (T5), par rapport aux autres traitements, particulièrement les traitements T1 (Témoin intégral), T3 (Compost + Calliandra) et T4 (compost + Tithonia), lesquels ne sont pas significativement différents entre eux au seuil de 5 % de probabilité. Tout compte fait, l'on note que les deux composts donnent de faibles rendements quand ils ne sont pas complétés par la formule minérale 45-60-30 recommandée par l'ISABU pour la culture de maïs. Et de conclure que notre hypothèse de recherche indique plutôt l'infériorité des composts à base de résidus de maïs améliorés ou pas par les biomasses de Calliandra et de Tithonia sur une culture de maïs installée en saison 2020 A au site de Bihunge, en commune Matongo et Province Kayanza.

Lorsqu'ils sont complétés par la dose 45-60-30 d'engrais minéraux, les rendements générés par les deux types de compost augmentent de seulement 18 % pour le compost+Tithonia et de 77 % pour le compost + Calliandra. Dans tous les cas, les traitements à base de composts restent moins performants que les formules recommandées par la recherche sur base des engrais minéraux (T5) et sur base des formulations organo-minérales FOMI (T8). Ce dernier traitement produit 35 % plus de rendement que la formule ISABU et 30 fois plus que le rendement du témoin intégral (T1), pratiquement insignifiant (0,09 T/ha), en raison de la forte acidité du sol utilisé (Tableau 1). Le plus haut rendement de maïs est obtenu avec la formulation FOMI, avec 2,7 T/ha.

Quand les matières organiques sans supplémentation minérale sont comparées au fumier de vache seul quant à leurs effets respectifs sur le rendement, et ce en réponse à notre deuxième question de recherche, l'on constate que, quand bien même les traitements concenés (T2, T4 et T3) ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 % de probabilité, le fumier de vache (1,24 T/ha) reste supérieur au compost + Tithonia (1,02 T/ha) et au compost + Calliandra (0,85 T/ha). Autant conclure que notre hypothèse de travail 2 n'est pas vérifiée pour l'essai maïs de la saison 2020 A. De fait, l'analyse de la composition chimique des matières végétales sous investigation (Tableau 2) indiquent clairement que le fumier de vache utilisé est meilleur que les composts à base de Calliandra et Tithonia en termes de pH, % N, % P, % K, % Ca et % Mg.

### 3.4. Rendement de pomme de terre

Les rendements de pomme de terre, de même que les variations de rendements par rapport aux traitements témoins (ISABU et intégral) sont consignés dans le Tableau 4. Les traitements sous investigation se répartissent en deux groupes homogènes qui se chevauchent et sans différences significatives au seul de 5 % de probabilité. Néanmoins, au-delà des statistiques, contrairement aux résultats de la saison 2020 A sur la culture de maïs, les composts à base de Tithonia avec (T7) ou sans supplémentation minérale (T4) se démarquent par rapport aux autres traitements, y compris le traitement témoin ISABU (T5). En comparaison avec ce dernier traitement de référence, les traitements à Tithonia produisent respectivement plus de 25 et 6 % de rendement de pomme de terre. Ainsi, notre hypothèse de recherche que les composts à base de résidus de maïs améliorés avec les biomasses de Calliandra et de Tithonia donnent des productions de maïs et de pomme supérieures à celles générées par les formules de fertilisation recommandées par la recherche sur base des engrais minéraux (DAP, KCl, Urée) et des engrais organo-minéraux (FOMI) est bien vérifiée en saison 2020B.

En même temps, tous les autres traitements produisent moins que la formule de référence ISABU (T5), constituée du fumier de vache + 45-60-30 (NPK). D'autre part, le témoin intégral (T1) est caractérisé par un faible rendement, variant du tiers à la moitié des rendements des autres traitements organiques ou organo-minéraux. L'explication de ces faibles performances du traitement témoin (T1) est à chercher et trouver dans les faibles contenus du sol utilisé (Tableau 1).

Traitement	% Gain de Rdt comparé à T1	Rdt (T/ha)	% Gain de Rdt à T5
<b>Compost+Tithonia</b>	+ 213	7,61±0.90a	+ 25
<b>Compost + Tithonia (T4)</b>	+ 161	6,35±0.31a	+ 5,7
<b>Fumier</b>	+ 147	6,01±0.67a	-
<b>Compost + Calliandra (T3)</b>	+ 142	5,88±0.96a	- 2,2
<b>Fumier + Imbura + Totahaza (T8)</b>	+ 134	5,68±0.44a	- 5,5
<b>Fumier (T2)</b>	+ 109	5,08±0.40ab	-
<b>Compost + Calliandra</b>	+ 103	4,93±0.59ab	- 18
<b>Témoin intégral (T1)</b>	-	2,43±0.37ab	- 60

Les traitements suivis des mêmes lettres ne dans la première colonne sont pas significativement différents à  $p < 0,05$ .

Si l'on compare les performances de rendements des composts à base de résidus de maïs et d'espèces agroforestières (Calliandra et Tithonia) au fumier de vache dans l'optique de vérification de la question 2 de notre investigation, il apparaît que l'hypothèse est bien vérifiée. Les deux composts, à savoir T4 (compost + Tithonia) et T3 (Compost + Calliandra) donnent des rendements en pomme de terre numériquement supérieurs au rendement associé au fumier de vache seul (T2), de 25 et 16 %, respectivement.

Les résultats obtenus dans les deux essais successifs en saisons 2020 A et B nous permettent deux observations : (i) L'effet des composts à base de Calliandra et de Tithonia n'a pas été apparent au cours de la première saison culturale 2020A ; (ii) Par contre, l'effet résiduel des deux composts, plus particulièrement pour le compost à Tithonia, s'est nettement manifesté. Ceci est en parfait accord avec les résultats relevés ailleurs sur la même thématique (Zai et al., 2008 ; Zai et al. ; 2010 ; Egball et al., 2004). Si peu d'études sur le Calliandra sont peu disponibles, celles en rapport avec le Tithonia sont plus diversifiées. Ainsi, Gachenngo et al. (2000) ont rapporté au Kenya un large effet résiduel des biomasses

de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) appliquées au taux de 5 T/ha sur base de matière sèche. Cette quantité est cependant difficilement accessible au petit agriculteur, comme celui du Burundi avec des tailles d'exploitation agricole limitées. Et donc se pose une question de faisabilité de la technologie.

D'autre part, dans une étude de deux ans en milieu réel avec le Triple Superphosphate (TSP), Mijingu et la biomasse de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray, Ikerra et al., 2006 ont observé et rapporté une augmentation significative de P disponible combinée aux augmentations de rendement de (*Zea mays* L.), de pH du sol (effet de chaulage biologique), échangeable Ca accompagnés d'une réduction concomitante d'Al échangeable et de la fixation abiotique du P. Ces observations scientifiques ont été également confirmées par le travail de Jama et al. (2000), Nziguheba et al. (2002), Olabode et al. (2007) et Oludare and Muoghalu (2014).

Nous devons mentionner que tous ces différents chercheurs ont apporté l'attention de la communauté scientifique au sens large du caractère invasif de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray qui réduit la biodiversité biologique dans son environnement. Cette limitation de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray, si importante soit-elle vis-à-vis de l'environnement ne devrait pas effacer le rôle potentiel de l'espèce dans la restauration de la fertilité et de la productivité des sols du Burundi, en tant qu'engrais vert à hautes concentrations en nutriments (Table 3).

## 4. CONCLUSION

La présente investigation a évalué la valeur agronomique des composts à base de résidus de maïs améliorés avec les biomasses foliaires *Calliandra calothyrsus* Meisn et *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray sur les cultures de maïs (*Zea mays* L.) en saison 2020A et une culture successive de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) en saison 2020 B sur la colline de Bihunge, Commune Matongo, Province Kayanza. Les résultats obtenus dans cette étude en milieu réel montrent des rendements en maïs plus élevés (2,7 T/ha) avec les formulations organo-minérales FOMI en saison 2020 A, suivies de la formule recommandée par la recherche agronomique (2 T/ha). Au cours de cette première saison culturale 2020A, les traitements à composts, avec ou sans supplémentation minérale étaient moins performants. De l'autre côté, en saison 2020B sur la culture de pomme de terre, les traitements à composts de résidus de maïs améliorés avec les biomasses foliaires à base de *Calliandra calothyrsus* Meisn et *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray ont donné de meilleurs rendements. C'est ainsi que les rendements les plus élevés ont été observés avec le compost + *Tithonia* supplémenté avec 45-60-30 (7,61 T/ha), suivi par le même compost sans supplémentation minérale (6,35 T/ha).

Dans cette logique, le *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray a-t-il sa place sur les haies antiérosives en lieu et place du *Calliandra calothyrsus* Meisn, moins productive en biomasse, plus riche en nutriments. Ceci relève de choix stratégiques des services de vulgarisation habilités. Mais la question est à notre avis pertinente, au regard de la faible dissémination de la dernière espèce nommée et des limitations de propagation aussi bien reproductive que végétative. Un débat à suivre.

## Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants vis-à-vis des projets VLIR-UOS et PAGRIS/IFDC pour avoir financé la recherche sur l'érosion hydrique à Gashikanwa et Matongo et pour avoir facilité la dissémination des résultats durant le Forum sur l'Erosion Hydrique au Burundi. Nos remerciements s'adressent de manière particulière aux agriculteurs qui ont accepté de mettre à notre disposition leurs parcelles pour la conduite des expérimentations et aux techniciens de terrain du MINEAGRIE qui en ont efficacement assuré le suivi.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Egball, B., D. Grinting and J.E. Gilley. 2004. Residual effects of manure and compost applications on corn production and soil properties. *Agronomy Journal* 96: 442-447.
2. Gachengo, C.N., CA Palm, B. Jama and C. Othieno. 2000. Tithonia and Senna green manure and inorganic fertilizers as phosphorus sources for maize in western Kenya. *Agroforestry Systems* 14:21-36
3. Ikerra, S., E. Semu and J. Mrema. 2006. Combining Tithonia and Mijingu phosphate for improvement of P availability and maize grain yields on a chromic Acrisol in Morogoro, Tanzania. *Nutr Cycl Agroecosyst* 76: 249-260.
4. Izerimana E. and H. Hirwa. 2019. Availability of Nitrogen and organic matter in soil treated with Calliandra calothyrsus Meisn compost in Rwanda : a case of Ruhando Hill, Huye District. *International Journal of Development Research* 09 (12) : 32153-32156.
5. Jama, B., C.A. Palm, R.J. Buresh, A. Niang, C. Gachengo, G. Nziguheba and B. Amadalo. 2000. Tithonia diversifolia as a green manure for soil fertility improvement in Western Kenya: A review. *Agroforestry Systems* 49: 201-221.
6. Kaboneka, S., C. Kwizera, S. Nijimbere, W. Irakoze, P. Nsengiyumva, S. Ndiwokubwayo and B. Habonimana. 2021. Direct and residual fertilizer values of maize (*Zea mays* L.) stover co-composted with Tithonia diversifolia (Hemsl.) A. Gray green manure. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)*. Volume 7(7): 6-17. July 2021.
7. Kaboneka, S., C. Kwizera, S. Nijimbere, W. Irakoze, P. Nsengiyumva, S. Ndiwokubwayo and B. Habonimana. 2021. Yield responses of maize (*Zea mays* L.) and successive potato (*Solanum tuberosum* L.) crops to maize stover co-composted with Calliandra calothyrsus Meisn green manure. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)*. Volume 7(4): 1-15. April 2021.
8. Lausa M.A. and Lausa G. 2013. Quality improvement of organic composting using green biomass. *European Scientific Journal*. Ed. Vol 9 : 319-341. ISSN : 1857-7881 (Print) e-ISSN 1857-7431.
9. Nduwimana, O., Z. Nzohabonayo, C. Hicintuka et M. Nibasumba. 2013. Cartographie de la fertilité des sols et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB. 110 p.
10. Nziguheba, G., R. Merckx, C.A. Palm and Mutuo. 2002. Combining Tithonia diversifolia and fertilizers for maize production in a Phosphorus deficient soil in Kenya. *Agroforestry Systems* 55: 165-174.
11. Olabode, O.S., O. Sola, W.B. Akanbi, G.O. Adesina and PA Babajide. 2007. Evaluation of Tithonia diversifolia (Hemsl.) A. Gray for soil improvement. *World Journal of Agricultural Sciences* 3(4): 503-507.
12. Oludare, A. and J.J. Muoaghalu. 2014. Impact of Tithonia diversifolia (Hemsl.) A. Gray on the soil, species diversity and composition of vegetation in Ife-Ife (Southwestern Nigeria), Nigeria. *International Journal of Biodiversity and Conservation* 6(7): 555-562. Doi. 10.5897/IJBC2013.0634.
13. Tessens, E. and J. Gourdin. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Fiche Labo No 19. ISABU. 36 p.
14. Van den Berghe. 1991. Rapport d'activités Numéro 2 : Janvier-Octobre 1991. Facagro. Université du Burundi. 163 p.
15. Zai, A. K. E., T. Horiuchi and T. Matsui. 2008. Effects of compost and green manure of pea and their combinations with chicken manure and rapeseed oil residue on soil fertility and nutrient uptake in wheat-rice cropping system. *African Journal of Agricultural Research* 3 (9) : 633-639.
16. Zai, A. K. Z., T. Horiuchi, T. Matsui and D. Meherunnesa. 2010. Residual effects of compost and green manure of pea with other organic wastes on Nutrient-use efficiency of successive rice after wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41(8) : 2154-2169. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.504797>

# Thème 12

## Perception et adoption des pratiques de la LAE au Burundi : Etudes de cas comparées menées en communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo

P. Nsengiyumva<sup>1\*</sup>, I. Harumukiza<sup>1</sup>, T. Ndamuhawenayo<sup>1</sup>, D. Kabura<sup>1</sup>, P. Manirambona<sup>1</sup>, S. Kaboneka<sup>1</sup> et S. Nijimbere<sup>1</sup>

1. Université du Burundi. Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). B.P. 2940. Bujumbura, Burundi.

**\*Auteur pour correspondance : nsengiprud@gmail.com**

### Résumé

La perception ou la non perception d'une contrainte sont des préalables à l'adoption ou la non adoption de toute innovation technologique. Une analyse comparée de la perception et de l'adoption des pratiques antiérosives a été effectuée dans 4 communes du pays : Gashikanwa (Buyenzi) et Matongo (Mugamba) dans le cadre des projets VLIR/UOS-SADeR et IFDC/PAGRIS, et Mabanda (Buragane) et Vugizo (Bututsi) dans le cadre du projet ZOA « Building on Fertile Grounds ». L'analyse des résultats montre une situation très contrastée. Ainsi, 24 % des ménages (enquêtés) à Mabanda et seulement 6 % à Vugizo considèrent que l'érosion est la principale cause de la fertilité de leurs sols. Par contre, dans les communes de Gashikanwa (50 %) et Matongo (83 %), la perception que l'érosion dégrade la fertilité et la productivité des sols est de loin plus élevée. Pour une gestion conservatoire de l'eau et du sol, les exploitants recourent à la fumure organique (64 % à Vugizo, 92 % à Mabanda), les associations de cultures (30 %) et l'agroforesterie (30 % à Mabanda, 0 % à Vugizo). Les ménages des deux communes du Sud utilisent plus les méthodes antiérosives : haies herbacées seules (58 % à Gashikanwa, 75 % à Matongo) ou avec arbustes/arbres (33 % à Gashikanwa, 25 % à Matongo). S'agissant du matériel végétal herbacé, Bana Grass ou Pennisetum purpureum et Tripsacum laxum sont présents dans les communes de Mabanda et Vugizo, pratiquement au même taux de 40 % des exploitants agricoles. Une situation contrastée s'observe dans les communes du Nord où 60 % des ménages de Matongo utilisent le Bana Grass, contre 40 % à Gashikanwa. Tripsacum laxum est utilisé à hauteur de 23 % à Matongo et 48 % à Gashikanwa sur les haies antiérosives. A travers cette analyse, l'on perçoit des effets différentiels de vulgarisation liés à différentes approches des projets de développement, qui appellent une certaine harmonisation, tout en laissant un libre choix aux bénéficiaires.

**Mots clés : Perception, adoption, pratiques antiérosive, Gashikanwa, Matongo, Mabanda, Vugizo.**

## Abstract

Constraints' perception and non perception is a requirement to adoption or non adoption of a given innovative technology. A comparative survey has been conducted on perception and adoption levels of soil erosion control practices in 4 communes : Gashikanwa (Buyenzi) and Matongo (Mugamba) in the framework of VLIR/UOS-SADeR and IFDC/PAGRIS projects, and Mabanda (Buragane) and Vugizo (Bututsi), as a component of the ZOA « Building on Fertile Grounds ». The surveys depict contrasting situations between tested communes. It appears that 24 % of surveyed households in Mabanda and only 6 % in Vugizo consider soil erosion as the principal factor of soil fertility degradation. However, in Gashikanwa (50 %) and Matongo (83 %) communes, perception of soil erosion as the degrading factor of soil fertility is much higher. With regard to soil and water conservation strategies, farmers rely to organic manure (64 % in Vugizo, 92 % in Mabanda), multiple cropping (30 %) and agroforestry (30 % in Mabanda, 0 % in Vugizo). On the other hand, households adopt more soil erosion control methods in the northern communes : herbaceous hedges alone (58 % in Gashikanwa, 75 % in Matongo) or combined with agroforestry shrub/tree species (33 % in Gashikanwa, 25 % in Matongo). As for the used herbaceous species, Bana Grass or Pennisetum purpureum and Tripsacum laxum are present in nearly 40 % in both Mabanda and Vugizo households. A contrasting situation is observed in the northern communes, where 60 % of surveyed Matongo households use Bana Grass on contour lines, compared to 40 % in Gashikanwa. Tripsacum laxum is observed in 23 % Matongo and 48 % Gashikanwa households. From this analytical inside, we perceive differential effects of extension and household sensitization via implemented development projects, differential impacts which call upon more harmonization in the domain of tools and ways towards soil and water conservation programs in Burundi.

**Key words : Perception, adoption, erosion control, practices, Gashikanwa, Matongo, Mabanda, Vugizo.**

## 1. INTRODUCTION

L'érosion hydrique des terres cultivables est la cause principale de la perte de la fertilité des terres burundaises. Les services techniques agricoles s'accordent à avancer que 4 critères contrôlent le niveau d'adoption des techniques de lutte contre l'érosion : l'efficacité ; la productivité ou la diversification des productions (rentabilité) ; la durabilité et la reproductivité ou la faisabilité ou facilité de faisabilité ou de reproductivité de la technologie. Ainsi, les niveaux d'adoption des techniques antiérosives (LAE) dépendent de ces 4 critères suscités. Et tout paquet technologique proposé à l'agriculteur passe impérativement à travers cette maille de critères objectifs.

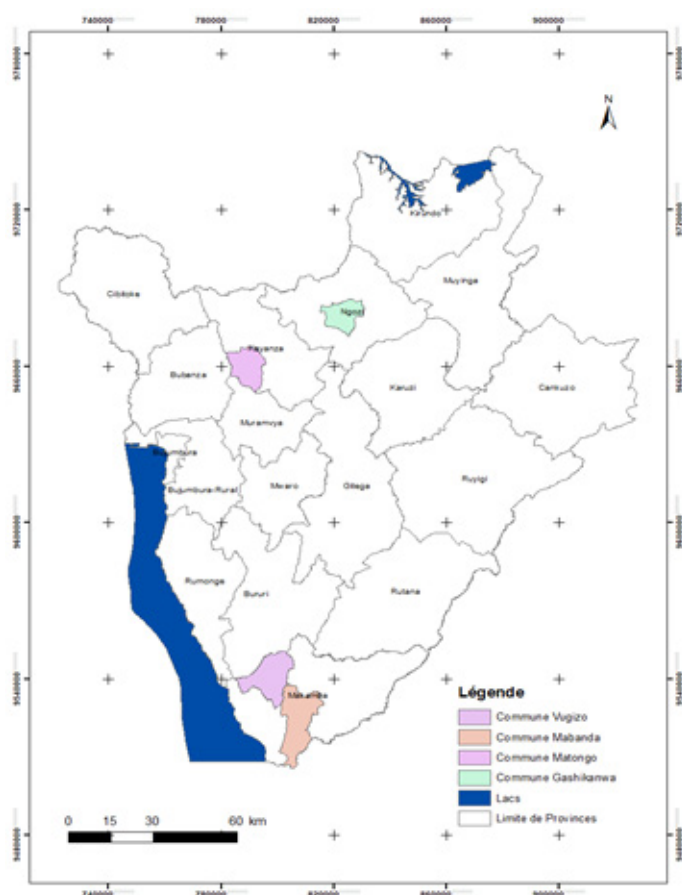
En effet, une opinion erronée est commune au niveau des services techniques est que les agriculteurs ne sont pas conscients des causes de l'érosion hydrique. A cet effet, une étude menée à Cashi, commune Bugarama et province Rumonge dans le Mumirwa Sud prouve que les agriculteurs sont bien conscients des causes de l'érosion hydrique. Dans cette étude menée sous la direction du Dr Ir Théodomir Rishirumhirwa dans le cadre d'un travail de mémoire de Master, les agriculteurs se sont exprimés sur les principales causes de l'érosion hydrique, en référence avec l'équation universelle des pertes en terre (RUSLE) de Wischmeier et Smith (1978). Ainsi, 34 % des agriculteurs interrogés considèrent la non protection des sols (facteur P de l'équation RUSLE) comme la principale cause de l'érosion hydrique, 22 % l'associent aux montagnes accidentées (LS), 18 % aux feux de brousse (C), 14 % à la déforestation (C) et 12 % au défrichement (C). Il ressort de l'étude que les paramètres R et K de RUSLE ne rencontrent pas directement l'attention des agriculteurs.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Projet SADeR qui oeuvrait dans les provinces densément peuplées du Nord du pays dont Ngozi et Kayanza dans les communes Gashikanwa et Matongo respectivement et dans le cadre du projet ZOA dans les communes de Vugizo et Mabanda de la province de Makamba. Elle a porté sur l'évaluation de la conscience de la population vis-à-vis de l'érosion hydrique, des méthodes de lutte et de ses conséquences sur la perte de la fertilité et de la productivité des sols.

## 2. MATERIELS ET METHODES

Les données pertinentes à ces études ont été collectées de Juillet à Août 2016 pour Gashikanwa et Matongo et de Janvier à Février 2015 pour Vugizo et Mabanda sur des ménages repartis sur différentes collines de ces communes. Ces études ont fait l'objet de mémoires d'étudiants de l'Ex-FACAGRO : Prudence Nsengiyumva dans les communes de Gashikanwa et Matongo ; Innocent Harumukiza et Tite Ndamihawenayo en commune Vugizo ; et Dionésie Kabura et Prosper Manirambona en commune Mabanda. Des enquêtes basées sur un questionnaire ont été menées auprès de 50 exploitants dans chacune des 4 communes. Les données collectées ont été ensuite analysées à l'aide du logiciel SPSS Version 16.0 et du logiciel Excel.

La figure 1 indique la localisation géographique globale des 4 communes ayant fait l'objet de la présente étude.



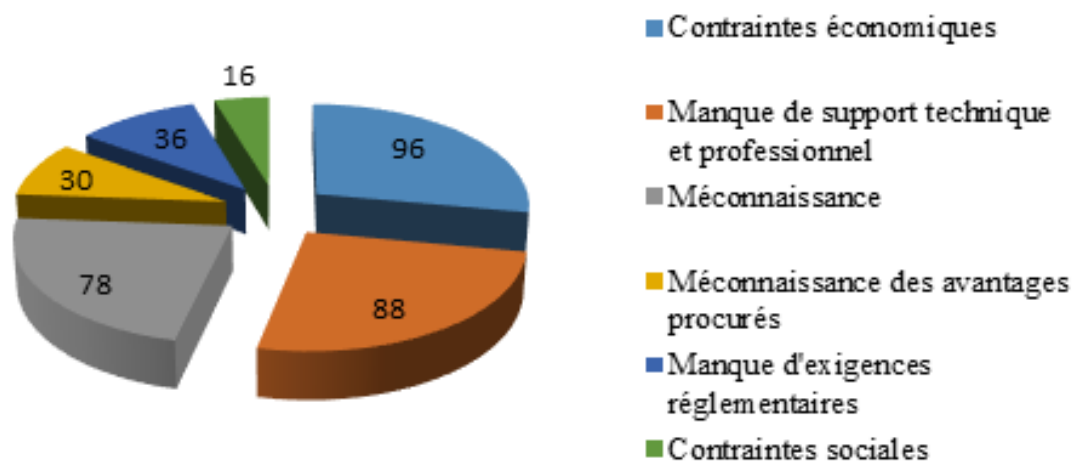
**Figure 1. Localisation des communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo**

## 3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés et discutés dans cette section concernent: i) les contraintes à l'adoption des pratiques de gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols; (ii) les niveaux d'encadrement agricole des exploitants; (iii) Utilisation de la fumure organique; (iv) les associations de culture; (v) les niveau d'utilisation des espèces herbacées et agroforestières dans la lutte antiérosive

### 3.1. Contraintes à l'adoption des pratiques de LAE

Cet aspect a été seulement couvert dans la commune Mabanda, mais les contraintes relevées peuvent également être d'application dans les autres communes et même au niveau du pays. Dans la commune de Mabanda, les contraintes freinant l'adoption de pratiques de gestion de la fertilité du sol sont nombreuses. Elles sont d'ordres socio-économique, technique et politique. La figure 2 ci-dessous relève les principales contraintes de la non adoption des pratiques de gestion de la fertilité du sol telles que rapportées par les agriculteurs enquêtés dans la commune Mabanda.

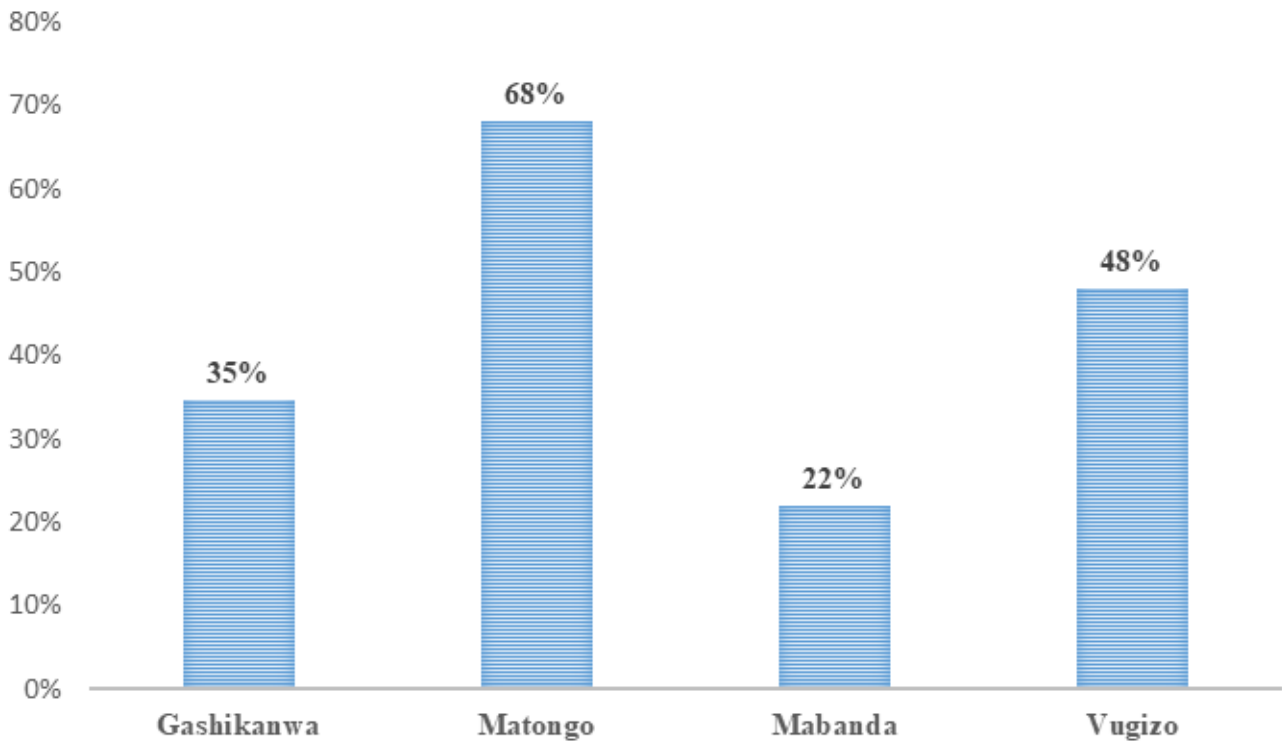


**Figure 2. Contraintes à l'adoption des pratiques antiérosives en commune Mabanda.**

De celle-ci, il ressort que les contraintes économiques, le manque de support technique et la méconnaissance des avantages procurés par la pratique antiérosive handicapent fortement l'adoption des pratiques de gestion de la fertilité du sol. En effet, les pratiques de gestion de la fertilité du sol exigent et entraînent chacune de divers coûts monétaires pour les agriculteurs. Ces coûts monétaires se composent de coûts d'achat d'intrants tels que les engrais à utiliser et les coûts de l'embauche supplémentaire du travail (si le travail de la famille est insuffisant) pour l'épandage du fumier et la réalisation de toute autre amélioration foncière. En plus de ces coûts, l'incapacité des agriculteurs à s'acheter un animal constitue un autre frein à l'adoption des bonnes pratiques de gestion du sol. La bonne maîtrise des techniques antiérosives (méconnaissance) constitue un autre frein à l'adoption des pratiques de gestion de la fertilité du sol. L'accès à l'information et à des connaissances adaptées est crucial pour que les populations rurales puissent accroître leur productivité tout en assurant une gestion durable de la fertilité du sol, et trouver des débouchés à leurs productions.

### 3.2 Niveau d'encadrement agricole

L'encadrement par les moniteurs agricoles a une importance capitale auprès des agriculteurs. L'analyse comparée de cet appui technique à la population effectuée dans les 4 communes d'étude a généré la Figure 3. Il apparaît que les moniteurs agricoles n'encadrent pas de la même manière la population de leurs collines, Ainsi, la population de Matongo reçoit trois fois plus d'encadrement des moniteurs (68%) que Mabanda (22 %) et deux fois plus que la commune Gashikanwa (35 %). De l'autre côté, Vugizo (48 %) est deux fois plus encadré que Mabanda, deux communes frontalières de la même Province Makamba. Bien évidemment, ces nettes différences de niveaux d'appui technique aux agriculteurs influe sur la connaissance et l'adoption des pratiques agricoles antiérosives de la part des bénéficiaires. Ces différences dénotent aussi du nombre de projets oeuvrant dans ces zones, ainsi qu'un net manque de coordination et d'harmonisation dans les approches. Pour dire que, au final, le DOSABV vient à point nommé.

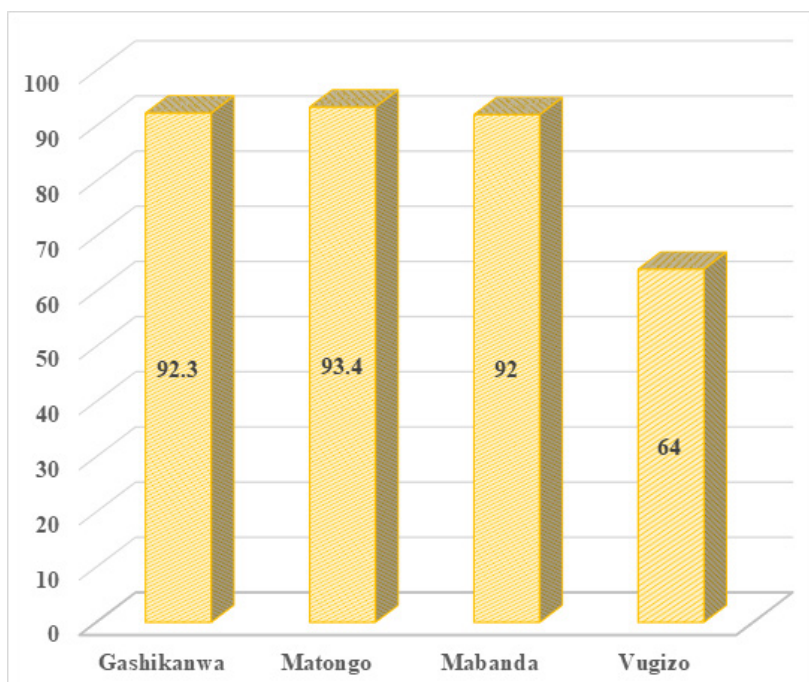


**Figure 3. Niveau d'encadrement des exploitants agricoles par les moniteurs agricoles**

### 3.3 Utilisation de la matière organique

La fumure organique intervient de manière prépondérante dans la gestion de la fertilité du sol. Elle joue également le rôle de ciment entre les agrégats du sol, améliorant de cette façon la structure du sol, ce qui lui procure un effet résistant à l'érosion.

Dans les quatre communes qui ont intéressé la présente étude (Figure 4), plus de 90 % des exploitants enquêtés utilisent la fumure organique pour améliorer les conditions physiques, chimiques et biologiques du sol et partant sa productivité. La commune de Vugizo (64 %) est à la traîne avec 64% des exploitants qui recourent à la fumure organique pour améliorer la fertilité des sols. Pour quelles raisons, la question reste ouverte et nécessite de plus profondes investigations.

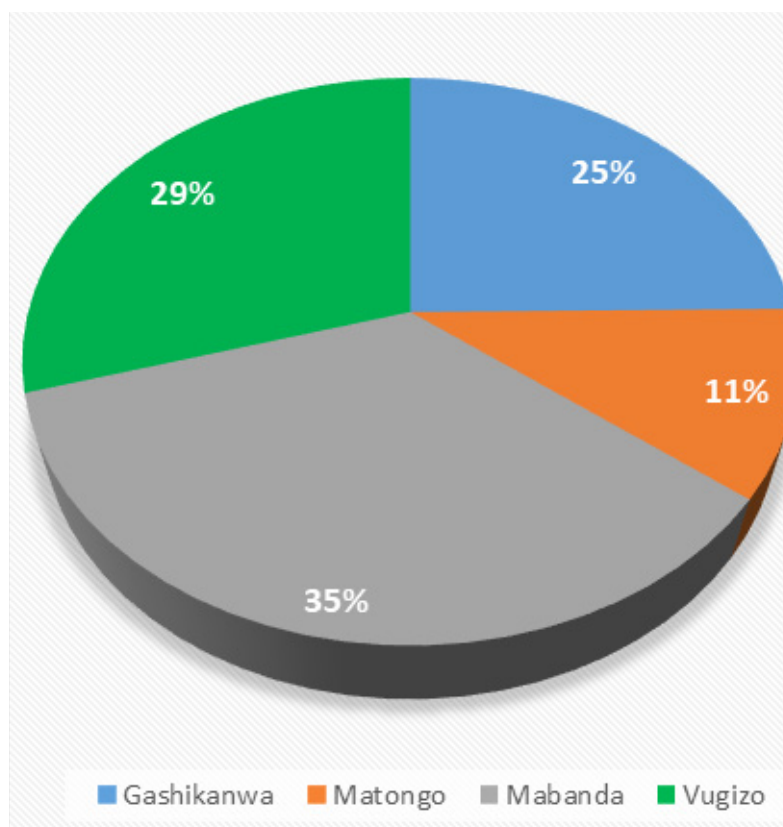


**Figure 4. Niveau d'utilisation de la fumure organique**

A Mabanda où les données complètes sur les différentes pratiques de gestion de la fertilité des sols sont disponibles, il apparaît que, à côté de la fumure organique, la pratique de la lutte antiérosive est largement utilisée par 80 % des exploitants enquêtés. Les autres pratiques, comme les apports de fertilisants minéraux (28 %), la rotation des cultures (22 %) et le paillage (16 %) suivent de loin de manière marginale.

### 3.4 Association des cultures

A la lecture de l'équation universelle des pertes en terre de Wischmeier et Smith (1978), l'association des cultures contribue à la lutte antiérosive, à travers le facteur C (couvert végétal). Si le sol est bien couvert par les cultures, la pluie arrive difficilement au sol et son énergie cinétique de détachement du sol est diminuée, ce qui réduit ensuite le ruissellement au profit de l'infiltration. La Figure 5 résume l'importance de l'association des cultures comme outil de gestion de l'eau et de la fertilité des sols dans les communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo. Nous remarquons que 35% des exploitants de Mabanda, 29% de Vugizo, 25% de Gashikanwa et seulement 11% des exploitants de Matongo pratiquent l'association des cultures. Dans la plupart de cas, les associations représentées sont à base de bananier, de maïs et de haricot (Photo 1).



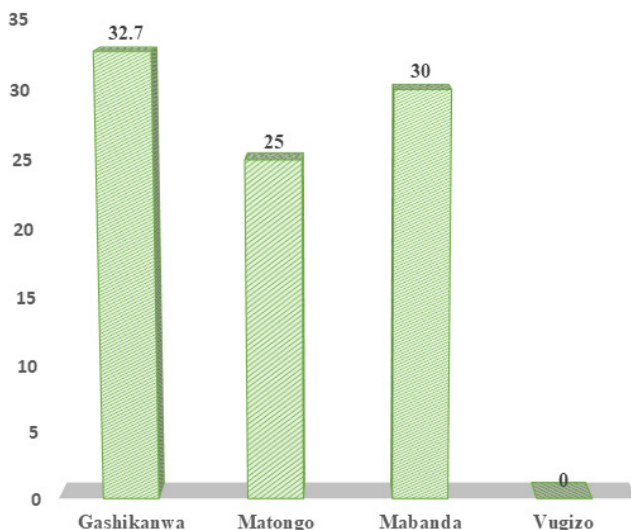
**Figure 5. Niveau d'associations des cultures dans les communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo**



**Photo 2 : Exemple d'association de trois cultures (Haricot-Maïs-Bananier).**  
**Photo Innocent Harumukiza (2016).**

### 3.5 Utilisation des espèces agroforestières dans la Lutte antiérosive

Les espèces agroforestières vulgarisées par les projets de développement et d'encadrement agricole des populations appartiennent à deux espèces de légumineuses arbustives: *Calliandra calothyrsus* et *Leucaena à diversifolia*. sont utilisés dans la lutte antiérosive. Elles sont toutefois peu présentes dans les exploitations des 4 communes étudiées (Figure 6). Cette figure nous montre que le taux d'utilisation des espèces agroforestières est faible, voire nul: 32,7% Gashikanwa, 30 % à Mabanda, 25 % à Matongo et 0 à Vugizo. Au-delà de la faible utilisation des espèces agroforestières dans l'aménagement des parcelles agricoles dans les communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo, l'on denote une très grande disparité entre les communes, même rapprochées et qui devraient bénéficier d'encadrement agricole semblable. C'est le cas des communes Mabanda et Vugizo, où cette dernière commune est visiblement à la traine dans l'adoption des pratiques anntiérosives.



**Figure 6. Niveau d'utilisation des espèces agroforestières dans la lutte antiérosive dans les communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo.**

### 3.6 Espèces herbacées

Les plantes herbacées ont une grande importance dans une exploitation agricole. Elles sont utilisées pour lutter contre l'érosion par leur effet filtre et pour nourrir le bétail. Combinées ou non aux espèces agroforestières sur les haies antiérosives dans les exploitations agricoles des hautes collines, elles appartiennent à 4 groupes : Bana Grass, Pennisetum purpureum, Tripsacum laxum et Setaria sphacelata. Cette dernière espèce est des moins acceptée en raison de sa faible production de biomasse et de sa lignification rapide qui affecte sa qualité fourragère.

La Figure 7 montre les proportions des herbes fixatrices utilisées dans la lutte antiérosive dans les 4 communes sous investigation. Bana grass est plus utilisée à Matongo (67,3%) contrairement à Vugizo (2%). L'espèce est présente à l'échelle de 40,4 % à Gashikanwa et 26 % à Mabanda. Tripsacum laxum semble être omniprésent dans les 4 communes à des taux moyens à faibles : Gashikanwa (48,1 %), Vugizo (38 %), Mabanda (33 %), Matongo (23,1 %). En tant qu'herbe fixatrice des haies antiérosives, Pennisetum purpureum est plus représenté dans les communes Vugizo (44 %) et Mabanda (41 %) que celles de Matongo (11,5 %) et Gashikanwa (3,8 %).

Cette différence est à chercher du côté des différents projets de développement ayant opéré dans ces différentes zones et qui ont fait la promotion de telle espèce herbacée plutôt que telle autre.

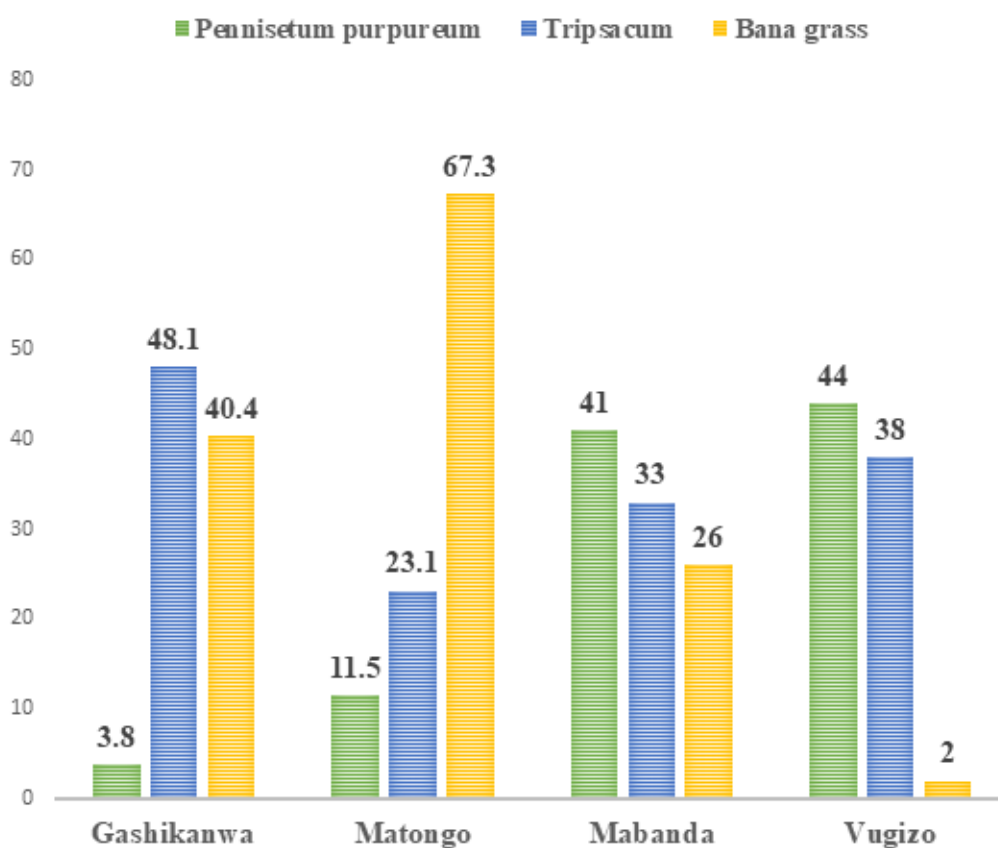


Figure 7. Niveau d'adoption des espèces herbacées dans la lutte contre l'érosion.

### 3.7 Appréciation de l'érosion comme facteur causal de la chute de la fertilité des sols

L'érosion est l'une des causes principales de la perte de la fertilité. Certains agriculteurs le savent, d'autres ne le savent pas. La Figure 8 illustre la disparité entre les communes sous investigation quant à la connaissance du fait que l'érosion est un facteur causal de la chute de la fertilité des sols et de sa productivité. Le graphique montre que dans la commune Matongo, 82,7% des exploitants sont conscients que l'érosion diminue la fertilité et la productivité des sols. Tout le contraire de la commune de Vugizo (6 %) où la majorité des agriculteurs ignorent l'effet réducteur de l'érosion sur les sols agricoles.

Dans le même ordre d'idée, un agriculteur sur deux (50 %) à Gashikanwa et un agriculteur sur quatre (24 %) à Mabanda reconnaissent que l'érosion est la cause de chute de la fertilité des sols. Encore une fois, le lecteur devrait relever une disparité dans l'encadrement des agriculteurs que ce soit par les projets de développement et/ou les services agricoles. En effet, la Figure 7 est facilement superposable à la Figure 2.

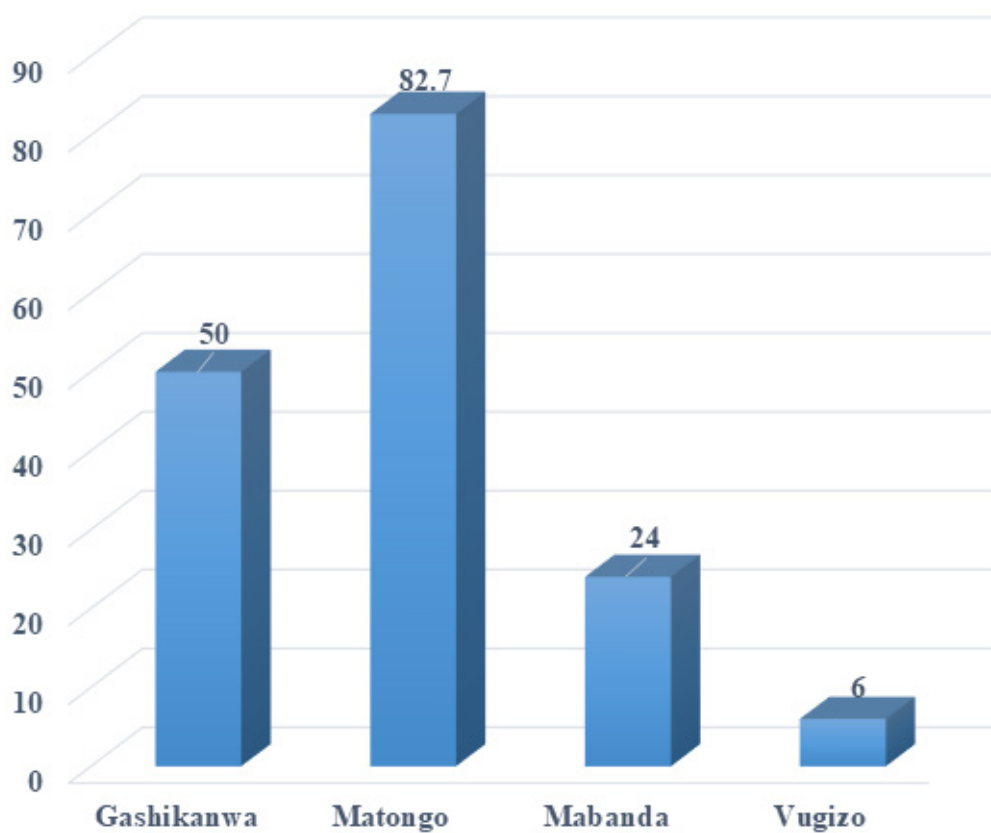
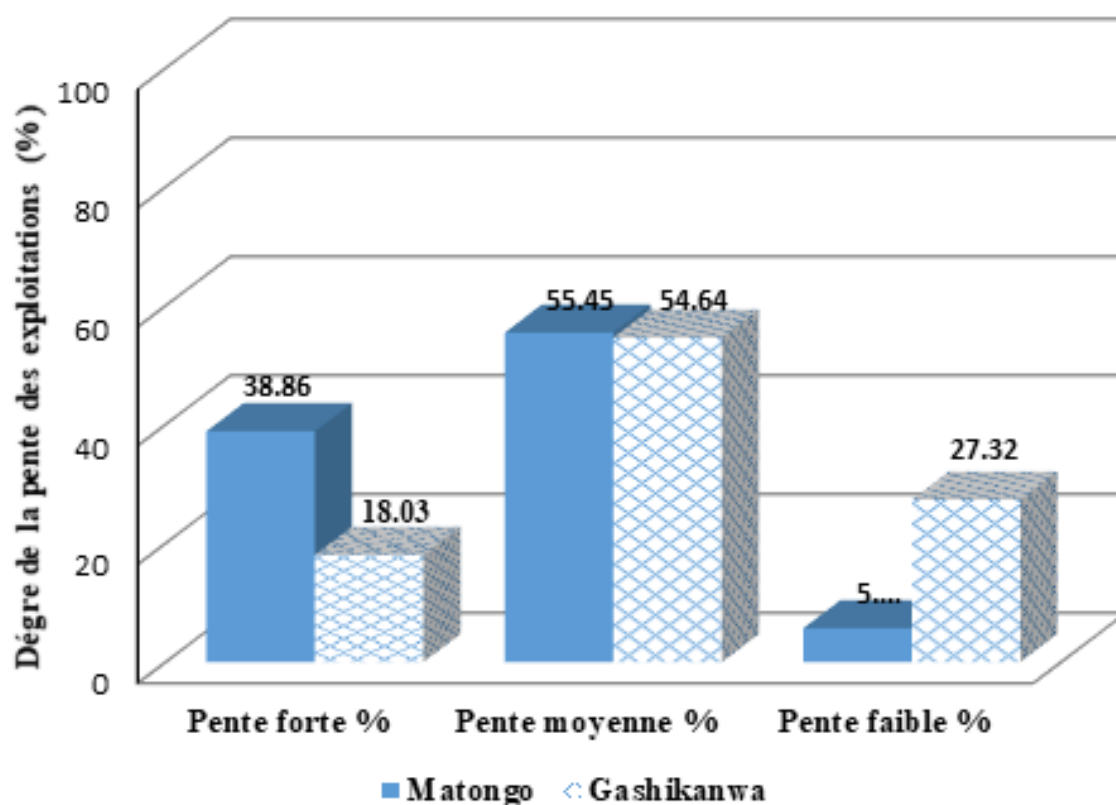


Figure 8. Appréciation de l'effet causal de l'érosion sur la fertilité des sols

### 3.8 Localisation des parcelles agricoles par rapport aux pentes

Cet aspect a seulement fait l'objet d'investigation que dans les communes Gashikanwa et Matongo (Figure 9). Les résultats de l'enquête menée dans les deux communes de Gashikanwa et de Matongo montrent que dans cette dernière commune 38,9 % des parcelles cultivées visitées sont sur forte pente (plus de 30 % de degré de pente) et 55,5 % sont sur pente moyenne (pente comprise entre 10 et 30 % de pente). Seulement 5,7 % des terres agricoles sont situées sur des terrains à faible pente (< 10% de degré de pente).

De l'autre côté, à Matongo, seulement 18 % de parcelles cultivées sont localisées sur des terrains à forte pente, alors que pratiquement la même proportion dans la commune Matongo (54,6 %) est localisée sur des pentes moyennes. Près d'une parcelle sur 3 (27,3 %) est située sur des pentes faibles.



**Figure 9. Répartition des exploitations agricoles en fonction des degrés de pente en communes Gashikanwa et Matongo**

Il est intéressant de vérifier si l'intensité des pratiques antiérosives correspond au degré de pente. Cette relation est vérifiée avec la Figure 10. Celle-ci indique dans la commune les pratiques antiérosives sont adoptées autant sur pentes faibles (60,8 %) et moyennes (61,5 %). L'adoption augmente jusqu'à 75,2 % lorsque les pentes sont élevées (> 30 %). De l'autre côté, l'adoption des pratiques antiérosives est assez faible à Matongo pour pratiquement doubler sur des terrains agricoles à pentes moyennes (79,2 %) à fortes (87 %).

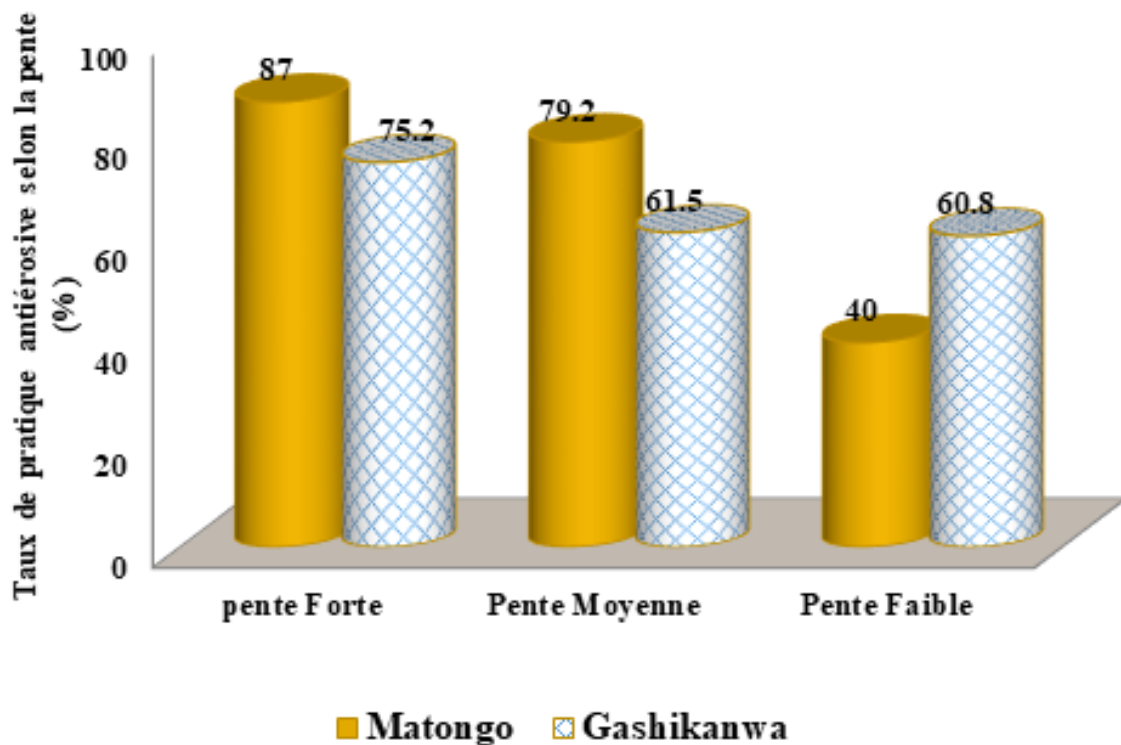


Figure 10. Taux de pratiques antiérosives en fonction des degrés de pente en communes Gashikanwa et Matongo

## 4. CONCLUSION

La perception ou la non perception d’une contrainte sont des préalables à l’adoption ou la non adoption de toute innovation technologique. Dans les 4 communes sous investigation (Gashikanwa, Matongo, Mabanda, Vugizo), la perception que l’érosion est cause de la chute de la fertilité et la productivité des sols est plus élevée dans les deux premières communes nommées et plus particulièrement la commune de Matongo. Dans les communes de Mabanda et Vugizo, cette perception est faible et encore plus faible dans la commune de Vugizo. Cette tendance se remarque aussi sur les différentes pratiques de lutte antiérosive. Que ce soit pour l’encadrement par les moniteurs agricoles, le recours à la fumure organique, les espèces herbacées utilisées dans la LAE, les espèces agroforestières stabilisatrices des haies herbacées, la commune de Matongo vient en première position et celle de Vugizo en dernière position. Les deux communes restantes, Gashikanwa et Mabanda occupant des positions intermédiaires quant à la perception et l’adoption des pratiques de LAE. Même limitée à seulement 4 communes du pays, cette disparité dans l’adoption des pratiques antiérosives interpelle les services de vulgarisation pour assurer des formations et des sensibilisations et un appui technique conséquent aux agriculteurs. La mise en œuvre du DOSABV devrait considérer cet aspect. La diversification des espèces agroforestières stabilisatrices des haies herbacées, au-delà de *Calliandra calothyrsus*, devrait aussi être une de ses priorités.

## Remerciements

Les auteurs remercient le Projet VLIR/UOS, le projet ZOA « Building on Fertile Grounds » et le projet IFDC/PAGRIS pour les financements qui ont permis les différentes études qui ont produit les résultats présentés dans cet article et le projet IFDC/PAGRIS pour avoir facilité le partage de ces résultats lors du Forum sur l’Erosion Hydrique au Burundi.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Bergen, D.W. 1988. Influence de la densité de la population sur la taille de l'exploitation agricole et sur l'intensification de l'agriculture traditionnelle. ISABU, 33 p.
2. Bergonzini, J. C. 2004. Changements climatiques, désertification, diversité biologique et forêts. SILVA et RIAT. 146 p.
3. Cycle d'Etudes agronomiques. 1980. Etude de la première question « Principe et concepts de la lutte antiérosive et de la conservation des sols au Burundi, son application à la colline ». Association des Ingénieurs Agronomes Bujumbura-Grand Gembloux Louvain. 48p.
4. DPAE KAYANZA. 2016. Rapport annuel 50 p.
5. DPAE NGOZI. 2016. Rapport annuel 65 p.
6. FAO. 1967. La défense des terres cultivées contre l'érosion hydraulique. Progrès et mise en valeur – Agriculture No 81. Rome, Organisations des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.321 p.
7. Harumukiza I et T. Ndamuhawenayo. 2016. Variation spatiale des principaux paramètres chimiques du sol de la commune Vugizo. Mémoire d'Ingénieur Agronome. UB, FACAGRO. 159 p.
8. Andrews and N.V. Duibengooden. 2015. Using organic matter to increase soil fertility in Burundi: Potentials and limitation. EGU 2015. Vienne, Autriche, 16 p.
9. Kabura D. et P. Manirambona. 2016. Variation spatiale des principaux paramètres chimiques du sol de la commune Mabanda. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
10. Kelly, H. W. 1983. Garder la terre en vie : l'érosion des sols, ses causes et ses remèdes, Rome : FAO, 90 p.
11. MPDRN. 2006. Monographie de la commune Gashikanwa. 112 p.
12. Niragira, S. 2009. Contribution à l'étude de la vulnérabilité socio-économique des ménages de la province densément peuplée de Ngozi. Mémoire. UB, FACAGRO. 133 p.
13. Nsengiyumva, P. 2017. Situation de référence des sites expérimentaux d'étude sur l'érosion en communes Gashikanwa et Matongo par le projet SAdER. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
14. Nyabuhwanya, J. 1993. Contribution à l'étude de l'influence de l'érosion hydrique sur les propriétés physiques et chimiques du sol. Mémoire. UB, FACAGRO. 87 p.
15. Rishirumuhirwa, T. 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale : Application au cas de la région du Kirimiro-Burundi.321 p.
16. Roose, E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO. Rome, 420 p.
17. Roose, E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Bulletin pédologique de la FAO, Rome, 420 p. Technique de Coopération Agricole et Rural (CTA), 99 p.
18. Van Den Abeele, M. 1941. L'Erosion. Problème africain, Bruxelles, 29 p.
19. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion loesses – a guide to soil conservation planning - U.S. Departement of Agriculture, Agriculture handbook N°282, 58 p.

# Liste des Participants

Nom	Prénom	Organisation	Fonction/Service	Téléphone
Bahimana	Donatien	BPEAE Bujumbura	Génie Rural	61 870 243
Bashishikare	Nestor	RBU 2000+	Responsable de Projet	69 782 079/71 521 866
Manirakiza	Léopold	Présidence	Conseiller	79 961 422
Nibasumba	Marcel	IFDC	Directeur Pays	62 00 500
Nihorimbere	Manassé	Université du Burundi	Chef de Service	61 408 895
Niyonzima	Ernest	OAP	Suivi/Evaluation	79 117 365
Sabushimike	Jean Marie	Université du Burundi	Enseignant Chercheur	71 764 630
Congera	Jean Marie	BPEAE Rumonge	Directeur	69 327 817
Ali	Hussein	BPEAE Muramvya	Directeur	69 102 266
Mpawenayo	Etienne	BPEAE Makamba	EEA	69 192 604
Minani	Dismas	DVFRD	Directeur	79 510 537
Nisubire	Marie Chantal	ISABU	Chef de Programme	69 225 511
Kanyebeti	Paul	ADISCO	Assistant Technique	69 103 153
Ndihokubwayo	Soter	FABI/UB	Enseignant Chercheur	79 830 356
Nivyubu	Emmanuel	BPEAE Mwaro	Chef de Service	68 484 646
Nijimbere	Séverin	FABI/UB	Doyen	79 403 961
Nzohabonayo	Zacharie	IFDC	Agronome	79 800 740
Nduwimana	Oscar	IFDC	Agronome	79 053 987
Habonimana	Bernadette	FABI/UB	Enseignant Chercheur	79 876 397
Sindayihebura	Anicet	Fac Sciences/UB	Enseignant Chercheur	61 170 123
Sindayikengera	Pierre	MINEAGRIE	Conseiller	62 781 160
Nkunuzimana	Athanase	Fac Lettres/UB	Enseignant Chercheur	69 290 711
Kaboneka	Salvator	FABI/UB	Enseignant Chercheur	71 437 434
Bizabirtyo	Déogratias	IFDC	SE	71 206 706
Emerimana	Laetitia	DGRIDS	Conseillère	69 479 843
Bagorikunda	Pierre Claver	BPEAE Rutana	Directeur	69 494 767
Rishirumuhirwa	Théodomir	Agrobiotech	Directeur	79 924 580
Nsengiyumva	Prudence	FABI/UB	Chercheur	69 344 511
Niyondiko	Jeanine	FABI/UB	Secrétaire du Doyen	62 831 131
Ndikumana	Audace	Inades Formation	Agronome	79 926 461
Beun	Micael	IFDC	COP	79 814 341
Migambi	Nicodème	BPEAE Kirundo	Agronome	69 277 438
Nijimbere	Frédiane	Tear Fund	C.P	61 446 673
Hatungimana	Zénon	RTNB	Journaliste	72 006 427
Sinzihora	Mélando	BPEAE Kayanza	RPV	69 303 457
Ndongezi	Alain Lawis	BETV	Journaliste	76 346 790
Uwamahoro	Clémentine	RTNB	Journaliste	79 078 069
Nduwumika	Emilienne	RTNB	Journaliste	77 457 508
Sindayikengera	Pascal	RTNB	Journaliste	79 966 346
Nsabimana	Constantin	UB/Com.	Journaliste	79 364 185
Nduwayezu	Egide	IFDC	NCO	79 945 803
Nduwimana	Claudette	HCB	Socio-Environnement	61 385 564
Niwivugire	Donathe	BNP	Journaliste	79 671 191

<b>Bigirumuhirwe</b>	<b>Nestor</b>	BNP	Journaliste Caméra	79 956 636
<b>Kwizera</b>	<b>Raissa</b>	BPEAE Ngozi	GRH	71 684 632
<b>Nshimirimana</b>	<b>Marie Josée</b>	MINEAGRIE	Conseillère	77 424 348
<b>Nderagakura</b>	<b>Ferdinand</b>	PRRPB	Spécialiste Environ.	79 990 001
<b>Nduwimana</b>	<b>Désiré</b>	Privé	Chercheur	62 445 096
<b>Bizindavyi</b>	<b>Albert</b>	Tubura	Chargé de	69 891 371
<b>Ntakiyica</b>	<b>Apollinaire</b>	OBUHA	Environ.	61 989 361
<b>Kubwimana</b>	<b>Désiré</b>	Fac Sciences/UB	Enseignant Chercheur	68 702 354
<b>Bigirimana</b>	<b>Monique</b>	UB/Com.	Journaliste	79 991 266
<b>Nizigiyimana</b>	<b>Emmanuel</b>	UB/Com.	Journaliste	79 750 874
<b>Rigumye</b>	<b>Mariette</b>	Iwacu	Journaliste	79 682 355
<b>Nyabuntu</b>	<b>Florence</b>	Bdi Eco	Journaliste	79 682 355
<b>Nsavye</b>	<b>Christian</b>	Isanganiro	Journaliste	79 956 225
<b>Nihorimbere</b>	<b>Alain</b>	RTI	Journaliste	71 513 274
<b>Bahingana</b>	<b>Léonidas</b>	BPEAE Bubanza	RPV	79 828 901
<b>Niyongabo</b>	<b>Edgar Dimitri</b>	RTNB	Journaliste	61 129 190
<b>Kigeme</b>	<b>Lydia</b>	ISABU	Chercheur	79 416 213
<b>Habonimana</b>	<b>Xavier</b>	BPEAE Muyinga	Directeur	79 813 391
<b>Nduwimana</b>	<b>Jean Claude</b>	BETV	Journaliste	71 203 191
<b>Nshimirimana</b>	<b>Ezéchiel</b>	REMA FM	Journaliste	69 551 639
<b>Irakunda</b>	<b>Evariste</b>	REMA FM	Journaliste	65 577 239
<b>Ndayishimiye</b>	<b>Olivier</b>	Mairie	Chef de Service	71 061 728
<b>Kwizera</b>	<b>Chantal</b>	FABI/UB	Enseignant/Chercheur	71 735 097
<b>Hicintuka</b>	<b>Cyrille</b>	ISABU	Chercheur	79 970 098
<b>Habonimana</b>	<b>Espérance</b>	Floresta	Chef de Projet	79 570 182
<b>Ntahondereye</b>	<b>Melchiade</b>	BPEAE Cankuzo	Directeur	79 093 938
<b>Ngendakumana</b>	<b>Emelyne</b>	ABP	Journaliste	62 018 727
<b>Harerimana</b>	<b>Jean Bosco</b>	RTNB	Journaliste	61 973 471

# RECOMMANDATIONS DU FORUM SUR L'ÉROSION AU BURUNDI

Restaurant La Détente, les 24 et 25 janvier 2024

## A. Recommandations thématiques

### Thème 1.

**Document d'orientation stratégique d'aménagement des bassins versants et de lutte antiérosive « DOSABV » : Approche harmonisée pour son opérationnalisation. Par Ing. Pierre Sindayikengera (MINEAGRIE)**

1. En complément du DOSABV, il faut prévoir les activités spécifiques de LAE pour des zones à pente très élevée. Plus spécifiquement, une réflexion plus approfondie doit être menée afin d'identifier les systèmes d'exploitation adaptés et les techniques de gestion des terres adaptées pour des zones à pentes élevées. La gestion de ces terres nécessite un cadre législatif adapté pour protéger ces dernières non encore mises en cultures, et des mesures spécifiques doivent être proposées, comme alternatives aux ménages qui exploitent ces terres.
2. Proposition de mettre en défens ou bien pratiquer la fructiculture parce que c'est le labour qui est le principal facteur de l'érosion hydrique et orienter les agriculteurs à la mise en œuvre des pratiques agricoles appropriées selon les conditions locales
3. Organiser des séances d'information et de sensibilisation des populations pour la protection des BV et mettre à leur disposition les moyens nécessaires pour les matériels adéquats pour la mise en œuvre de ces techniques
4. Urgence de rendre disponible le guide pratique harmonisé vu l'ambition d'avoir terminé l'aménagement d'ici 2027
5. L'administration locale doit choisir par colline un site modèle ou pilote pour stimuler la population environnante et cela doit se faire au niveau national
6. Elaborer un plan directeur d'aménagement du territoire pour diminuer les risques de catastrophes par l'érosion hydrique
7. Collaborer avec les services d'aménagement des routes car certaines rigoles prennent naissance au niveau des routes par les canaux d'évacuation
8. Penser à la mise en place ou valoriser des espaces adaptés (plateforme fertilité des sols/ sous-secteur « gestion durable des terres » du GSADR, comités prévus dans le DOSABV) pour mener des réflexions approfondies et régulières sur la problématique de gestion des terres et LAE. Cela contribue aussi pour renforcer le travail en synergie dans la mise en œuvre des aménagements des BV.
9. Intégrer la question de la démographie galopante dans le DOSABV et autres documents stratégiques.
10. Traduction des présentations faites et du DOSABV en Kirundi et en faire des dépliants à mettre à la disposition des acteurs technico-administratifs jusqu'au niveau colline
11. Rendre disponible les documents stratégiques dans les bibliothèques universitaires et organiser des ateliers de vulgarisation/dissémination/sensibilisation dans le milieu universitaire
12. Convenir une méthodologie de diagnostic (quels sont les critères requis pour assurer un choix raisonné des dispositifs antiérosifs et bonnes pratiques agricoles) et de suivi-évaluation (quels indicateurs) des aménagements des bassins-versants.

## Thème 2.

### **Récurrence des extrêmes climatiques et mécanismes associés en Afrique de l'Est : Cas du Burundi. Par Dr Athanase Nkuzimana (Faculté des Lettres et Sciences Humaines - Université du Burundi)**

13. Prévention des risques d'inondations/effets de l'érosion en aval (ex situ) par les stocks d'eau au niveau des ménages en amont
14. Faire une modélisation de la situation future visant la mise en place d'un système d'alerte précoce et proposer des mesures de résilience qui tiennent compte des situations prévisibles
15. Renforcer et redynamiser le système d'alerte précoce et rendre disponible les techniques et les moyens nécessaires
16. Il faut prévoir des techniques de collecte et de conservation de l'eau pluviale et subventionner les équipements nécessaires afin d'utiliser cette eau en période de soudure ou de sécheresse
17. Prévoir des mécanismes plus résilients face aux effets des récurrences des extrêmes climatiques (Fonds de soutien aux agriculteurs modèles en cas de catastrophes climatiques : inondations, déficits pluviométriques, ...)

## Thème 3.

### **Caractérisation des glissements de terrain et des processus d'érosion associés en périphérie de la ville de Bujumbura. Par Dr Désiré Kubwimana (Faculté des Sciences - Université du Burundi)**

18. Etendre l'étude des mouvements de terrain sur une grande étendue
19. Etablir une carte des mouvements de terrain dans la région naturelle du Mumirwa et proposer des stratégies d'exploitation conséquentes
20. Créer un centre d'information sur l'évolution de la qualité des sols.

## Thème 4.

### **Estimation des pertes en terre par l'érosion linéaire en rigoles : application de la méthode ACED Par Ir Alain Niyungeko**

## Thème 5.

### **Contribution de la télédétection par drones au suivi et à la modélisation des pertes en terre par l'érosion au Burundi. Par Dr Anicet Sindayihebura (Faculté des Sciences - Université du Burundi)**

21. Refaire plusieurs mesures avec la nouvelle méthode ACED afin d'avoir une base de données suffisante pour se rapprocher de la réalité
22. Exploiter la forte complémentarité entre les travaux anciens (Wischmeier) et les nouvelles méthodes de diagnostic de l'érosion (ACED et drones, etc.)

## Thème 6.

### **Acquis de la recherche sur l'érosion hydrique dans la région du Kirimiro – Mashitsi. Par Dr Ir Théodomir Rishirumuhirwa (Agrobiotech-IRAZ)**

23. Intégrer le bananier dans les pratiques de lutte antiérosive avec sa capacité de production d'une biomasse importante.
24. Multiplier les arbres surtout agroforestiers et fruitiers qui jouent plusieurs fonctions de protection et de restauration de la fertilité des sols et dans l'amélioration de l'alimentation et des revenus des ménages.
25. Maximiser la biomasse pour le paillis complet des exploitations agricoles

26. Investir dans la LAE avant d'utiliser les autres fertilisants pour s'assurer de l'efficacité de ces derniers.
27. Favoriser et promouvoir le paillis en bandes qui est plus efficace que le paillis en couronne pour la réduction de l'érosion

## Thème 7

### **Acquis de recherche et leçons apprises sur l'érosion hydrique en nappe dans la région naturelle du Mumirwa (Rushubi-Isare). Par Ir Cyrille Hicintuka (ISABU)**

28. Favoriser les fossés bien calibrés et régulier mais aussi enherbés
29. Eviter d'imposer une quelconque technique de LAE qui n'apporte pas une valeur ajoutée à l'agriculteur
30. Penser à instaurer une méthode mixte où on remplacerait la haie vive par des bandes enherbées, revenir à l'agriculture de conservation
31. Eviter de creuser de FAE sur des terres à haut risque de glissement
32. Eviter dans le meilleur des cas d'envisager l'aménagement des terrasses radicales dans les conditions de Burundi où les conditions géologiques ne sont pas favorables
33. Pour proposer une technique appropriée de LAE, les agronomes devraient travailler en synergie avec les socio-anthropologues ou les psychologues pour tenir compte des aspects socio-économiques très importants pour les exploitants agricoles.
34. Associer la technique de FAE végétalisés à la promotion de l'élevage pour la rentabilisation de la biomasse produite

## Thème 8

### **Rentabilité financière et effets de la haie mixte (Bana grass + Calliandra calothyrsus + Grevillea robusta), du fossé isohypse et de la haie combinée au fossé comme techniques de lutte anti-erosive sur le rendement de la pomme de terre et du maïs en zone densément peuplée du Nord Burundi (Kayanza-Ngozi). Par Prof. Bernadette Habonimana (FABI-Université du Burundi)**

35. Proposer un dispositif qui intègre une haie mixte : le Bana Grass avec ou sans arbres agroforestiers qui est mieux indiqué pour la production du fourrage pour le bétail et qui est plus durable que le Setaria.
36. Eviter la concurrence entre le Calliandra et le Bana Grass en instaurant un système d'embocagement par la mise en place du Calliandra sur les pourtours des parcelles agricoles.

## Thème 9

### **Analysis of Erosion Control Methods Effects on maize growth and production parameters at Matongo and Gashikanwa. Par Prof. Chantal Kwizera (FABI-Université du Burundi)**

37. Proposer des dispositifs de LAE qui contribuent à l'amélioration des paramètres de croissance et partant de rendement des plantes (hauteur, surface foliaire, circonférence de la plante).
38. Etendre les recherches (dispositifs) sur d'autres régions agro écologiques du Burundi.

## Thème 10

### **Dispositifs expérimentaux de lutte contre l'érosion hydrique de Gashikanwa (Buyenzi) et Matongo (Mugamba) : Pertes physico-chimiques dans les sédiments et les eaux de ruissellement. Par Prof. Salvator Kaboneka (FABI-Université du Burundi)**

39. Réduire les pertes en terre d'au moins 70% surtout sur les 4 mois de Mars et Avril, Octobre et Novembre qui sont les mois les plus pluvieux.
40. La recherche devrait axer ses actions sur la lutte contre les effets néfastes de l'Aluminium sur la qualité chimique du sol.
41. Penser ou ouvrir un débat sur la transformation d'un simple FAE en une fosse-compostière valorisable par la plantation du bananier, du Grevillea avec maracoudja installées dans les fossés (sur base des expériences observées dans le Kirimiro).
42. Faire des recherches sur la révision des formules de fertilisation des cultures surtout en ce qui concerne le K et les micronutriments, surtout le Potassium, enregistré à un niveau élevé dans les pertes en terre et les eaux de ruissellement débouchant à une déficience de la plupart des sols du Burundi en cet élément.

## Thème 11

### **Valorisation agronomique des résidus de récolte et de la biomasse agroforestière par co-compostage. Par Prof. Salvator Kaboneka (FABI-Université du Burundi)**

43. La recherche d'une autre essence arbustive en plus du Calliandra qui a aussi ses limites liées essentiellement à sa consommation par le bétail.
44. Valoriser les feuilles de Calliandra dans le co-compostage pour améliorer la qualité du compost.

## Thème 12

### **Perception et adoption des pratiques de la LAE au Burundi : Etudes de cas comparées menées en communes Gashikanwa, Matongo, Mabanda et Vugizo. Par Ir Prudence Nsengiyumva (FABI-Université du Burundi)**

45. Les services techniques déconcentrés du MINEAGRIE devraient renforcer l'encadrement des Moniteurs Agricoles pour qu'à leur tour ils encadrent les populations en charge, particulièrement sur les bonnes pratiques de LAE.

## B. Recommandations générales

1. Les partenaires au développement sont invités à faire leurs planifications en tenant compte des orientations du PND révisé, la stratégie nationale de la coopération au développement et la vision du Burundi émergent 2040 et Burundi développé 2060.
2. Appliquer les différents textes législatifs existants (code de l'eau, code de l'environnement, etc.).
3. Renforcer la collaboration des institutions œuvrant en matière agricole et environnementale avec les chercheurs.
4. Instaurer des cadres d'échange et d'implication des exploitants agricoles (niveaux province et commune) dans la mise en application des innovations générées par les recherches actuelles et à venir afin de les rendre opérationnelles et pérennes.
5. Faire des recherches sur les aptitudes du palmier à huile dans la réduction de l'érosion à l'instar du bananier.
6. Intégrer les changements climatiques parmi les défis majeurs de la dégradation des sols.
7. Compte tenu de l'importance de la problématique de l'érosion, de tels cadres d'échange devraient avoir lieu de manière plus régulière.
8. Un défi important relève de la faible disponibilité de données statistiques qui restent déficitaires. D'autres informations sont disponibles comme les cartes de fertilité des sols, cartes pédologique, d'occupation des sols, .... Elle devraient être davantage valorisées afin de renforcer l'état des lieux et la priorisation des actions.

**Fait à Bujumbura, le 25/01/2024**

**L'Equipe du Secrétariat**

Soter Ndiokubwayo (FABI/UB)

Zacharie Nzohabonayo (IFDC/PAGRIS)

Pierre Sindyikengera (MINEAGRIE)