

Mémoire

Auteur : Delbecq, Victoria

Promoteur(s) : Hubert, Aurelia; 28777

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23885>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Faculté des sciences
Département de géographie

**Dynamique des rivières alimentant les lacs Kivu et
Tanganyika : influence des facteurs
géomorphologiques et anthropiques au cours des 70
dernières années**

Mémoire présenté par : **Victoria Delbecq**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,
orientation global change, à finalité approfondie**

Année académique :

2024-2025

Date de défense :

Septembre 2025

Président de jury :

Pr. Xavier FETTWEIS

Promoteurs :

Dr. Antoine DILLE (RMCA)

Pr. Aurélia HUBERT

Jury de lecture :

Pr. Geoffrey HOUBRECHTS

Pr. Pierre OZER

Remerciements

Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute la gratitude que je ressens aujourd'hui. Ce travail est l'aboutissement d'un parcours jalonné de doutes, d'efforts, mais surtout de belles rencontres et de soutiens inestimables.

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs pour leur encadrement, leurs conseils et leur disponibilité tout au long de ce travail, mais surtout pour leur écoute. Je n'ai jamais eu l'impression qu'on m'imposait un choix : au contraire, j'ai toujours été entendue, conseillée, et guidée avec respect. De part cet accompagnement bienveillant, j'ai pu mener un travail plus que pertinent, tout en grandissant autant sur le plan académique que personnel.

À mes parents, à mes proches, à mon compagnon, vous qui avez toujours cru en moi. Merci pour votre amour inconditionnel, vos encouragements, votre patience et votre soutien. Votre présence a été ma plus grande force.

Enfin, une pensée particulière à ces êtres chers qui ne sont plus là. Ce travail accompli, j'espère, vous rend fiers.

Résumé

Ce mémoire analyse l'évolution des dynamiques fluviales et sédimentaires dans les bassins versants alimentant les lacs Kivu et Tanganyika au cours des 70 dernières années. L'approche repose sur l'exploitation d'orthomosaïques historiques (1957-1959, 1973-1974), d'images satellites récentes et d'indicateurs morphométriques issus de modèles numériques de terrain. L'étude met en évidence des changements marqués de sinuosité, l'apparition et l'évolution de deltas, ainsi que l'impact croissant des pressions anthropiques (déforestation, urbanisation, agriculture). L'analyse statistique et le regroupement des bassins (clustering) permet de distinguer des trajectoires contrastées entre les rives est et ouest, liées à la fois au relief, aux instabilités de versant et aux usages du sol. Ces résultats soulignent l'importance des interactions entre facteurs naturels et anthropiques dans un contexte tropical fragile et densément peuplé, ainsi que la variabilité régionale des réponses fluviales.

Abstract

This thesis analyzes the evolution of fluvial and sedimentary dynamics in the watersheds feeding Lakes Kivu and Tanganyika over the past 70 years. The approach relies on the use of historical orthomosaics (1957-1959, 1973-1974), recent satellite imagery, and morphometric indicators derived from digital elevation models. The study highlights marked changes in river sinuosity, the emergence and evolution of deltas, as well as the growing impact of anthropogenic pressures (deforestation, urbanization, agriculture). Statistical analysis and watershed clustering reveal contrasting trajectories between the eastern and western shores, influenced by relief, slope instabilities, and land use. These results emphasize the importance of interactions between natural and human factors in a fragile and densely populated tropical context, as well as the regional variability of fluvial responses.

Table des matières

LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX.....	9
LISTE DES ABRÉVIATIONS	10
1. INTRODUCTION	11
2. ÉTAT DE L'ART	12
2.1. DYNAMIQUES FLUVIALES ET SÉDIMENTAIRES : PROCESSUS NATURELS ET ANTHROPIQUES.....	12
2.1.1. <i>Principes généraux des dynamiques fluviales et sédimentaires</i>	12
2.1.2. <i>Dynamiques au sein des régions tropicales</i>	13
2.2. ÉTUDES DE CAS DANS LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE	14
2.3. OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE	17
3. ZONE D'ÉTUDE.....	19
3.1. DESCRIPTIF DE LA ZONE D'ÉTUDE	19
3.1.1. <i>Tectonique et géologie</i>	19
3.1.2. <i>Topographie</i>	22
3.1.3. <i>Climat</i>	23
3.1.4. <i>Contexte démographique et socio-économique</i>	23
3.1.5. <i>Dynamiques hydrologiques</i>	25
3.2. PRESSIONS ANTHROPIQUES ET INSTABILITÉS DE TERRAIN	26
4. DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE.....	28
4.1. DONNÉES MOBILISÉES POUR L'IDENTIFICATION DES DYNAMIQUES FLUVIALES	28
4.2. PREMIÈRE ÉTAPE : ANALYSE DES ORTHOMOSAÏQUES.....	30
4.2.1. <i>Méthode d'analyse par grille</i>	31
4.2.2. <i>Typologie</i>	33
4.2.3. <i>Exemples des observations réalisées</i>	38
4.3. DEUXIÈME ÉTAPE : TRAITEMENT DES OBSERVATIONS ET CALCUL DES PARAMÈTRES	45
4.3.1. <i>Délimitation des bassins versants</i>	46
4.3.2. <i>Calcul des indicateurs et paramètres morphométriques</i>	48
4.3.2.1. <i>Aspect linéaire</i>	48
4.3.2.2. <i>Aspect relief</i>	49
4.3.2.3. <i>Aspect surfacique</i>	51
4.3.2.4. <i>Aspect hydro-sédimentaire</i>	52
4.3.3. <i>Facteurs environnementaux et anthropiques associés aux bassins versants</i>	54
4.4. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES OBTENUE	57

4.5. ANALYSE DE LA CONTRIBUTION RESPECTIVE DES FACTEURS ANTHROPIQUES ET NATURELS À L'ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU VIA MODÉLISATION.....	58
5. RÉSULTATS.....	60
5.1. INVENTAIRE DES ÉLÉMENTS OBSERVÉS ET QUANTIFICATION PAR TYPE	60
5.1.1. Bassins versants.....	60
5.1.2. Rivières.....	62
5.1.3. Deltas.....	63
5.1.4. Barrages.....	63
5.2. RÉSULTATS DES ANALYSES PAR MODÉLISATION	65
5.2.1. Analyse exploratoire des facteurs liés aux dynamiques fluviales.....	65
5.2.2. Facteurs explicatifs des dynamiques fluviales.....	66
5.2.3. Analyse par hiérarchie des réseaux hydrographiques.....	71
5.2.4. Analyse par clustering de bassins versants.....	74
5.2.5. Synthèse des facteurs explicatifs majeurs.....	77
5.3. ÉTUDE APPROFONDIE DES CLUSTERS 5 ET 9.....	81
5.3.1. Distribution des bassins versants regroupés dans les clusters 5 et 9.....	81
5.3.2. Analyse comparative des facteurs par cluster.....	82
6. DISCUSSION	86
6.1. INTERPRÉTATION ET APPORTS DE L'ÉTUDE À LA COMPRÉHENSION DES PROCESSUS.....	86
6.2. PERTINENCE DE LA MÉTHODOLOGIE ET DE L'INVENTAIRE RÉALISÉ	88
6.3. LIMITES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....	89
7. CONCLUSION	92
8. BIBLIOGRAPHIE.....	93
9. ANNEXES.....	98
Annexe 1 : Données géologiques et lithologiques.....	98
Annexe 2 : Synthèse de la typologie et méthodologie d'analyse	98
Annexe 3 : Corrélations exploratoires	99
Annexe 3 a : Variables géomorphologiques et dynamiques fluviales	99
Annexe 3 b : Occupation du sol et caractéristiques fluviales	99
Annexe 4 : Multicolinéarité entre variables explicatives.....	100
Annexe 5 : Évolution des deltas au cours du temps.....	101
Annexe 6 : Répartition spatiale des variations de sinuosité des cours d'eau	102
Annexe 7 : Scripts Python.....	103

Liste des figures

Figure 1 : Structures tectoniques actives dans la région des lacs Kivu et Tanganyika (failles actives en rouge, épaules du rift en pointillés bruns, d'après Depicker et al. (2021b)).....	20
Figure 2 : Répartition des principales unités géologiques de la zone d'étude, réalisées à partir des données de Depicker et al. (2021b)	21
Figure 3 : Topographie de la région des lacs Kivu et Tanganyika (CDSE, 2021)	22
Figure 4 : Carte d'utilisation des sols dans la région des lacs Kivu et Tanganyika en 2021 (ESA, 2021)	24
Figure 5 : Bathymétrie et hydrographie des lacs Kivu et Tanganyika (Cazenave-Piarrot et al., 2015 ; modifiée).....	26
Figure 6 : Schéma conceptuel des facteurs influençant la stabilité des versants (orange = déplacements de population ; bleu = attractivité ; rouge = pressions anthropiques ; vert = stabilisation) (Depicker et al., 2021a)	27
Figure 7 : Couverture spatiale des orthomosaïques (1957-1959 et 1973-1974) dans la région des lacs Kivu et Tanganyika	29
Figure 8 : Grilles d'analyse appliquées aux orthomosaïques de 1957-1959 dans région des lacs Kivu et Tanganyika, différenciées par pays : RDC (rouge), Rwanda (orange), Burundi (jaune)	31
Figure 9 : Grilles d'analyse appliquées aux orthomosaïques de 1973-1974 dans région des lacs Kivu et Tanganyika, différenciées par pays : Rwanda (orange), Burundi (jaune)	32
Figure 10 : Schéma du processus de traitement morphométrique appliqué aux bassins versants (aspects linéaires, topographiques, hydro-sédimentaires et facteurs environnementaux/anthropiques).....	45
Figure 11: Bassins versants et réseau hydrographique des lacs Kivu et Tanganyika. Les bassins (orange) sont délimités à partir du DEM. Le réseau est classé selon l'ordre de Strahler, du plus faible (1-2, bleu clair) au plus élevé (4-5, bleu foncé).....	47
Figure 12 : Bassins versants des lacs Kivu et Tanganyika avec (beige foncé) ou sans observations (beige clair).....	61
Figure 13 : Localisation des deltas identifiés autour des lacs Kivu et Tanganyika aux périodes 1957-1959 (a), 1973-1974 (b) et 2018-2024 (c)	63
Figure 14 : Localisation des barrages identifiés au sein des bassins versants autour des lacs Kivu et Tanganyika.....	64

Figure 15 : Répartition des catégories de changement de sinuosité pour les périodes 1959-1974 (a), 1974-2020 (b) et 1959-2020 (c)	66
Figure 16 : Répartition spatiale des variations de sinuosité des cours d'eau (1959-1974, 1974-2020, 1959-2020) : diminution (rouge), stabilisation (jaune pâle), augmentation (vert foncé)	67
Figure 17 : Facteurs principaux explicatifs des changements de sinuosité (1959-1974) selon le modèle de Random Forest	68
Figure 18 : Facteurs principaux explicatifs des changements de sinuosité (1974-2020) selon le modèle de Random Forest	69
Figure 19 : Facteurs principaux explicatifs des changements de sinuosité (1959-2020) selon le modèle de Random Forest	70
Figure 20 : Distribution des cours d'eau selon l'ordre de Strahler	71
Figure 21 : Répartition des catégories de changement de sinuosité selon l'ordre des cours d'eau	72
Figure 22 : Évolution de la sinuosité moyenne des cours d'eau selon l'ordre de Strahler (1959, 1974, 2020), avec bandes de confiance illustrant la variabilité interbassins	73
Figure 23 : Variabilité de la sinuosité (a) et du taux d'apparition des deltas (b) selon les clusters de bassins versants (1974-2020)	75
Figure 24 : Répartition spatiale des clusters de bassins versants. Chaque couleur correspond à un groupe aux caractéristiques similaires	76
Figure 25 : Principaux facteurs de sinuosité par ordre de Strahler (six variables les plus influentes issues du modèle Random Forest).....	78
Figure 26 : Facteurs principaux de la sinuosité actuelle et de l'apparition de deltas (six variables les plus influentes selon le modèle Random Forest).....	79
Figure 27 : Répartition des bassins des clusters 5 et 9 entre les rives est et ouest des lacs	81
Figure 28 : Distribution des surfaces des bassins des clusters 5 et 9	82
Figure 29 : Comparaison des facteurs normalisés du cluster 5 selon la localisation est (bleu) ou ouest (orange).....	83
Figure 30 : Comparaison des facteurs normalisés du cluster 9 selon la localisation est (bleu) ou ouest (orange).....	85

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des données utilisées pour l'analyse des dynamiques fluviales (RMCA : Royal Museum for Central Africa).....	30
Tableau 2 : Grille de classification des types de chenaux, adaptée de Bierman et Montgomery (2014a). Chaque catégorie est associée à un code numérique afin de faciliter l'analyse spatiale	34
Tableau 3 : Codage binaire de la présence (1) ou de l'absence (0) d'un delta ou d'un barrage dans chaque cellule d'analyse	35
Tableau 4 : Classification des types de couverture végétale observés, établie adaptée de Bibentyo et al. (2024)	35
Tableau 5 : Observations complémentaires relatives aux cours d'eau	36
Tableau 6 : Observations complémentaires relatives aux aménagements et activités humaines	36
Tableau 7 : Observations complémentaires relatives aux zones littorales.....	37
Tableau 8 : Observations complémentaires relatives aux instabilités de terrain	37
Tableau 9 : Indicateur signalant les cellules où l'observation était impossible en raison de la qualité insuffisante des orthomosaïques (nuages, distorsion, etc.)	37
Tableau 10 : Comparaison de la sinuosité des cours d'eau entre les orthophotos anciennes (1957-1959, 1973-1974) et les images récentes de Google Earth (2018-2024)	39
Tableau 11 : Exemples de construction de barrages, illustrés par la comparaison entre les orthomosaïques anciennes (1957-1959, 1973-1974) et les images récentes de Google Earth (2018-2024).....	41
Tableau 12 : Exemples d'évolution des deltas, illustrés par la comparaison entre les orthomosaïques anciennes (1957-1959, 1973-1974) et les images récentes de Google Earth (2018-2024).....	42
Tableau 13 : Exemples d'instabilités de terrain et de déforestation dans le nord-est de la RDC, illustrés par la comparaison entre les orthomosaïques anciennes (1957-1959) et les images récentes de Google Earth (2018-2024)	43
Tableau 14 : Exemples de nébulosité observée sur les orthomosaïques de 1957-1959.....	44
Tableau 15 : Classification des bassins versants d'après leur intégrale hypsométrique (Shekar & Mathew, 2022).....	51

Liste des abréviations

DEM : Digital Elevation Model

Ksn : Normalized Steepness Index

M23 : Mouvement du 23-mars

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NTK : Nord Tanganyika-Kivu

RDC : République Démocratique du Congo

RMCA : Royal Museum for Central Africa

SPI : Stream Power Index

TWI : Topographic Wetness Index

1. Introduction

Dans les régions tropicales, les cours d'eau participent activement à la transformation des paysages, en conditionnant à la fois la configuration du relief et les transferts sédimentaires. Ces systèmes fluviaux ont des dynamiques particulièrement sensibles : sous l'effet combiné des conditions climatiques, de la topographie et des pressions anthropiques croissantes, les cours d'eau tropicaux connaissent des évolutions rapides et de façon parfois imprévisible.

Le rift Nord Tanganyika-Kivu (NTK) - segment nord du Rift Albertin, situé entre la partie nord du lac Tanganyika et le bassin du lac Kivu, et traversant le Rwanda, le Burundi et l'est de la République Démocratique du Congo (RDC) - illustre bien cette situation. Cette zone se caractérise par un relief abrupt, une instabilité fréquente des versants et une densité de population croissante, ce qui accentue les pressions sur ce milieu. Ces conditions favorisent des processus érosifs importants et modifient directement l'organisation des réseaux hydrographiques. Pourtant, la dynamique des rivières appartenant au rift NTK reste encore peu étudiée, en particulier sur le long terme.

Ce mémoire vise à analyser les changements hydrodynamiques observés dans les bassins versants du NTK et d'en identifier les causes. L'approche repose sur l'utilisation combinée d'orthomosaïques historiques, d'images satellites récentes et d'indicateurs morphométriques issus de modèles numériques de terrain. L'objectif est de comprendre comment le relief, l'hydrologie et les usages du sol interagissent au fil du temps et influencent les dynamiques fluviales en contexte tropical.

Ce travail s'organise de la manière suivante : la première partie présente le contexte scientifique et géographique de l'étude, suivie d'une section méthodologique. Les résultats sont ensuite présentés, avant une discussion consacrée aux dynamiques identifiées, à la pertinence de l'approche et aux perspectives de recherche.

2. État de l'art

2.1. Dynamiques fluviales et sédimentaires : processus naturels et anthropiques

2.1.1. Principes généraux des dynamiques fluviales et sédimentaires

Le fonctionnement des systèmes fluviaux repose sur un équilibre entre les flux sédimentaires, les processus hydrodynamiques et les caractéristiques morphométriques des bassins versants (Stive *et al.*, 2009). Des paramètres tels que la taille, la forme, la pente ou encore la densité du réseau hydrographique des bassins influencent directement l'écoulement, l'érosion, le transport de sédiments et la connectivité amont-aval (Faisal & Hayakawa, 2023 ; Harsha *et al.*, 2020 ; Shekar & Mathew, 2022, 2024). L'ensemble de ces paramètres façonne l'organisation de ces systèmes et conditionne l'évolution du réseau hydrographique (Bierman & Montgomery, 2014a).

Dans cette continuité, le transport sédimentaire participe à la connectivité entre les bassins versants et les milieux fluviaux ou lacustres, renforçant la résilience des zones humides et deltaïques (Hou *et al.*, 2024 ; Nienhuis *et al.*, 2020). Les deltas, formés lorsque les apports sédimentaires dépassent la capacité de redistribution des courants littoraux ou marins, sont des témoins directs des dynamiques terrestres. Leur évolution reflète souvent les effets cumulatifs des transformations d'usage des sols, des aménagements hydrauliques ou encore de déstabilisations de versants (Bierman & Montgomery, 2014b). Ces pressions perturbent l'équilibre sédimentaire des cours d'eau, modifient les régimes d'écoulement et peuvent provoquer un recul des zones côtières, en particulier des systèmes deltaïques (Hou *et al.*, 2024 ; Nienhuis *et al.*, 2020).

À l'échelle mondiale, cette tendance est renforcée : plus de 70% des changements hydrologiques observés seraient liés à des pressions humaines (Yanites *et al.*, 2025). La densification urbaine, en particulier sur les versants, apparaît comme un des perturbateurs majeurs de la stabilité des bassins versants (Bierman & Montgomery, 2014a ; Nsabimana *et al.*, 2023). Les barrages, quant à eux, ralentissent la migration latérale des cours d'eau et créent un déficit sédimentaire par piégeage (Bierman & Montgomery, 2014a ; Greenberg *et al.*, 2024).

La diminution du flux de sédiments depuis le milieu du XX^e siècle est, d'ailleurs, principalement attribuée à leur construction (Dethier *et al.*, 2022).

Cependant, comme l'indiquent Hou *et al.* (2024), les dynamiques des espaces côtiers ne suivent pas toujours une tendance uniforme au recul. Leur évolution dépend d'interactions multiples, propres à chaque contexte.

Dans les régions tropicales, cet équilibre hydro-sédimentaire est souvent plus fragile en raison de conditions naturelles et de pression humaines importantes (Depicker *et al.*, 2021b).

2.1.2. Dynamiques au sein des régions tropicales

Les milieux tropicaux, caractérisés par un climat chaud et humide, une forte saisonnalité des pluies et des réseaux hydrographiques complexes, sont particulièrement sensibles aux déséquilibres hydro-sédimentaires. Dans ces environnements, les pentes abruptes, les précipitations intenses et les pressions anthropiques (déforestation, agriculture intensive, urbanisation) amplifient directement les processus d'érosion, de ruissellement et d'instabilité de versants (Meadows & Thomas, 2009 ; Walsh & Blake, 2009).

Cette vulnérabilité s'accroît face à des tendances contrastées observées à l'échelle globale. Dans l'hémisphère Nord, la construction massive de barrages réduit fortement le flux sédimentaire, tandis que dans de nombreux bassins de l'hémisphère Sud, les cours d'eau enregistrent une hausse rapide de la charge en suspension. Cette augmentation est directement liée aux changements d'usage des terres, tels que l'exploitation minière alluviale ou encore l'extraction de sable en milieu fluvial (Dethier *et al.*, 2022). Ces pressions accentuent la fragilité des systèmes tropicaux.

Dans ce contexte, l'intensification des pratiques agricoles sur les versants et la disparition du couvert végétal favorisent une forte production de sédiments. Ceux-ci favorisent la formation de glissements de terrain et accélèrent le transfert de sédiments vers les chenaux, perturbant la morphologie des cours d'eau et augmentant la charge transportée (Meadows & Thomas, 2009 ; Walsh & Blake, 2009 ; Wohl *et al.*, 2012). L'étude de Lizaga *et al.* (2025) illustre bien cette dynamique dans un bassin versant situé au nord-ouest du lac Kivu : la monoculture de bananiers, associée à la déforestation, a fortement perturbé le réseau hydrographique. Ces facteurs ont entraîné une hausse de l'érosion, modifié les trajectoires de connectivité

sédimentaire et transformé la morphodynamique des chenaux lors d'épisodes de pluies intenses.

À cela s'ajoutent les effets du changement climatique, qui exacerbent ces processus. L'intensification des événements extrêmes, tels que les pluies intenses ou les sécheresses prolongées, fragilise davantage la stabilité des bassins. Ces événements provoquent l'élargissement de lits fluviaux, une augmentation des charges en suspension et une réorganisation des réseaux de drainage (Meadows & Thomas, 2009 ; Walsh & Blake, 2009).

Malgré ces constats, l'analyse fine de ces dynamiques reste souvent limitée par le manque de données et d'infrastructures scientifiques dans ces régions tropicales. Birkel *et al.* (2023) et Dewitte *et al.* (2021) soulignent cette faiblesse structurelle, tandis que Vanmaercke *et al.* (2015) insistent sur la nécessité de développer des études à plus petite échelle, adaptées aux spécificités locales, afin de mieux comprendre la variabilité des rendements sédimentaires et les réponses des systèmes tropicaux aux pressions combinées.

2.2. Études de cas dans la littérature scientifique

De nombreux travaux montrent que l'évolution du réseau hydrographique, tout comme la formation de deltas, résulte d'interactions complexes entre facteurs naturels et anthropiques. L'importance relative de ces facteurs varie cependant selon les contextes étudiés.

Au Rwanda, l'étude de Jolivet (2025) en est un bon exemple. En analysant l'avulsion de la rivière Nyabarongo vers le lac Rweru, il (Jolivet, 2025) montre comment les pressions humaines, essentiellement l'agriculture et la déforestation, ont influencé la trajectoire des cours d'eau et favorisé la formation d'un delta. Grâce à l'exploitation d'images historiques et satellites entre 1987 et 2021, Jolivet (2025) documente les déplacements de chenaux et les évolutions de la sinuosité. Ce travail permet de suivre l'évolution des dynamiques hydrologiques et sédimentaires dans le temps.

Dans un autre contexte, mais avec des conclusions similaires, Petropoulos *et al.* (2015) observent en Grèce que l'analyse combinée de données SIG et spatiales sur deux deltas met en évidence des zones d'aggradation et d'érosion. Ces changements sont directement liés aux aménagements hydrauliques et aux pratiques agricoles. Le delta apparaît ici comme un indicateur clair de l'influence humaine sur la production et la redistribution des sédiments.

Ces constats peuvent être rapportés à d'autres études centrées sur la morphologie fluviale. Au Bangladesh, Gazi *et al.* (2020) montrent que la construction d'ouvrages, l'extraction de matériaux et l'urbanisation ont modifié la trajectoire des rivières sur près de 50 ans. De leur côté, Huang *et al.* (2025) démontrent en Inde que les effets combinés de la déforestation et de l'irrigation ont profondément transformé l'hydrologie d'un bassin tropical, avec des effets visibles sur les débits, la connectivité et la stabilité des versants.

Ce type de dynamiques est également documenté en Afrique centrale. Masolele *et al.* (2024) soulignent que la déforestation accélérée des forêts modifie à la fois la structure des sols et le régime hydrologique. De même, Bibentyo *et al.* (2024), dans la plaine de la Ruzizi, associent les changements d'occupation du sol à une hausse des risques de glissements, d'inondations et d'érosion. Ces phénomènes modifient les volumes de sédiments mobilisés, les conditions d'écoulement et contribuent à déstabiliser le réseau hydrographique local. Leur étude (Bibentyo *et al.*, 2024), combinant observations satellitaires et modèles statistiques, permet d'identifier les zones les plus sensibles à ces déséquilibres.

Dans le rift NTK, les pressions anthropiques se combinent à des conditions naturelles déjà propices aux instabilités. Depicker *et al.* (2021a) montrent que la déforestation, en particulier sur des pentes raides souvent exploitées pour l'agriculture ou l'habitat, augmente fortement la susceptibilité aux glissements de terrain. En réduisant la couverture végétale, les activités altèrent la stabilité des versants, favorisent l'infiltration de l'eau et déclenchent des glissements peu profonds. Ces derniers mobilisent des volumes significatifs de sédiments qui, une fois transportés en aval, perturbent la dynamique fluviale. Le lien entre déforestation, instabilités de versants et réponse des systèmes fluviaux devient particulièrement clair.

À ces pressions s'ajoute la croissance urbaine. En RDC, Mawe *et al.* (2024) mettent en évidence l'impact de l'imperméabilisation des sols en contexte urbain. La formation et l'expansion des ravines sont liées à l'augmentation du ruissellement, favorisé par les surfaces artificielles (toitures, routes, parkings). Leur étude (Mawe *et al.*, 2024) rappelle que les environnements urbains cumulent de nombreux facteurs aggravants pour l'érosion, accentuant ainsi la vulnérabilité des versants, en lien direct avec les dynamiques fluviales.

Enfin, plusieurs études soulignent l'intérêt des photographies aériennes anciennes pour documenter l'évolution des paysages. Grâce à leur résolution et à leur recul temporel, ces archives permettent de reconstituer des dynamiques passées, en particulier dans les régions tropicales où les données sont rares (Depicker *et al.*, 2024 ; Dewitte *et al.*, 2021 ; Jolivet, 2025 ; Kubwimana *et al.*, 2021). Combinées à des images satellites récentes et à des observations de terrain, elles offrent un outil précieux pour suivre l'évolution des réseaux hydrographiques, détecter les zones de fragilité, et observer les effets cumulés des pressions humaines. Dans la région Nord Tanganyika-Kivu, Dewitte *et al.* (2021) montrent ainsi que ces pressions anthropiques s'ajoutent à des contraintes naturelles fortes (pluviométrie, sismicité, altération des sols), accentuant les déséquilibres fluviaux.

Ces observations rejoignent celles de Samyn (2024), qui a comparé des images anciennes du Burundi (1973-1974) à des images satellitaires, et a mis en évidence plusieurs modifications du tracé des chenaux et des dépôts sédimentaires. Bien que ce travail n'ait pas constitué une analyse approfondie, il suggère l'existence de dynamiques fluviales peu étudiées dans la région, et renforce l'intérêt d'un examen plus systématique à l'échelle des bassins versants.

2.3. Objectifs et questions de recherche

Samyn (2024) a montré que le rift NTK présente des dynamiques fluviales marquées, mais encore peu étudiées. Ce constat, renforcé par de nombreux travaux soulignant l'impact des pressions anthropiques sur les systèmes fluviaux tropicaux, met en évidence plusieurs lacunes dans la littérature. D'une part, la variabilité spatiale des réponses fluviales aux perturbations est souvent analysée à l'échelle d'un bassin versant, rarement à celle d'un ensemble de bassins. D'autre part, peu d'études croisent l'évolution morphologique des cours d'eau, leurs caractéristiques morphométriques et les pressions humaines, alors même que le rift NTK y est particulièrement exposé.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire. L'objectif est de documenter et analyser les dynamiques fluviales et sédimentaires observées depuis les années 1950, en croisant données historiques, imagerie satellitaire et paramètres morphométriques. Il s'agit d'identifier les principales dynamiques (modification de sinuosité, aggradation, apparition de deltas), de comprendre comment elles transforment les réseaux hydrographiques et de déterminer les facteurs, naturels ou anthropiques, qui expliquent les différences entre bassins.

En explorant ces processus dans une région encore peu étudiée, ce travail propose une approche croisée, inspirée de recherches menées dans d'autres contextes, mais adaptée aux spécificités des régions tropicales. L'objectif est d'apporter une meilleure compréhension des dynamiques fluviales propres aux bassins du rift NTK.

Afin de structurer au mieux ce travail, la démarche adoptée s'organise autour de deux axes de recherches principaux.

Le premier vise à construire une base d'observation solide malgré le manque de données disponibles :

Comment concevoir et valider une chaîne de traitement capable d'intégrer et d'exploiter des archives hétérogènes (photos aériennes, imagerie satellite) pour analyser l'évolution des dynamiques fluviales dans le rift NTK entre 1950 et 2024 ?

Quels paramètres morphologiques, hydrologiques et anthropiques des bassins versants doivent être pris en compte dans la méthodologie ?

Le second axe concerne l'interprétation des transformations observées :

Quels rôles respectifs jouent les facteurs anthropiques (déforestation, urbanisation) et naturels (lithologie, relief, géomorphologie) dans l'évolution morphologique des cours d'eau du rift NTK au cours des 70 dernières années ?

Comment les trajectoires fluviales diffèrent-elles entre bassins versants du rift NTK soumis à des pressions environnementales et humaines contrastées ?

3. Zone d'étude

La zone étudiée se situe en Afrique équatoriale. Elle englobe l'est de la RDC ainsi que l'ouest du Rwanda et du Burundi. Plus précisément, cette étude se focalise sur une série de bassins versants du lac Kivu et du nord du lac Tanganyika.

Cette section décrit le cadre physique et humain de la zone d'étude, en présentant successivement le contexte tectonique et géologique, la topographie, le climat, les tendances démographiques et socio-économiques, ainsi qu'un aperçu des principales dynamiques hydrologiques. Elle se conclut par la présentation des pressions anthropiques et de leur rôle dans les instabilités de terrain.

3.1. Descriptif de la zone d'étude

3.1.1. Tectonique et géologie

La région NTK est le résultat d'un rifting continental actif lié à la divergence des plaques Victoria et de Nubie à un rythme de 2 mm/an. Ce processus entraîne un volcanisme actif, un soulèvement régional et un recul en amont des knickpoints, contribuant au rajeunissement du paysage (Depicker *et al.*, 2021b).

Le rifting a débuté au Miocène moyen, entre 21 et 11 Ma, par un volcanisme fissural diffus. À partir d'environ 8 à 7 Ma, l'extension s'est progressivement localisée le long de grandes failles bordières. Le volcanisme a évolué vers un magmatisme alcalin, typique des zones de rift continental, produisant essentiellement des laves de type basaltiques alcalines jusqu'à 2,6 Ma (Delvaux *et al.*, 2017).

Au Quaternaire, la formation du massif volcanique des Virunga a profondément modifié le réseau de drainage régional. Cette modification a entraîné, il y a environ 12 ka, la réorientation des eaux du bassin du Kivu vers le lac Tanganyika via la rivière Ruzizi. Les failles néotectoniques observées aujourd'hui sont associées à ce rifting tardif. Toutefois, seules certaines d'entre elles restent actives. Cette tectonique s'accompagne d'une sismicité modérée à élevée, faisant du rift NTK une zone à risque sismique importante (Delvaux *et al.*, 2017). La Figure 1 présente les principales failles actives observées dans la région.

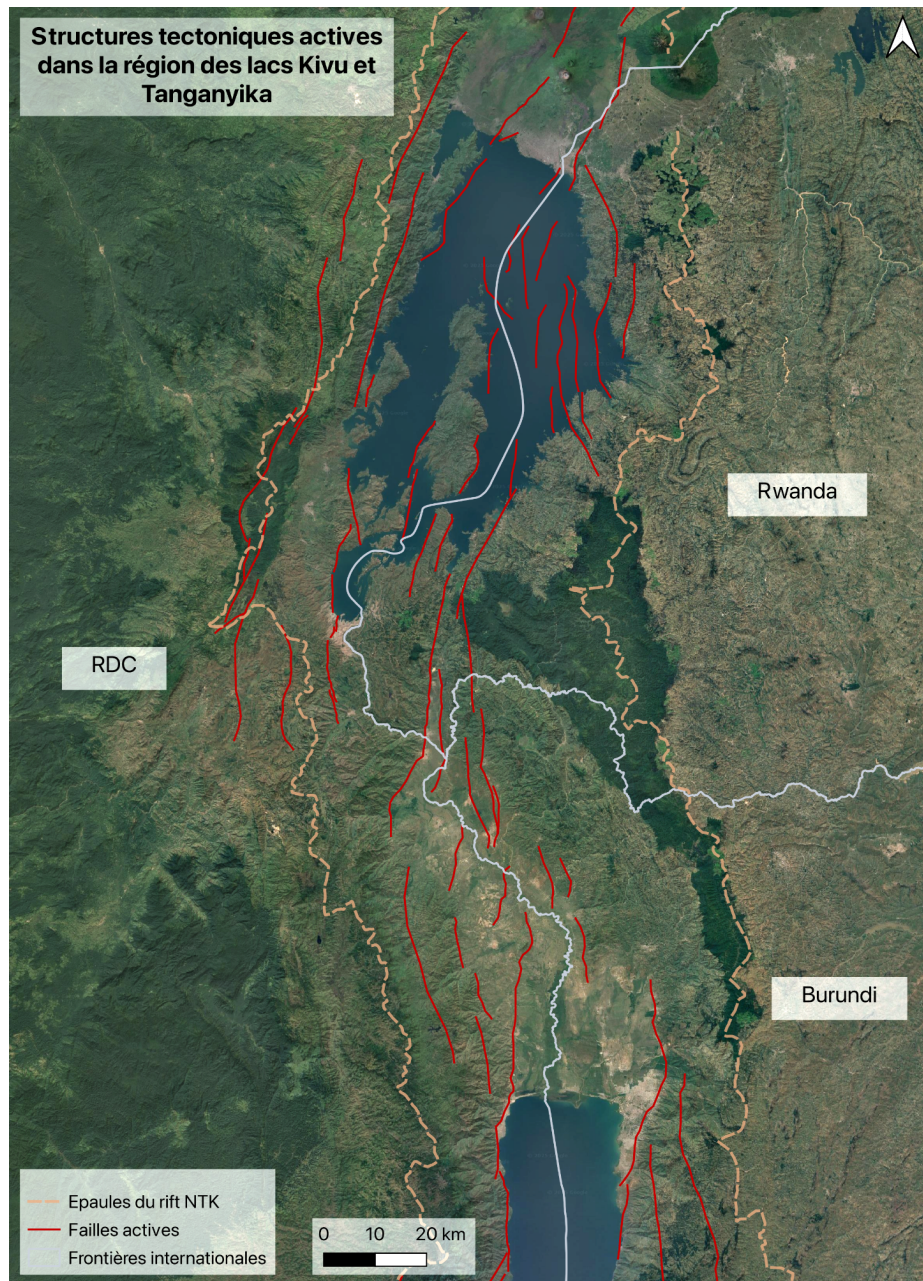


Figure 1 : Structures tectoniques actives dans la région des lacs Kivu et Tanganyika (failles actives en rouge, épaules du rift en pointillés bruns, d'après Depicker et al. (2021b))

La compréhension de ces dynamiques tectoniques nécessite également de prendre en compte la nature et la structure du socle sur lequel elles s'exercent.

La partie nord du rift est constituée de roches mésoprotérozoïques (1600 à 720 Ma), principalement des granites, des quartzites et des pélites. Les parties sud-ouest sont dominées par des roches d'âges paléoprotérozoïque (2500 à 1600 Ma), composées de quartzites, de gneiss et de micaschistes.

Sur les épaules du rift, la lithologie est similaire, mais inclut des formations plus récentes, telles que des sédiments fluviaux et lacustres, ainsi que des dépôts volcaniques datant de 12 Ma à aujourd'hui (Depicker *et al.*, 2021b). La Figure 2 illustre la répartition de ces formations géologiques dans notre zone d'étude (l'âge et les caractéristiques des unités lithologiques sont détaillées en *Annexe 1 : Données géologiques et lithologiques*).

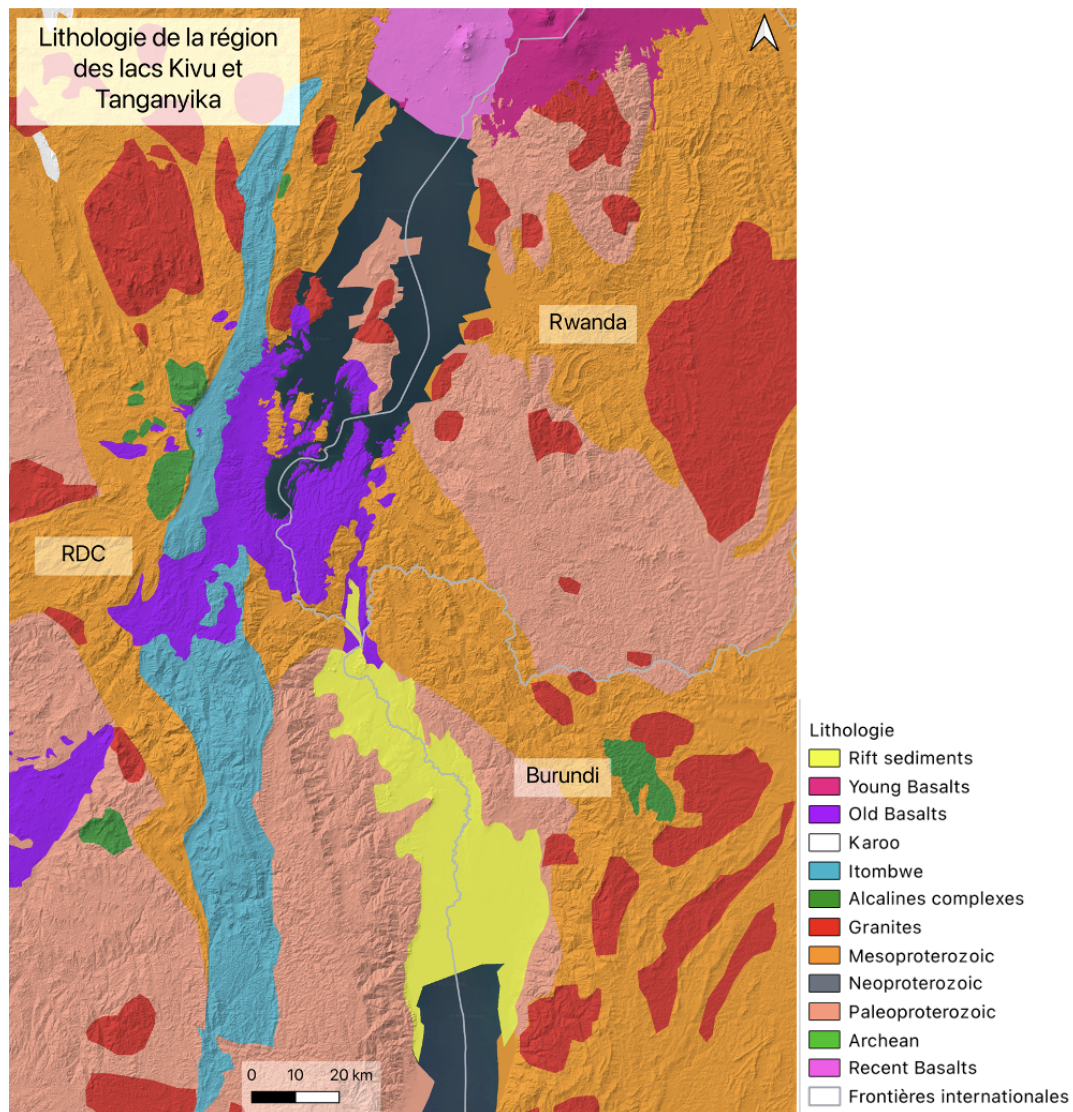


Figure 2 : Répartition des principales unités géologiques de la zone d'étude, réalisées à partir des données de Depicker *et al.* (2021b)

3.1.2. Topographie

L'analyse de la topographie met en évidence un contraste marqué entre les deux rives. À l'est, une plaine littorale s'étend autour du lac avant de laisser place à des reliefs plus élevés. En revanche, sur la rive ouest, les pentes montagneuses apparaissent plus près du rivage, marquant une transition topographique plus abrupte. L'altitude varie de 700 mètres à plus de 4000 mètres (Figure 3).

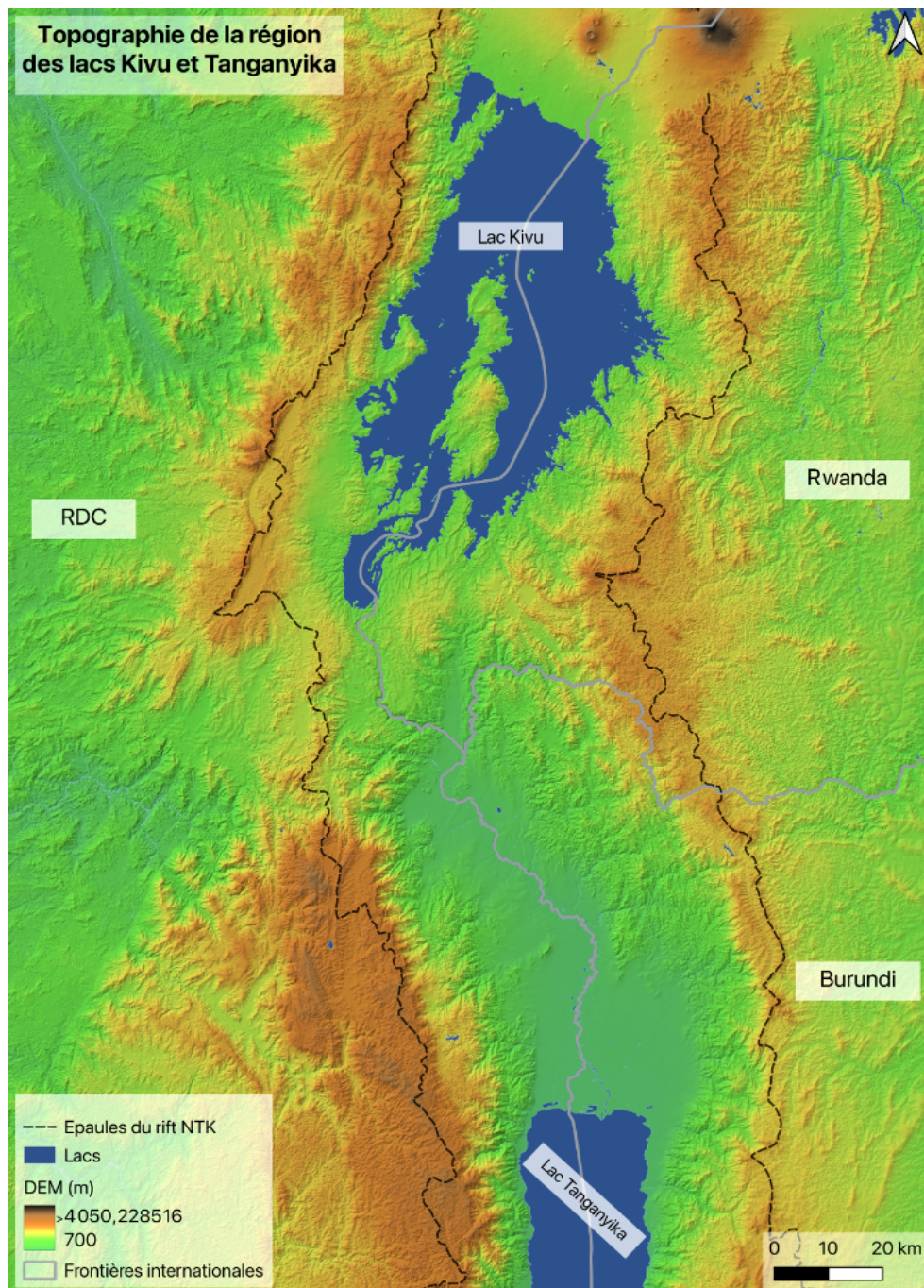


Figure 3 : Topographie de la région des lacs Kivu et Tanganyika (CDSE, 2021)

3.1.3. Climat

Le climat des rives des lacs Kivu et Tanganyika est de type tropical, mais ses caractéristiques varient fortement selon l'altitude (Peel *et al.*, 2007). Celle-ci contribue à modérer les températures et, par effet orographique, influence la répartition des précipitations. Les côtes est (Burundi et Rwanda) enregistrent en moyenne plus de 1500 mm de pluie par an, avec deux saisons humides principales (CIA, 2025a, 2025b), tandis que les côtes ouest (RDC) sont soumises à un régime marqué par une seule saison de pluies (CIA, 2025c).

3.1.4. Contexte démographique et socio-économique

En 2024, le Rwanda et le Burundi comptent chacun environ 13 millions d'habitants (INSBU, 2024 ; NISR, 2022 ; World Bank Group, 2025a, 2025b), tandis que la RDC atteint une population estimée à 110 millions (CIA, 2025c ; World Bank Group, 2025c).

Pour mieux cerner les dynamiques démographiques dans la zone d'étude, il est utile de considérer les données à une échelle plus locale. À l'ouest du Burundi, plus précisément dans la province de Bujumbura, près de 3 millions d'habitants sont recensés en 2024, avec les densités les plus élevées situées le long de la rive nord du lac Tanganyika (CIA, 2025a). La population se répartit entre 1,7 million d'habitants en zone urbaine et 1,5 million en zone rurale (INSBU, 2024). Côté rwandais, la province de l'Ouest compte environ 3 millions d'habitants en 2022, dont 77% en milieu rural. La densité est passée de 415 habitants/km² en 2012 à 503 habitants/km² en 2022 (NISR, 2022).

Dans l'est de la RDC, la province du Sud Kivu enregistre environ 5,5 millions d'habitants en 2022 (Enabel, 2023). La densité y a progressé de 89 habitants/km² en 2015 à 101 habitants/km² en 2020, avec des concentrations particulièrement élevées le long des rives ouest des lacs Kivu et Tanganyika (Enabel, 2023 ; UNDP, 2020).

D'un point de vue économique, ces trois pays comptent parmi les moins développés au niveau mondial et reposent principalement sur le secteur agricole. Au Burundi, environ 80% de la population active travaille dans ce secteur, avec 461 800 ménages agricoles à Bujumbura contre 2,3 millions à l'échelle nationale (CIA, 2025a ; INSBU, 2024 ; World Bank Group, 2025a). Au Rwanda, 60 à 70% de la population occupe également un emploi agricole (NISR, 2022 ; World Bank Group 2025b). Quant à la RDC, près de 80% des habitants dépendent de petites exploitations agricoles ou de l'élevage (Enabel, 2023).

La Figure 4 illustre l'utilisation des sols en 2021 dans la région des lacs Kivu et Tanganyika. Nous y observons une nette prédominance des terres agricoles (en rose), particulièrement au Rwanda, au Burundi, ainsi que dans le nord-est de la RDC. Les zones bâties (en rouge) se concentrent autour des principaux centres urbains tels que Bujumbura, Bukavu ou encore Goma. Les forêts (en vert foncé), encore bien représentées dans certaines zones montagneuses, notamment en RDC et au sud-ouest du Rwanda, apparaissent en revanche fragmentées sur le reste du territoire.

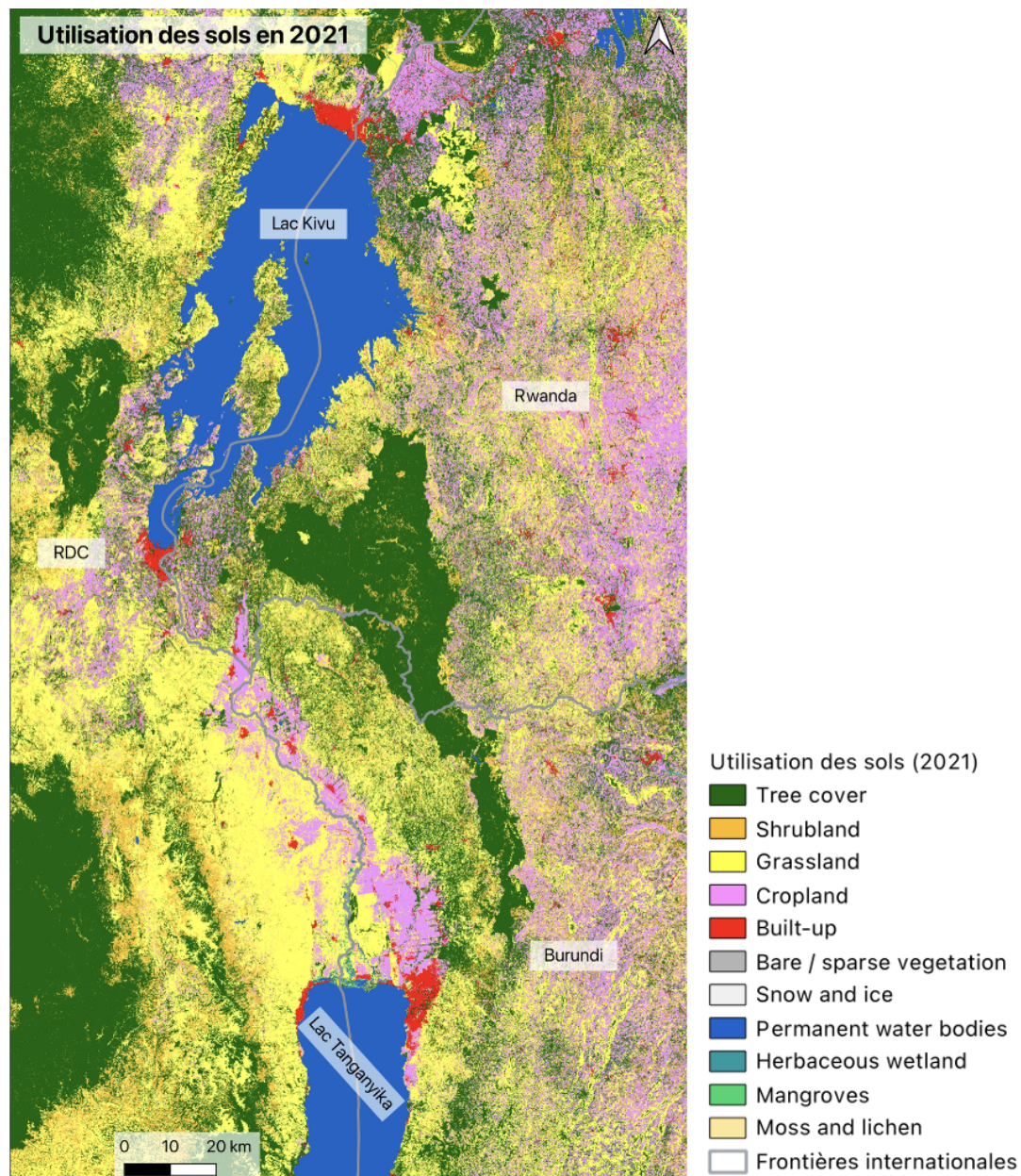


Figure 4 : Carte d'utilisation des sols dans la région des lacs Kivu et Tanganyika en 2021 (ESA, 2021)

Cette fragilité économique s'explique par un contexte politique instable, où des conflits répétés ont accentué ces vulnérabilités. Ces conflits sont nombreux : la guerre civile rwandaise (1990-1993), le génocide rwandais de 1994, la guerre civile burundaise (1993-2005) et les deux guerres du Congo (1996-1997, 1998-2003) (Depicker *et al.*, 2021a).

Ces conflits perturbent la production agricole : les saisons de culture sont interrompues, l'accès aux champs devient dangereux et de nombreux agriculteurs sont contraints de fuir (Enabel, 2023). Leur impact ne se limite pas au contexte économique : ils modifient également la localisation de la population. Ces conflits armés ont entraîné des déplacements massifs, accentuant la pression démographique sur des centres urbains déjà saturés en ressources et en infrastructures (Enabel, 2023). Par exemple, après le génocide de 1994, près de deux millions de réfugiés rwandais sont partis dans l'est de la RDC (CIA, 2025c ; Enabel, 2023).

Depuis 2021, la RDC est confrontée à des attaques menées par le groupe armé du Mouvement du 23-mars (M23), et qui se sont intensifiées depuis février 2025. Ces violences ont fait de nombreuses victimes, principalement parmi les agriculteurs, entraînant de lourdes conséquences économiques. Malgré la signature d'un cessez-le-feu, les affrontements se poursuivent, et l'insécurité croissante laisse présager la poursuite de déplacements de population (Le Monde, 2025 ; World Bank Group, 2025c).

Ces instabilités compromettent durablement les perspectives de développement et perpétuent la pauvreté dans ces régions.

3.1.5. Dynamiques hydrologiques

L'encadré de la Figure 5 illustre la connexion hydrologique entre le lac Kivu et le lac Tanganyika par la rivière Ruzizi, principal cours d'eau reliant les deux bassins. La bathymétrie met en évidence des profondeurs comprises entre 600 et 800 mètres pour ces lacs (Cazenave-Piarrot *et al.*, 2015).

Dans le cadre de cette étude, l'analyse portera plus particulièrement sur le réseau hydrographique local de la région, non représenté ici, mais essentiel pour comprendre les dynamiques hydrologiques et sédimentaires.

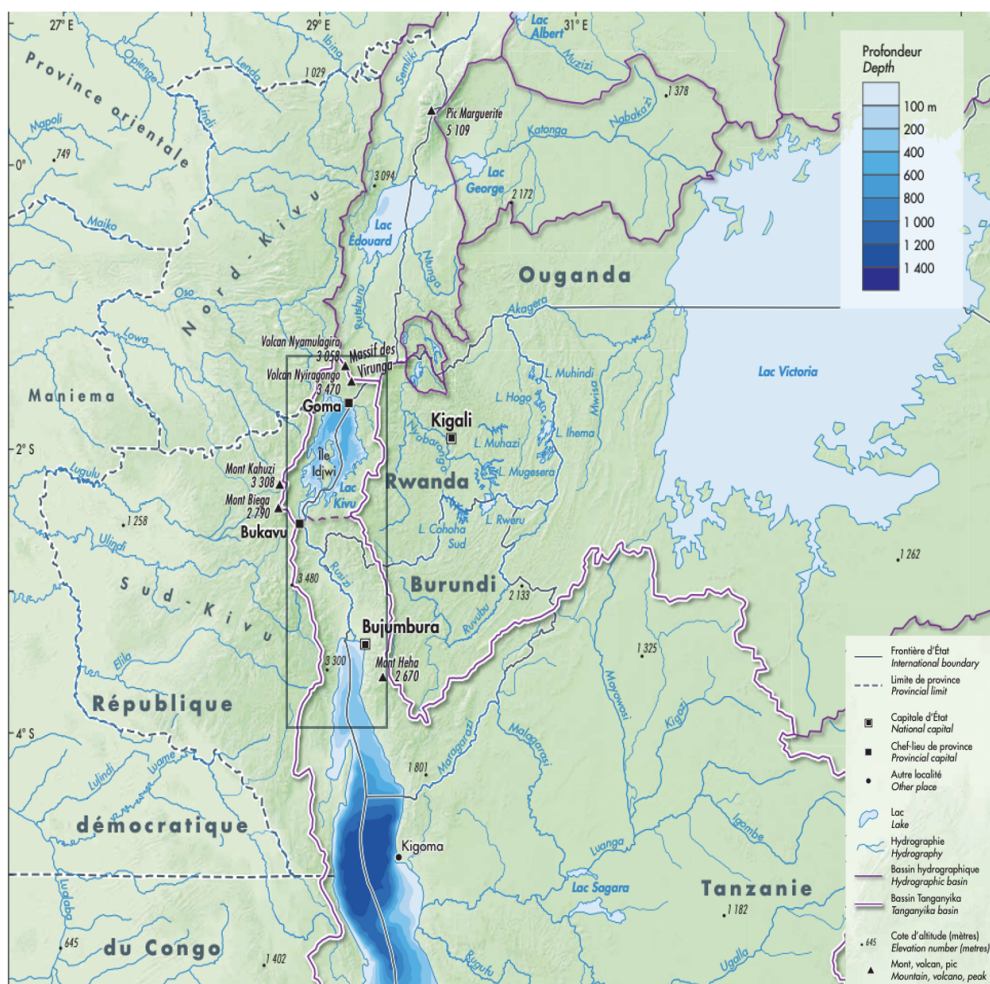


Figure 5 : Bathymétrie et hydrographie des lacs Kivu et Tanganyika (Cazenave-Piarrot *et al.*, 2015 ; modifiée)

3.2. Pressions anthropiques et instabilités de terrain

La région d'étude subit une forte pression anthropique, principalement liée à la densité démographique. Cette pression se traduit par une fragmentation marquée de la couverture terrestre et une fragilisation des paysages (Depicker *et al.*, 2021a, 2024).

Depicker *et al.* (2021a) montrent que la combinaison de pressions démographiques et de conflits a entraîné plusieurs phases de déforestation dans les bassins versants situés autour des lacs. Pour subvenir à leurs besoins, les populations défrichent afin de créer de nouvelles terres agricoles. Parallèlement, l'expansion des sites miniers et la construction d'infrastructures, telles que des routes, facilitent l'accès aux forêts et accélèrent leur exploitation. La combinaison de ces différents facteurs (migrations, concentration humaine et activité minière) provoque un recul rapide du couvert forestier (Depicker *et al.*, 2021a, 2024).

Depicker *et al.* (2024) soulignent également que cette déforestation accrue, associée aux aménagements humains et aux activités minières, accentue l'instabilité des versants. À titre d'exemple, au Burundi, la combinaison de surpâturage, de l'expansion agricole et de la déforestation intensive entraîne une forte érosion des sols (CIA, 2025a).

Ces instabilités renforcent la vulnérabilité aux glissements de terrain (Depicker *et al.*, 2021b). Ces glissements constituent à la fois un risque pour les populations locales et sont un facteur clé dans la modification des transferts sédimentaires et de la géomorphologie régionale.

La Figure 6 illustre de manière synthétique les principales pressions anthropiques qui contribuent à l'augmentation du risque de glissements de terrain dans la région du rift NTK.

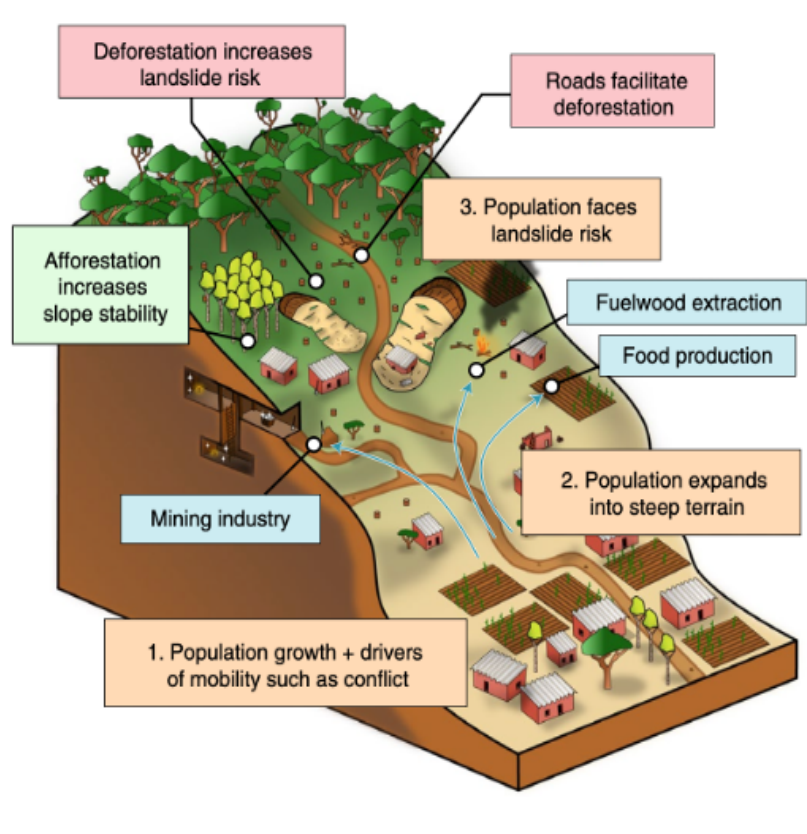


Figure 6 : Schéma conceptuel des facteurs influençant la stabilité des versants (orange = déplacements de population ; bleu = attractivité ; rouge = pressions anthropiques ; vert = stabilisation) (Depicker *et al.*, 2021a)

4. Données et méthodologie

Cette section présente d'abord les données aériennes et satellitaires utilisées pour l'analyse des dynamiques fluviales, puis décrit la méthodologie en deux étapes : (1) l'analyse des orthomosaïques et l'extraction des informations nécessaires à l'étude, (2) l'exploitation de ces données pour répondre aux questions de recherche.

4.1. Données mobilisées pour l'identification des dynamiques fluviales

Cette étude repose sur une analyse spatio-temporelle des dynamiques fluviales à partir d'images satellites récentes et d'orthomosaïques anciennes, construites à partir de photos aériennes historiques conservées au Musée royal de l'Afrique Centrale (RMCA).

Ces images, acquises lors de missions de survol entre 1957-1959 et 1973-1974, représentent une source unique de données pour étudier les changements environnementaux survenus au cours des 70 dernières années dans le rift NTK.

Les orthomosaïques ont été générées par traitement photogrammétrique (structure-from-motion photogrammetry) selon la méthodologie décrite par Depicker *et al.* (2021a), dans le cadre de travaux menés récemment au RMCA, avec une résolution spatiale d'environ 1,5 m.

La couverture géographique varie selon les pays (Figure 7). Les orthomosaïques des années 1950 apparaissent directement sur la carte (en noir et blanc), tandis que pour les années 1970 seules leurs délimitations ont été représentées (orange pour le Rwanda, jaune pour le Burundi), afin d'éviter de surcharger la Figure 7 :

- En RDC, quatre orthomosaïques des années 1950 couvrent principalement l'ouest du lac Kivu et le nord-ouest du lac Tanganyika. La couverture est incomplète, reflétant les différents survols ciblés de l'époque ;
- Au Rwanda, une couverture dense est disponible à l'ouest du pays pour les années 1950 et 1970, offrant une bonne visibilité sur les rives est du lac Kivu, avec peu de discontinuités ;

- Au Burundi, trois orthomosaïques des années 1950 couvrent largement le nord du lac Tanganyika. Toutefois, une bande littorale à hauteur de Bujumbura est absente, les images correspondantes ayant été probablement perdues. Une orthomosaïque plus générale des années 1970 recouvre l'ensemble de la côte, plus au sud.

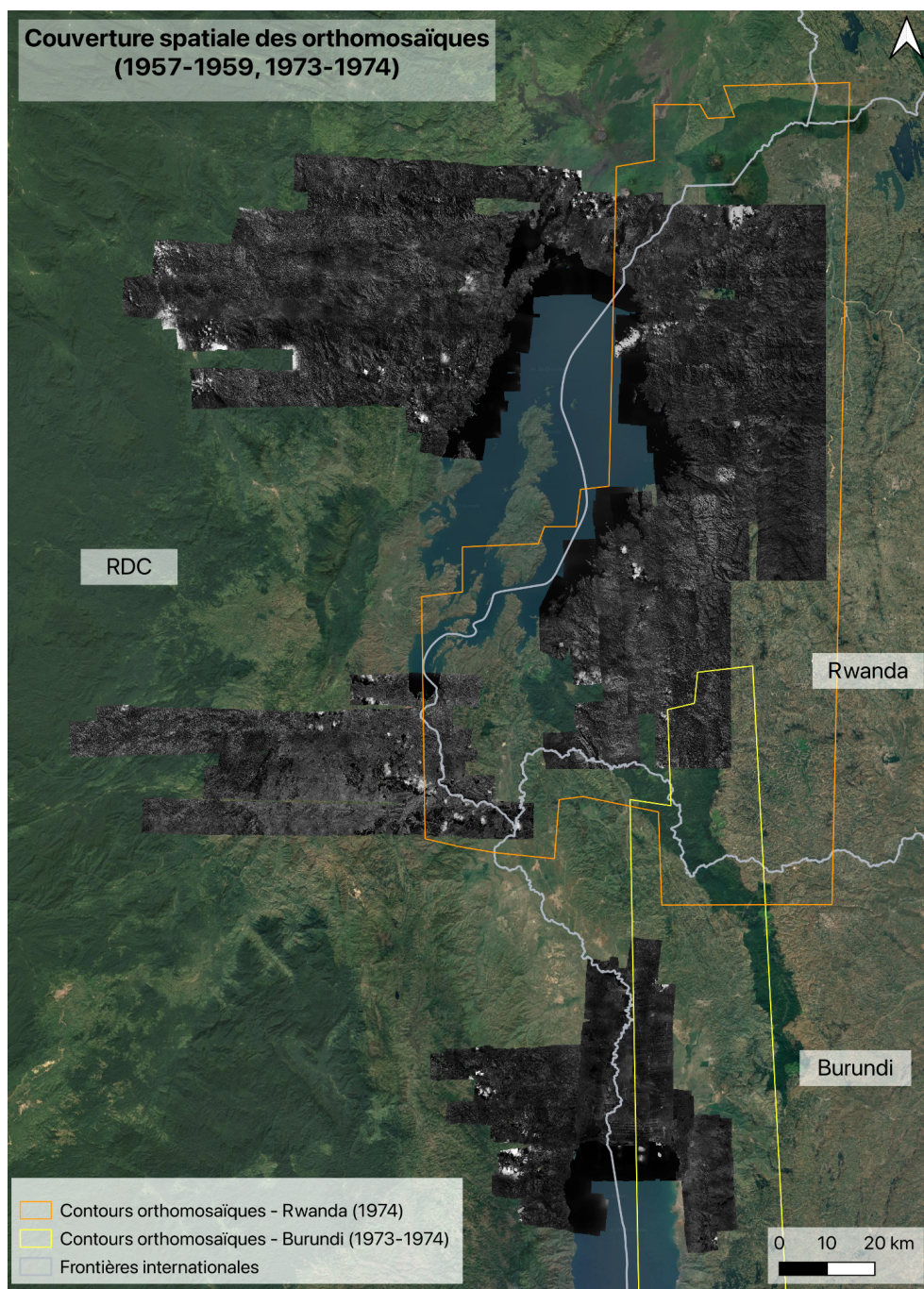


Figure 7 : Couverture spatiale des orthomosaïques (1957-1959 et 1973-1974) dans la région des lacs Kivu et Tanganyika

Les images satellites récentes utilisées proviennent de Google Earth, avec des dates d’acquisition variant de 2018 à 2024 selon les zones. Elles offrent une couverture spatiale complète de la zone d’étude à une résolution de 30 à 60 cm, permettant une lecture fine du paysage. De plus, étant récentes, ces images sont donc particulièrement adaptées pour établir des comparaisons temporelles avec les orthomosaïques historiques.

L’ensemble des données mobilisées pour mener notre analyse spatio-temporelle des évolutions paysagères dans les bassins versants des lacs Kivu et Tanganyika, ainsi que leurs caractéristiques, est synthétisé dans le Tableau 1 suivant :

Tableau 1 : Récapitulatif des données utilisées pour l’analyse des dynamiques fluviales (RMCA : Royal Museum for Central Africa)

Types de données	Années	Résolution	Source
Orthomosaïque du Burundi provenant d’images aériennes historiques	1957-1959, 1973-1974	~ 1 m	RMCA
Orthomosaïque du Rwanda provenant d’images aériennes historiques	1958, 1974	~ 1 m	RMCA
Orthomosaïque de la RDC provenant d’images aériennes historiques	1958, 1959	~ 1 m	RMCA
Images satellites	2018-2024	0.3 à 0.6 m	Google Earth

4.2. Première étape : analyse des orthomosaïques

Cette section est structurée en deux sous-parties. La première décrit la routine d’analyse mise en place, ainsi que la typologie utilisée pour classer les éléments du paysage de façon cohérente entre les différentes images. Cette classification permet de faciliter l’identification et la comparaison des dynamiques paysagères. La seconde sous-partie présente des exemples concrets d’observations effectuées sur les orthomosaïques.

4.2.1. Méthode d'analyse par grille

Afin d'assurer une analyse spatiale rigoureuse et homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, nous avons appliqué une grille de 10km x 10km, découpée selon l'emprise des orthomosaïques, en suivant l'approche proposée par Depicker *et al.* (2024). Cette méthode facilite la comparaison spatiale entre les périodes étudiées. Chaque cellule permet un examen systématique des images satellites et des photos aériennes.

La Figure 8 illustre la distribution de ces grilles pour la période 1957-1959.

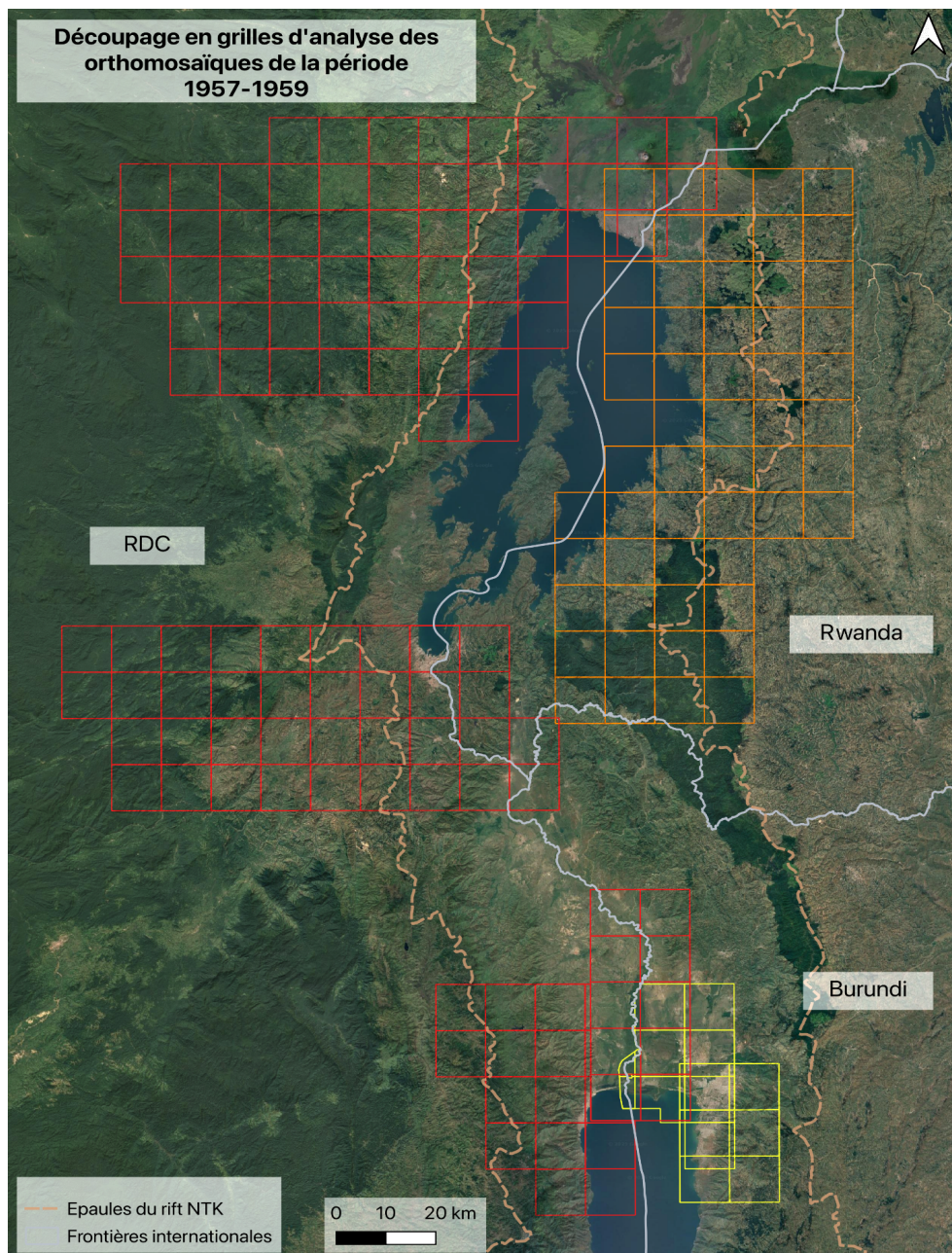


Figure 8 : Grilles d'analyse appliquées aux orthomosaïques de 1957-1959 dans région des lacs Kivu et Tanganyika, différenciées par pays : RDC (rouge), Rwanda (orange), Burundi (jaune)

La Figure 9 illustre la distribution spatiale des grilles d'analyse pour la période 1973-1974 :

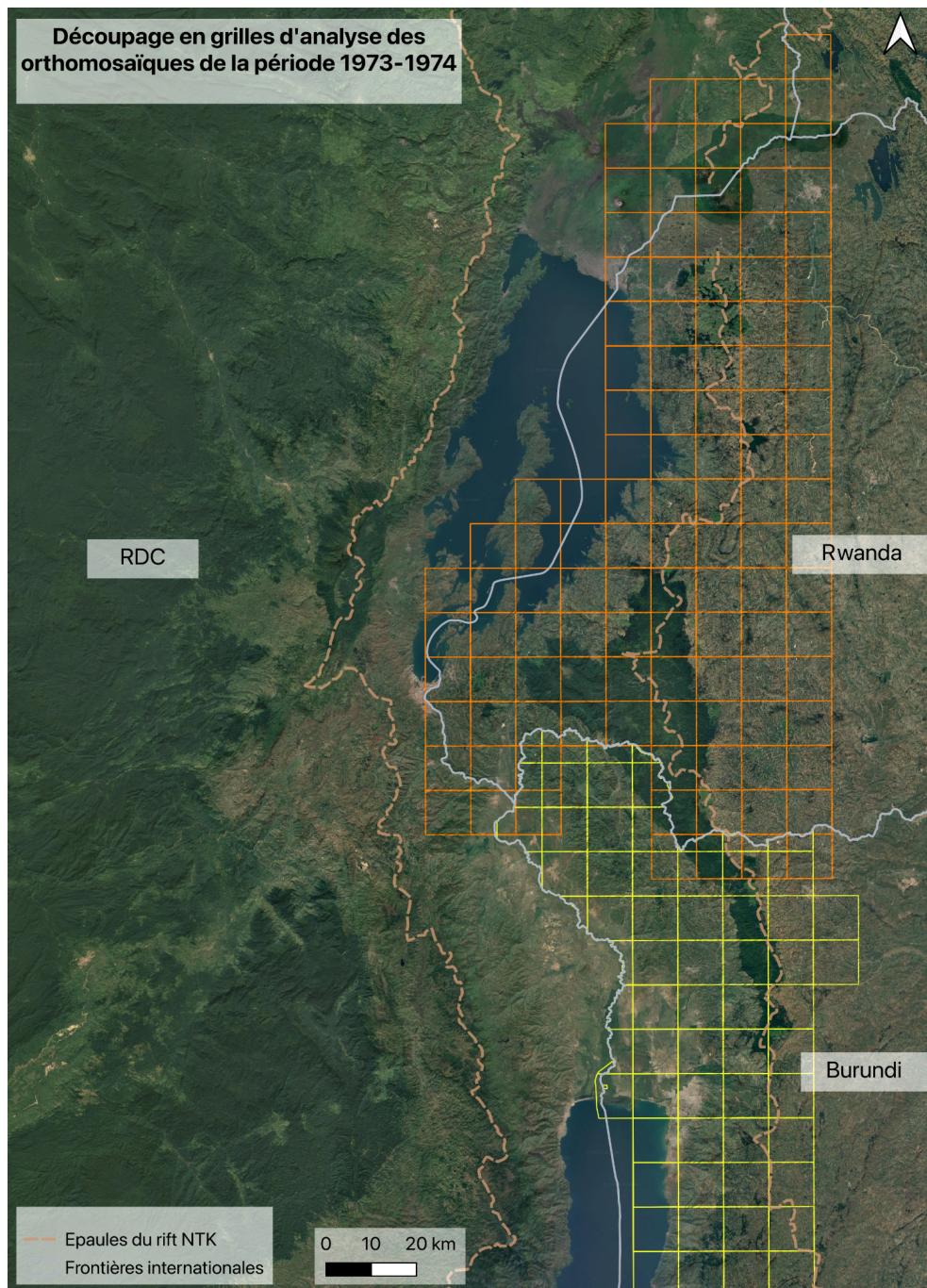


Figure 9 : Grilles d'analyse appliquées aux orthomosaïques de 1973-1974 dans région des lacs Kivu et Tanganyika, différenciées par pays : Rwanda (orange), Burundi (jaune)

Cette organisation spatiale a permis de garantir une méthode d'observation homogène pour chaque cellule des grilles d'analyse, indépendamment de la source d'imagerie (orthomosaïques ou images satellites).

Au total, un peu moins de 340 cellules ont été examinées individuellement. Chacune a fait l'objet d'une double analyse : d'abord sur les orthomosaïques anciennes, puis à partir des images satellites récentes. Ce protocole a donc doublé le nombre de traitements, tout en permettant une documentation détaillée des dynamiques hydrologiques et sédimentaires observées dans les épaules du rift NTK.

4.2.2. Typologie

Une fois les grilles établies, nous avons défini une typologie permettant d'identifier les éléments observés (cours d'eau, deltas, types d'occupation du sol, instabilités de terrain, pressions anthropiques) ainsi que les critères retenus pour les caractériser. Inspirée de la littérature sur les facteurs influençant la stabilité fluviale et la dynamique sédimentaire, cette typologie repose sur cinq critères principaux : la sinuosité des cours d'eau, la présence de delta, la présence de barrage, le type de végétation à proximité des cours d'eau et une catégorie dite "extra" regroupant les éléments non classés ailleurs.

Pour caractériser les dynamiques fluviales, nous avons utilisé la classification de Bierman et Montgomery (2014a), basée sur la sinuosité des chenaux. Elle distingue quatre catégories principales :

- Les chenaux droits (sinuosité < 1.3 , berges résistantes à l'érosion),
- Les chenaux sinueux (sinuosité > 1.5 , méandres marqués et érosion latérale active),
- Les chenaux tressés (bras multiples séparés par des bancs non végétalisés),
- Les chenaux anastomosés (réseau stable et végétalisé, faible érosion active).

Cette typologie constitue un indicateur majeur des dynamiques fluviales et sédimentaires au sein des bassins versants.

L'analyse s'est ensuite portée sur les facteurs influençant la stabilité des cours d'eau. La végétation joue ici un rôle clé : des berges bien végétalisées ralentissent la migration du lit, retiennent une partie des sédiments et limitent l'érosion latérale. L'apport sédimentaire, combiné à cette couverture végétale, conditionne ainsi la dynamique de migration des chenaux

et leur réponse aux pressions anthropiques (Bierman & Montgomery, 2014a ; Greenberg & Ganti, 2024). Pour l’analyse, la végétation a été classée selon sa proximité immédiate du cours d’eau, en se concentrant sur les premiers mètres de berge. Trois catégories, inspirées de Bibentyo *et al.* (2024), ont été retenues : forêts, terres cultivées et prairies.

Outre la végétation, les activités humaines impactent également la dynamique fluviale. Bierman et Montgomery (2014a) distinguent deux catégories :

- Les activités directes, comme la construction de digues et de barrages,
- Les activités indirectes, telles que la déforestation, l’expansion agricole ou encore l’urbanisation.

Enfin, il a fallu préciser la manière de coder ces observations.

La sinuosité a été notée sur une échelle de 1 à 4, correspondant aux classes de Bierman et Montgomery (2014a). Lorsque aucune rivière n’était visible dans une cellule, que ce soit sur les images aériennes ou satellites, la valeur 0 a été attribuée, traduisant une absence de cours d’eau. Dans certains cas, une rivière apparaissait sur les images satellites mais l’orthomosaïque correspondante était incomplète, empêchant toute confirmation de sa présence au moment de la prise de vue. Ces cas ont été codés par la valeur 6, utilisée comme “code erreur” pour signaler des données manquantes ou partielles.

Le Tableau 2 synthétise la classification mise en place :

Tableau 2 : Grille de classification des types de chenaux, adaptée de Bierman et Montgomery (2014a). Chaque catégorie est associée à un code numérique afin de faciliter l’analyse spatiale

Type de forme fluviale	Description simplifiée	Code attribué
Chenal droit	Sinuosité < 1.3	1
Chenal sinueux	Sinuosité > 1.5	2
Chenal tressé	Présence de bancs non végétalisés	3
Chenal anastomosé	Présence d’îles végétalisées	4
Aucune rivière	/	0
Non observable	Donnée manquante/incomplète des orthomosaïques	6

La présence de deltas ou de barrage a été codé de manière binaire : 1 indique la présence et 0 l'absence de ces éléments (Tableau 3).

Tableau 3 : Codage binaire de la présence (1) ou de l'absence (0) d'un delta ou d'un barrage dans chaque cellule d'analyse

Type d'éléments observés	Code attribué
Delta ou barrage présent	1
Delta ou barrage absent	0

Pour la végétation, nous nous sommes inspirés de la classification proposée par Bibentyo *et al.* (2024), en l'adaptant aux limites de distinction sur les orthomosaïques. Quatre catégories ont été retenues : forêt ; terres cultivées et prairies (regroupées dans une même classe) ; végétation non distinguée (pour les cas difficiles à identifier) ; et absence de végétation. Afin de faciliter l'encodage, chaque catégorie a été associée à une abréviation.

Le Tableau 4 présente la classification ainsi définie :

Tableau 4 : Classification des types de couverture végétale observés, établie adaptée de Bibentyo et al. (2024)

Catégories de végétation	Abréviation
Forêt	f
Terres cultivées et prairies	cp
Végétation	v
Aucune végétation	nv

La catégorie “extra” regroupe l’ensemble des éléments observés qui ne s’intègrent pas dans les autres classes. Chaque élément est codé par une abréviation et regroupé en quatre thématiques : cours d’eau, anthropisation, zones côtières et instabilités de terrain.

Le Tableau 5 présente les abréviations associées aux observations complémentaires liées aux cours d’eau :

Tableau 5 : Observations complémentaires relatives aux cours d'eau

Abréviation	Description
b	Blocs présents au fond du lit du cours d'eau
b/i	Bancs et/ou îles présents sur le cours d'eau
bv	Bancs et/ou îles végétalisés présents sur le cours d'eau
bg	Cours d'eau bloqué à la suite d'un glissement de terrain
dé	Dérivation du cours d'eau
l	Lac présent sur le cours de la rivière
o	Présence de oxbow lake
pb	La rivière se divise en plusieurs bras dans une même cellule de la grille
r	Recoupements de méandres
ra	Présence de rapides sur le cours de la rivière
rp	Nombreux affluents au cours principal
rui	Présence de nombreux axes de ruissellement identifiables qui alimentent le cours d'eau
s	Sédimentation importante au niveau des berges
t	Tendance par moment à des chenaux tressés

Le Tableau 6 regroupe les abréviations utilisées pour décrire les observations relatives aux aménagements et activités humaines :

Tableau 6 : Observations complémentaires relatives aux aménagements et activités humaines

Abréviation	Description
a	Artificialisation du cours d'eau
def	Déforestation
e	Extension de certains cours d'eau pour l'agriculture
h	Barrage hydro-électrique présent (précision si information disponible sur Internet)
p	Présence de ponts sur le cours de la rivière
u	Urbanisation à proximité des cours d'eau

Le Tableau 7 présente les observations complémentaires spécifiques aux zones littorales :

Tableau 7 : Observations complémentaires relatives aux zones littorales

Abréviation	Description
d	Début d'un dépôt côtier (mais pas un delta clairement identifiable)
pd	Plusieurs deltas présents dans une même cellule de la grille

La présence de glissements de terrain a été signalée à l'aide de l'abréviation indiquée dans le Tableau 8 :

Tableau 8 : Observations complémentaires relatives aux instabilités de terrain

Abréviation	Description
g	Glissements de terrain présents

Lorsque la qualité des images ne permettait pas de réaliser des observations fiables, celles-ci étaient codées comme infructueuses (Tableau 9) :

Tableau 9 : Indicateur signalant les cellules où l'observation était impossible en raison de la qualité insuffisante des orthomosaïques (nuages, distorsion, etc.)

Abréviation	Description
i	Infructueux (mauvaise visibilité)

Cette typologie a été appliquée directement dans QGIS via les tables attributaires pour l'ensemble des grilles créées.

Les données ont été complétées par l'ajout des coordonnées de certains éléments clés (rivières, barrages et deltas). Chaque rivière identifiée faisait l'objet d'une entrée unique, à laquelle pouvaient être associés un delta ou un barrage, sans création de ligne supplémentaire.

Enfin, les colonnes ont été dupliquées afin de distinguer les observations réalisées sur les images satellites et celles issues des orthomosaïques historiques.

Un tableau récapitulatif de la typologie employée figure en *Annexe 2 : Synthèse de la typologie et méthodologie d'analyse*.

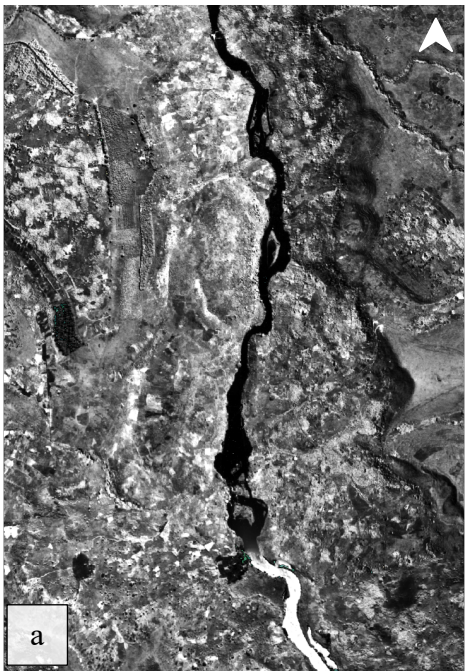

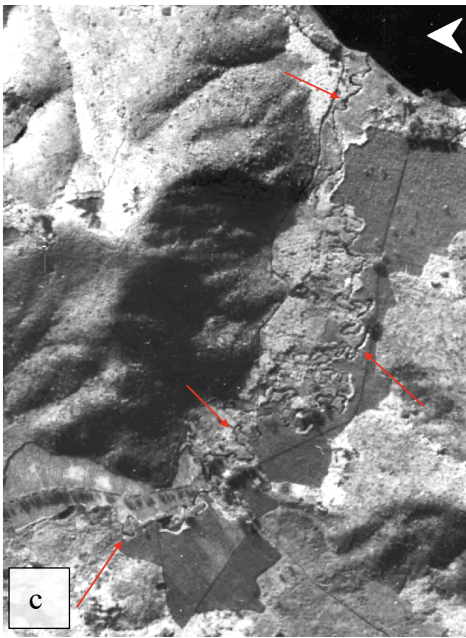

4.2.3. Exemples des observations réalisées

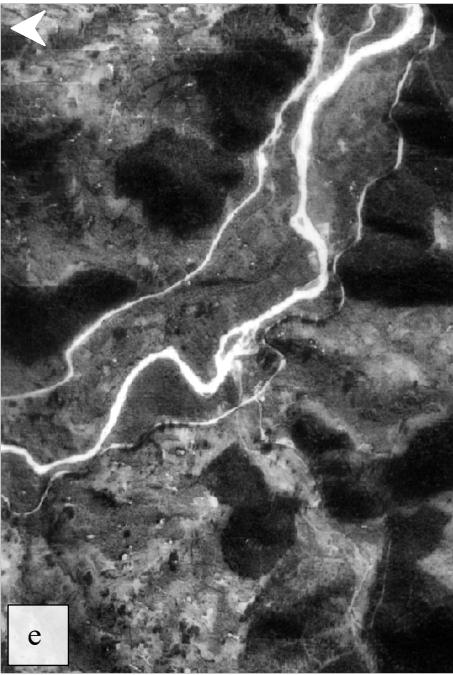

Pour illustrer les dynamiques observées dans les bassins versants, quelques exemples représentatifs sont présentés. Ils reposent sur la comparaison entre les images aériennes historiques et les images satellitaires récentes. Ces exemples portent notamment sur la sinuosité des cours d'eau, la présence de barrages, la végétation riveraine, la formation de deltas ou encore l'impact de la nébulosité sur l'interprétation des images.

- Exemples concernant la sinuosité des cours d'eau

Dans certaines zones, comme le centre-est de la RDC, certains cours d'eau montrent une certaine stabilité (Tableau 10 a et b). En revanche, dans d'autres zones (nord-est de la RDC, nord-ouest du Rwanda), la sinuosité est plus marquée, avec une tendance aux chenaux tressés (Tableau 10 d). Ces configurations s'accompagnent d'un élargissement du lit de la rivière et d'un apport sédimentaire plus important (Tableau 10 c à f).

Tableau 10 : Comparaison de la sinuosité des cours d'eau entre les orthophotos anciennes (1957-1959, 1973-1974) et les images récentes de Google Earth (2018-2024)



Localisation	1957-1959	Google Earth (2018-2024)
RDC - Ouest de la zone d'étude		
RDC - Nord-ouest de la zone d'étude		


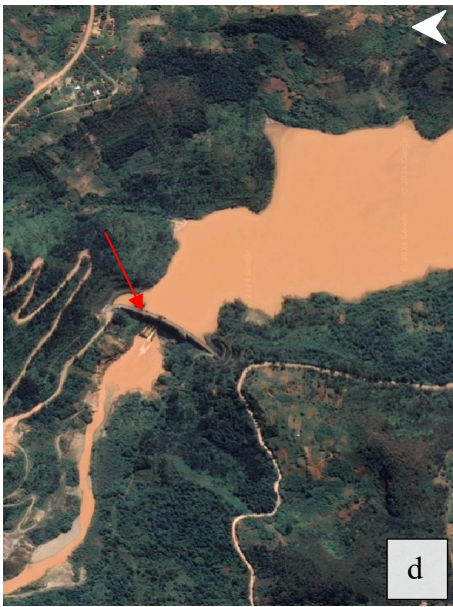
Localisation	1973-1974	Google Earth (2018-2024)
Rwanda - Nord-est de la zone d'étude		

- Exemples de construction de barrages

Ces exemples montrent que certains barrages sont en place depuis plusieurs décennies, comme celui observé en RDC (Tableau 11 a et b). À l'inverse, d'autres aménagements sont plus récents et présentent un impact beaucoup plus marqué, notamment au Rwanda où la retenue d'eau est particulièrement étendue (Tableau 11 c et d).

Tableau 11 : Exemples de construction de barrages, illustrés par la comparaison entre les orthomosaïques anciennes (1957-1959, 1973-1974) et les images récentes de Google Earth (2018-2024)

Localisation	1957-1959	Google Earth (2018-2024)
RDC - Ouest de la zone d'étude		

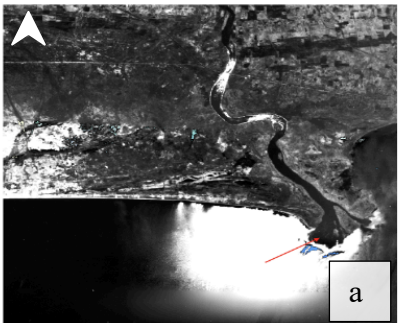
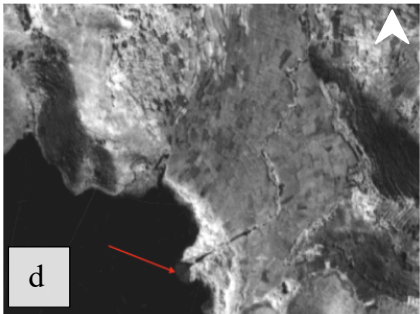
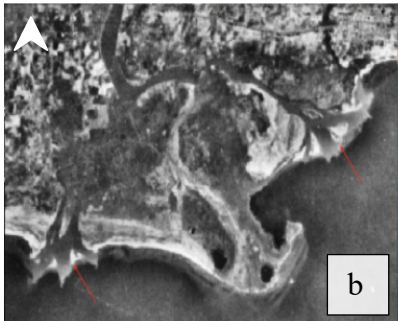
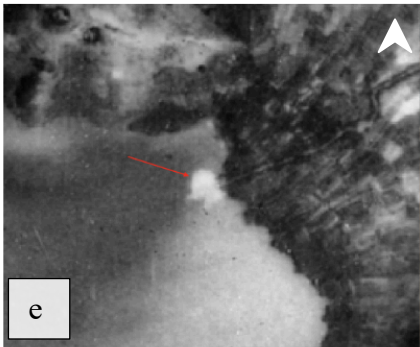


Localisation	1973-1974	Google Earth (2018-2024)
Rwanda - Est de la zone d'étude		

- Exemples d'évolution de delta

L'un des cas les plus marquants concerne le delta de la Ruzizi, dont la dérivation s'est accentuée au fil du temps (Tableau 12 a à c). Dans les années 1970, la rivière s'est déviée et a formé deux deltas distincts à son embouchure (Tableau 12 b). Les flèches indiquent ces zones de formation.

Au Rwanda, l'exemple retenu illustre une dynamique plus récente : le delta a commencé à se former dès les années 1950, mais connaît une évolution plus marquée sur ces dernières années (Tableau 12 d et f).

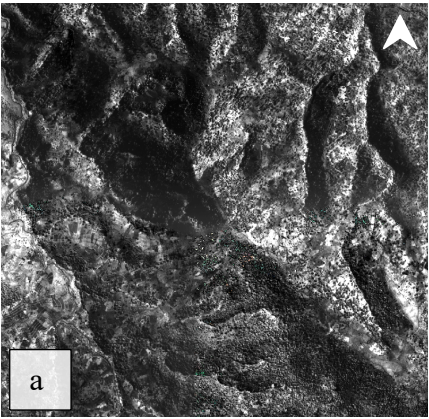
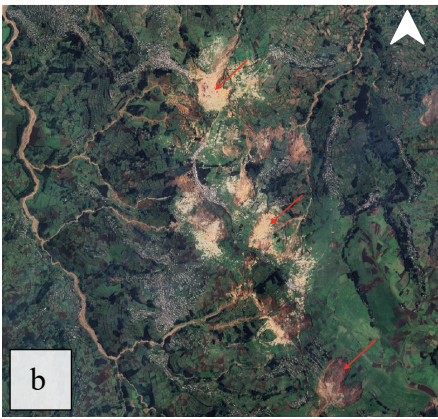
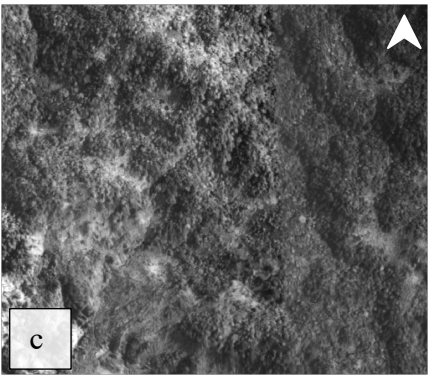

Tableau 12 : Exemples d'évolution des deltas, illustrés par la comparaison entre les orthomosaïques anciennes (1957-1959, 1973-1974) et les images récentes de Google Earth (2018-2024)

Localisation Années images	Burundi - sud du lac Kivu	Rwanda – est de la zone d'étude
1957-1959		
1973-1974		
Google Earth (2018-2024)		

- Exemples d'instabilités de terrain et de déforestation

Ces exemples illustrent les dynamiques affectant les versants. Dans certaines zones, nous observons une augmentation marquée des glissements de terrain (Tableau 13 a et b), signalés par des flèches rouges. Dans le nord-est de la RDC, d'autres zones montrent une déforestation plus récente, visible sur les versants (Tableau 13 c et d).

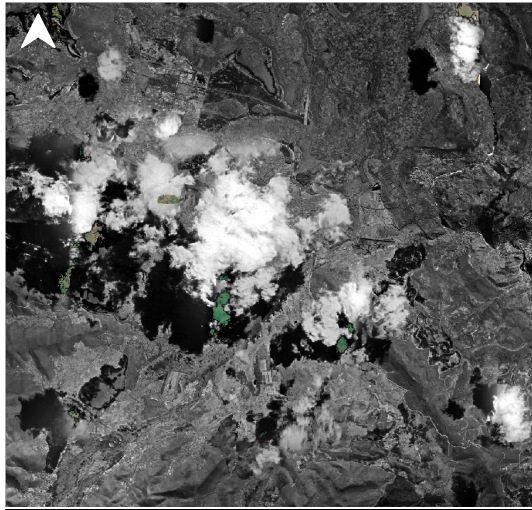
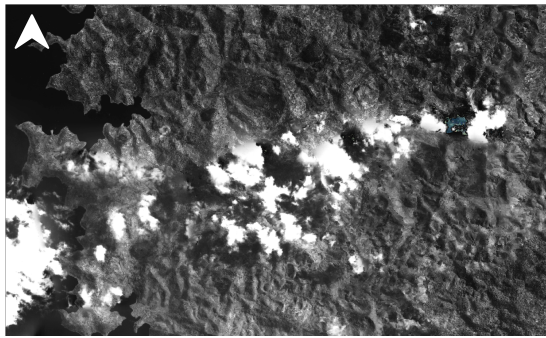
Tableau 13 : Exemples d'instabilités de terrain et de déforestation dans le nord-est de la RDC, illustrés par la comparaison entre les orthomosaïques anciennes (1957-1959) et les images récentes de Google Earth (2018-2024)

Localisation	1957-1959	Google Earth (2018-2024)
RDC - Ouest de la zone d'étude		
RDC - Nord-ouest de la zone d'étude		

- Exemples de nébulosité rencontrée lors de l'analyse des orthomosaïques

Ces derniers exemples montrent la présence de nuages recouvrant partiellement certaines orthomosaïques en RDC et au Rwanda durant les périodes de 1957-1959 (Tableau 14). Cette nébulosité complique l'identification des éléments paysagers et réduit la précision de l'interprétation

Tableau 14 : Exemples de nébulosité observée sur les orthomosaïques de 1957-1959

Localisation	1957-1959
RDC - Ouest de la zone d'étude	
Rwanda - Est de la zone d'étude	

4.3. Deuxième étape : traitement des observations et calcul des paramètres

Cette section, consacrée au traitement des observations, se divise en deux étapes principales.

La première consiste à délimiter la zone d'étude selon les bassins versants qu'elle couvre. Cette étape permet d'associer les données collectées à des entités spatiales précises et de faciliter les liens entre les observations et les caractéristiques propres à chaque bassin.

La seconde vise à extraire, pour ces bassins, une série d'indicateurs et de paramètres morphométriques. Ces valeurs sont ensuite confrontées aux observations issues des images analysées, afin d'identifier des tendances pertinentes pour répondre à la problématique posée.

Le schéma ci-dessous (Figure 10) synthétise les étapes du traitement ainsi que les catégories d'analyses morphométriques réalisées à partir du Digital Elevation Model (DEM), en intégrant les facteurs environnementaux et anthropiques associés aux bassins versants.

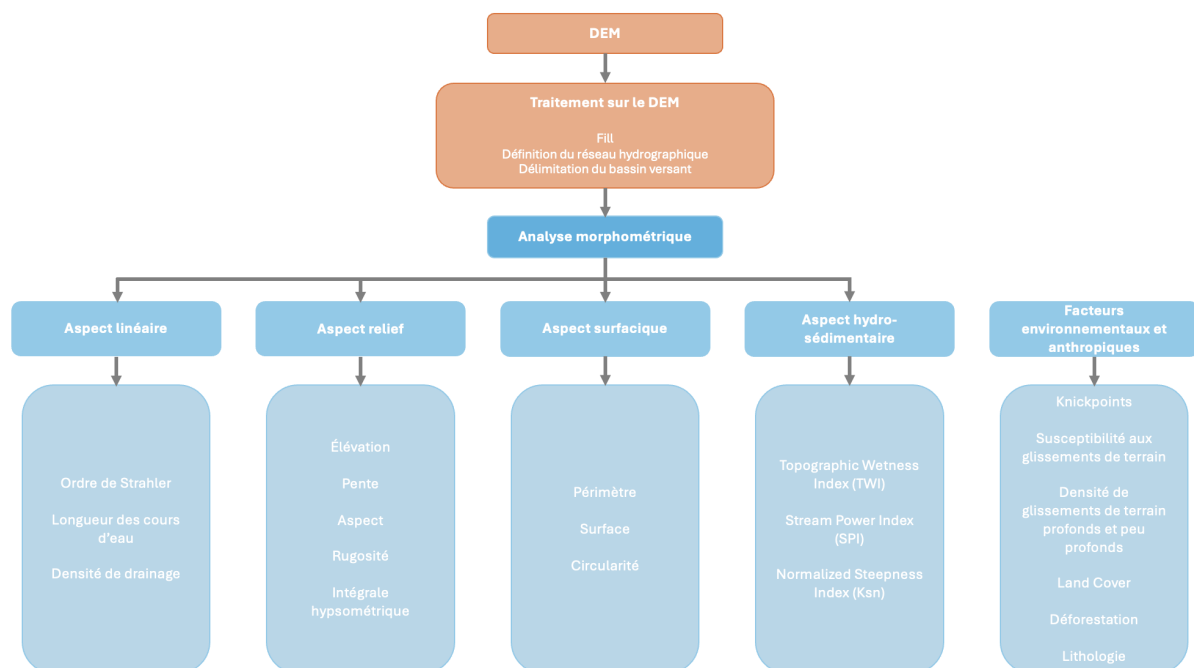


Figure 10 : Schéma du processus de traitement morphométrique appliqué aux bassins versants (aspects linéaires, topographiques, hydro-sédimentaires et facteurs environnementaux/anthropiques)

4.3.1. Délimitation des bassins versants

La délimitation des bassins versants a été réalisée afin de contextualiser les dynamiques fluviales observées et de relier chaque delta à son aire de drainage.

L'emprise de l'étude correspond aux épaules du rift NTK, élargie par un tampon de 10 km afin d'inclure les parties amont influençant directement les processus en aval. Cette extension a été définie à partir de la couche de bassins versants de Depicker *et al.* (2021b).

Le traitement a été effectué dans SAGA GIS à partir d'un modèle numérique de terrain corrigé (remplissage des dépressions avec l'outil *Fill sinks*). Les bassins versants ont ensuite été générés à l'aide de l'outil *Channel Network and Drainage Basins*, en appliquant un seuil basé sur un ordre de Strahler égal à 5 afin de limiter la fragmentation du réseau et de ne conserver que les tronçons les plus représentatifs des dynamiques étudiées. Seuls les bassins d'une superficie supérieure à 1 km² et présentant au moins un cours d'eau identifiable ont été conservés, tandis que ceux n'interceptant pas directement l'épaule du rift ont été supprimés.

Enfin, le réseau hydrographique généré a été comparé aux points de rivières identifiés visuellement afin de vérifier la correspondance entre les tracés et les observations effectuées.

La Figure 11 illustre cette sélection, en présentant les bassins retenus ainsi que le réseau hydrographique.

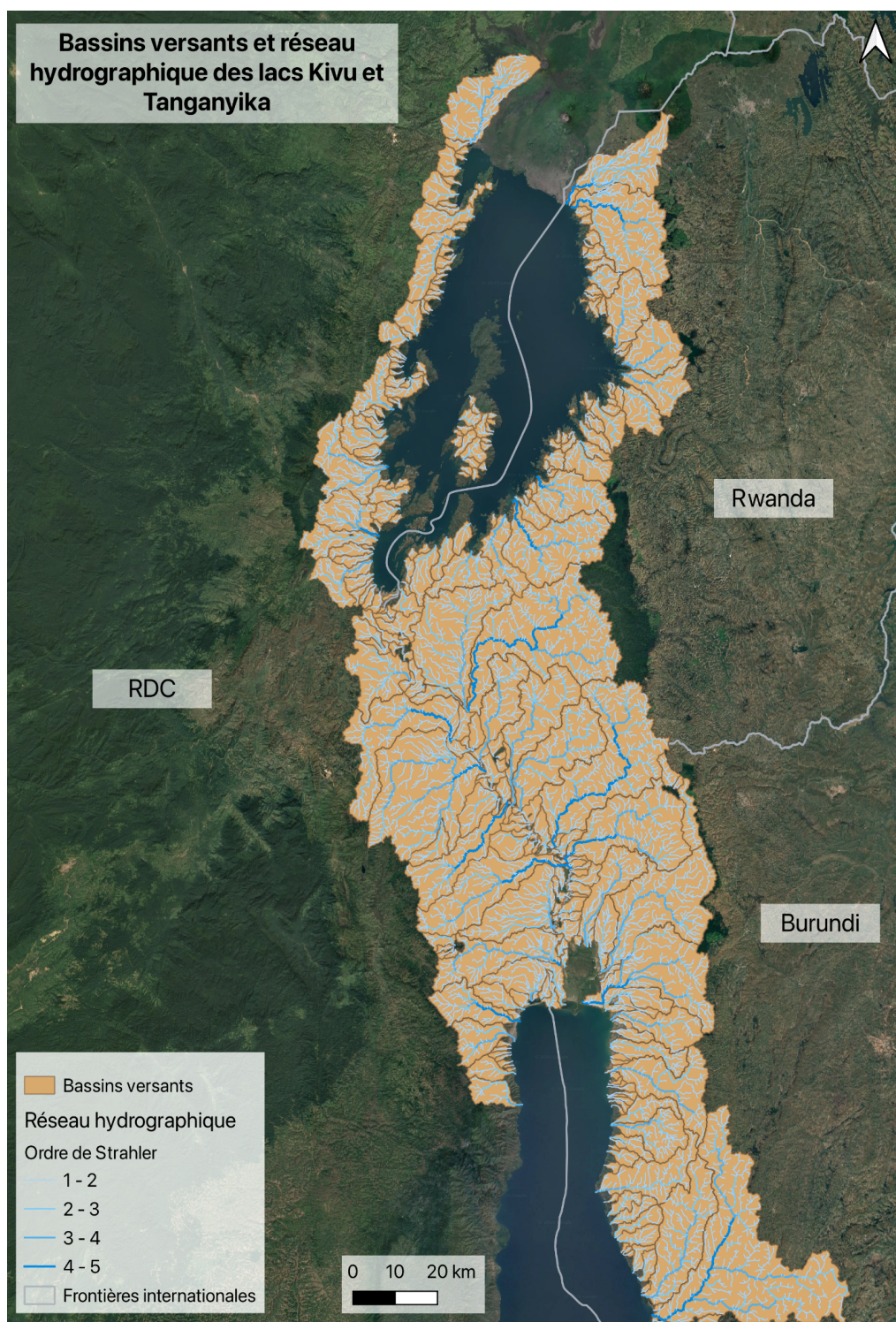


Figure 11: Bassins versants et réseau hydrographique des lacs Kivu et Tanganyika. Les bassins (orange) sont délimités à partir du DEM. Le réseau est classé selon l'ordre de Strahler, du plus faible (1-2, bleu clair) au plus élevé (4-5, bleu foncé)

4.3.2. Calcul des indicateurs et paramètres morphométriques

Cette partie de l'analyse consiste à extraire, à partir du DEM, une série d'indicateurs morphométriques des bassins versants, classés selon différents aspects (linéaire, relief, surfacique, hydro-sédimentaire). Ces variables permettront ensuite de mettre en relation les dynamiques observées avec la structure géomorphologique des bassins.

4.3.2.1. Aspect linéaire

Cette section se concentre sur les caractéristiques du réseau hydrographique, et donc le calcul des paramètres directement liés aux cours d'eau.

Trois paramètres ont été retenus : l'ordre de Strahler, la longueur des cours d'eau et la densité de drainage.

- Ordre de Strahler

L'ordre de Strahler classe les segments d'un réseau hydrographique selon leur position hiérarchique dans le bassin versant. L'ordre 1 correspond aux petits ruisseaux. À chaque confluence entre deux cours d'eau du même ordre, celui-ci augmente d'une unité. Ainsi, plus l'ordre est élevé, plus le réseau est structuré, et plus l'on se rapproche du cours d'eau principal (Faisal & Hayakawa, 2023 ; Shekar & Mathew, 2022). Ce système permet d'évaluer l'importance de chaque tronçon fluvial dans l'organisation globale du bassin.

Dans cette étude, l'ordre de Strahler correspond à celui attribué automatiquement lors de la génération du réseau hydrographique dans SAGA GIS (*Channel Network and Drainage Basins*). Il est utilisé tel quel comme indicateur morphométrique, afin de caractériser la structure des réseaux de chaque bassin versant.

- Longueur des cours d'eau

La longueur du flux correspond à la somme totale des longueurs des cours d'eau présents dans un bassin versant. Selon Harsha *et al.* (2020), cet indicateur permet de caractériser le développement du réseau de drainage, et contribue à une meilleure compréhension de la réponse hydrologique du bassin, notamment lorsqu'il est combiné à d'autres paramètres comme l'ordre de Strahler.

Cette valeur a été obtenue en additionnant les longueurs des segments de cours d'eau identifiés dans chaque bassin, mesurées pour chaque tronçon de rivière et classés par ordre de Strahler. Le calcul a été réalisé à l'aide de l'outil "sum" dans QGIS, qui permet de totaliser automatiquement les longueurs au sein de chaque bassin.

- Densité de drainage

La densité de drainage met en évidence l'étendue et la répartition du réseau hydrographique au sein d'un bassin versant (Shekar & Mathew, 2024). Elle donne une indication sur la proximité entre les cours d'eau et peut refléter certaines caractéristiques du sol, comme la perméabilité des roches ou la nature du relief. Une valeur élevée est généralement associée à un ruissellement intense, des matériaux peu perméables et des pentes marquées. Au contraire, une valeur faible indique souvent la présence de roches plus perméables et de reliefs plus doux (Harsha *et al.*, 2020 ; Shekar & Mathew, 2022, 2024).

La densité de drainage (D_d) a été obtenue en calculant le rapport entre la longueur totale des cours d'eau (L) et la superficie du bassin (A), selon la formule suivante (Shekar & Mathew, 2022) :

$$D_d = \frac{L}{A}$$

4.3.2.2. Aspect relief

Cette catégorie regroupe les indicateurs liés aux caractéristiques topographiques des bassins versants. Ils apportent des informations sur la capacité du terrain à générer de l'écoulement, de l'érosion ou de l'accumulation.

Dans le cadre de cette étude, cinq indicateurs ont été calculés : l'élévation des bassins, la pente, l'aspect, la rugosité et l'indice hypsométrique.

De manière générale, pour obtenir des valeurs comme la moyenne, le minimum ou le maximum d'un paramètre au sein de chaque bassin versant, l'outil *Zonal Statistics* de QGIS a été utilisé. En sélectionnant l'option appropriée (par exemple, "mean" ou "max"), cet outil extrait automatiquement la valeur du paramètre pour chaque bassin délimité.

- Élévation

L'altitude d'un bassin versant fournit une indication sur son énergie potentielle, influençant des processus tels que l'érosion, l'infiltration ou encore le drainage (Harsha *et al.*, 2020).

L'élévation a été calculée via QGIS. Sur base de plusieurs études (Faisal & Hayakawa, 2023 ; Harsha *et al.*, 2020 ; Shekar & Mathew, 2022), trois valeurs ont été extraites pour chaque bassin : l'altitude minimale, maximale et moyenne.

- Pente

La pente est un paramètre clé du relief. Les variations de son gradient influencent la direction de l'écoulement, l'intensité de l'érosion, ainsi que la nature et la localisation des dépôts sédimentaires au sein du bassin versant (Shekar & Mathew, 2022).

Elle a été calculée dans QGIS à l'aide de l'outil "*Slope*" appliqué à l'ensemble du DEM. Trois valeurs ont ensuite été extraites pour chaque bassin versant : la pente minimale, maximale et moyenne.

- Aspect

L'aspect permet d'identifier l'orientation des versants d'un bassin, et peut donner des indications sur la distribution de la végétation. Cet indicateur joue également un rôle dans la répartition de l'humidité du sol et, de manière indirecte, sur les processus d'érosion (Shekar & Mathew, 2022).

L'aspect a été calculé dans QGIS à l'aide de l'outil "*Aspect*" appliqué au DEM. Pour chaque bassin versant, la médiane a été calculée. Ce choix s'explique par le fait que l'aspect est une donnée circulaire : une moyenne pourrait produire des résultats incohérents, tandis que la médiane fournit orientation dominante plus représentative.

- Rugosité

La rugosité permet d'évaluer l'hétérogénéité du relief au sein d'un bassin versant (Faisal & Hayakawa 2023). Elle renseigne sur le degré de variation locale de l'altitude, et peut être utilisée comme indicateur indirect des conditions d'écoulement ou de stabilité des versants.

Cet indicateur a été calculé dans QGIS à l'aide de l'outil "*Roughness*". Trois valeurs ont été extraites pour chaque bassin : la rugosité minimale, maximale et moyenne.

- Intégrale hypsométrique

L'intégrale hypsométrique (IH) est une valeur numérique permettant d'évaluer le degré d'érosion ou le stade d'évolution des bassins versants (stade jeune, mature ou vieux). Elle se base sur le rapport d'altitude (Shekar & Mathew, 2022) :

$$IH = \frac{Z_{moy} - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}}$$

où Z_{moy} , Z_{min} et Z_{max} représentent respectivement l'altitude moyenne, minimale, maximale du bassin.

Selon les valeurs obtenues, il est possible d'interpréter le stade d'évolution du bassin de la manière suivante (Shekar & Mathew, 2022) (Tableau 15) :

Tableau 15 : Classification des bassins versants d'après leur intégrale hypsométrique (Shekar & Mathew, 2022)

IH	Stade d'évolution du bassin
IH < 0.3	Bassin fortement érodé, au stade ancien
0.3 < IH < 0.6	Stade mature
IH > 0.6	Bassin peu érodé, au stade jeune

4.3.2.3. Aspect surfacique

L'aspect surfacique permet de caractériser la forme générale des bassins versants. Il regroupe plusieurs indicateurs décrivant leur géométrie : périmètre, superficie et circularité.

Ces paramètres apportent des informations utiles sur le développement spatial des bassins, influençant les dynamiques d'écoulement et la concentration des flux.

- Périmètre et surface des bassins versants

Le périmètre et la surface des bassins versants ont été obtenus automatiquement lors du processus de délimitation. Ces deux paramètres caractérisent l'envergure spatiale de chaque bassin et servent également de base pour le calcul d'autres indicateurs morphométriques, comme la circularité (Shekar & Mathew, 2022).

- Circularité des bassins versants

La circularité permet de décrire la forme d'un bassin versant. En fonction de la valeur obtenue, il est possible de déterminer si le bassin est plutôt circulaire ou allongé, ce qui peut influencer ses dynamiques sédimentaires et hydrologiques. Une valeur proche de 1 indique un bassin de forme circulaire, tandis qu'une valeur proche de 0 reflète une forme allongée (Faisal & Hayakawa, 2023 ; Harsha *et al.*, 2020 ; Shekar & Mathew, 2022).

La circularité (R) a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$R = \frac{4\pi \times A}{P^2}$$

où A correspond à l'aire du bassin versant, et P à son périmètre.

4.3.2.4. Aspect hydro-sédimentaire

Cette catégorie regroupe trois indicateurs essentiels à l'analyse des dynamiques hydro-sédimentaires au sein des bassins versants : le TWI, le SPI et l'indice Ksn. Ces paramètres permettent de mieux comprendre comment l'eau s'accumule, s'écoule et interagit avec le relief. Ils permettent ainsi d'identifier les zones sensibles à l'érosion, au transport sédimentaire ou aux instabilités de versants, et offrent une lecture plus complète des dynamiques hydro-sédimentaires dans les bassins versants.

Comme pour les indicateurs liés au relief, l'outil *Zonal Statistics* de QGIS a été utilisé afin d'extraire, pour chaque bassin versant, la valeur d'intérêt associée à ces paramètres.

- Topographic Wetness Index (TWI)

L'indice d'humidité topographique (Topographic Wetness Index - TWI) permet d'estimer la répartition potentielle de l'humidité au sein de chaque bassin versant. Il met en évidence les zones susceptibles de saturation, ce qui peut jouer un rôle important dans les processus d'inondation ou le déclenchement de glissements de terrain (Faisal & Hayakawa 2023).

Intégré à l'analyse des pentes, cet indice permet d'identifier avec plus de précision les zones potentiellement saturées en eau. En croisant ces deux informations, il est possible d'identifier plus précisément les secteurs où le ruissellement est ralenti et où l'accumulation d'eau est plus probable. Des valeurs élevées de TWI correspondent à des zones de faible pente, favorisant l'humidité, tandis que des valeurs faibles indiquent des secteurs à forte pente, où l'écoulement est plus rapide et l'humidité moindre (Faisal & Hayakawa 2023).

L'indice a été calculé dans SAGA GIS à l'aide de l'outil "*Topographic Wetness Index (TWI)*". Pour chaque bassin, quatre valeurs ont été extraites : le TWI minimum, maximum, moyen et l'écart-type. L'ajout de l'écart-type permet de mettre en avant les contrastes internes d'humidité, et donc de mieux cerner les bassins où la répartition de l'eau est hétérogène, ce qui peut renforcer certains processus d'érosion et de dépôt.

- Stream Power Index (SPI)

L'indice de puissance du flux (Stream Power Index - SPI) permet d'évaluer l'énergie potentielle de l'écoulement de surface, directement liée à sa capacité à entraîner le transport de sédiments (Faisal & Hayakawa 2023).

Tout comme le TWI, le SPI combiné à l'analyse des pentes permet d'identifier plus précisément les zones exposées à de fortes dynamiques érosives. Une valeur élevée de SPI couplée à de fortes pentes indiquent un écoulement concentré, avec un potentiel d'érosion important. Au contraire, des valeurs faibles de SPI associées à de faibles pentes indiquent des zones faiblement drainées, où le potentiel d'érosion est plus limité (Faisal & Hayakawa 2023).

Cet indice a été calculé dans SAGA GIS à l'aide de l'outil "*Stream Power Index*". Pour chaque bassin versant, quatre valeurs ont été extraites : le SPI minimum, maximum, moyen, ainsi que l'écart-type. L'écart-type du SPI a été utilisé afin de mettre en évidence les variations internes

de l'énergie d'écoulement au sein de chaque bassin. Il permet de mettre en avant les bassins où les dynamiques d'érosion peuvent être plus marquées ou plus hétérogènes, en lien avec la topographie locale.

- Normalized Steepness Index (Ksn)

L'indice Ksn (Normalized Steepness Index) utilisé dans cette étude provient directement des travaux de Vanmaercke *et al.* (2020), et n'a donc pas été calculé manuellement. Cet indice est défini par la formule suivante :

$$Ksn = s \times A^\theta$$

où s représente la pente locale (en m/m), A la surface drainée (en m²) pour chaque pixel, et θ la constante de la concavité.

Il est principalement utilisé pour quantifier la raideur des profils fluviaux, mais peut être également être interprété comme un indicateur topographique de la contrainte de cisaillement exercée par le flux en un point donné (Vanmaercke *et al.*, 2020).

Quatre valeurs ont été extraites pour chaque bassin versant : le Ksn minimum, maximum, moyen et la médiane. La médiane a été utilisée en complément de la moyenne afin de mieux représenter la tendance centrale du bassin, en réduisant l'effet des valeurs extrêmes.

4.3.3. Facteurs environnementaux et anthropiques associés aux bassins versants

En plus des indicateurs morphométriques calculés à partir du DEM, il est important d'intégrer à notre base de données des éléments externes qui influencent également les dynamiques hydro-sédimentaires des bassins versants. Ces informations, obtenues à partir de couches préexistantes ou de traitements complémentaires, viennent compléter la lecture interne des bassins.

L'objectif est de pouvoir confronter ces données à nos propres observations, afin de mieux comprendre ce qui pourrait expliquer certains comportements ou contrastes observés entre les bassins. Cette partie propose donc une présentation synthétique des différentes variables

ajoutées à la base de données, comme l'occupation du sol, les glissements de terrain, la géologie ou encore la dynamique de la déforestation.

- Knickpoints

L'identification des knickpoints, réalisée dans l'étude de Depicker *et al.* (2021b), a servi de base pour comptabiliser leur nombre dans chaque bassin versant. Ces ruptures de pente localisées dans le profil longitudinal des cours d'eau peuvent être liées à des contrastes lithologiques, à des mouvements tectoniques ou à des phases d'ajustement fluvial.

Leur présence renseigne sur des dynamiques d'érosion actives et permet d'identifier les zones de déséquilibre morphologique à l'intérieur des bassins.

- Susceptibilité aux glissements de terrain

Pour chaque bassin versant, une valeur de susceptibilité aux glissements de terrain a été extraite à partir d'une carte provenant de l'étude de Depicker *et al.* (2021b). Cette donnée donne un aperçu du niveau de prédisposition de chaque bassin à ce type d'instabilité.

L'objectif est de pouvoir intégrer cette information dans l'analyse pour mieux cerner les liens possibles entre conditions structurelles de terrain et dynamique réelle des glissements recensés.

- Glissements de terrain peu profonds et profonds

En complément de l'analyse de la susceptibilité, il est également pertinent de considérer les glissements recensés, en distinguant leur nature et leur répartition.

Dans le cadre de cette étude, ils ont été différenciés en deux catégories : glissements profonds et glissements peu profonds, à partir d'une base de données existante (Depicker *et al.*, 2021b ; Dewitte *et al.*, 2020). Le nombre de glissements de chaque type a été comptabilisé individuellement pour chaque bassin versant. Afin de limiter l'influence de la taille des bassins, une densité a également été calculée pour chaque catégorie, correspondant au rapport entre le nombre de glissements et la surface du bassin concerné.

Ces deux indicateurs - nombre total et densité des glissements - permettront dans la suite de l'analyse de mieux appréhender la répartition spatiale des instabilités et d'explorer leurs

éventuelles relations avec les caractéristiques morphométriques ou les contextes environnementaux locaux.

- Land Cover

Les informations sur l'occupation du sol proviennent de la base de données de l'ESA (2021). Pour chaque bassin versant, nous avons calculé le pourcentage de surface occupée par les principales catégories en lien avec les dynamiques observées : zones bâties, forêts, cultures et végétation.

Cette étape a consisté à comptabiliser le nombre de pixels correspondant à chaque classe d'intérêt de la couche ESA, puis à diviser ce nombre par le total des pixels du bassin versant, avant de calculer cette information en pourcentage. Ce traitement a été réalisé dans QGIS, à l'aide de l'outil « *Histogramme zonal* ».

Afin de mieux comparer l'évolution de la couverture forestière dans le temps, le pourcentage de forêts a également été ajouté pour les années 1959, 1974 et 2020, sur base des données issues de l'étude de Depicker *et al.* (2021a).

- Déforestation

Le pourcentage de déforestation a été estimé à partir d'une couche raster issue de l'étude de Depicker *et al.* (2021a), représentant les surfaces ayant subi une perte de couverture forestière entre les années 1950, 1970 et 2020. Pour chaque bassin versant, la proportion de zones déboisées a été calculée en rapportant le nombre de pixels concernés par la déforestation au nombre total de pixels composant le bassin. Ce rapport a ensuite été exprimé en pourcentage. Cette approche permet d'obtenir un indicateur simple et comparable entre bassins pour évaluer la pression liée à la déforestation récente.

L'objectif est de croiser cette information avec les dynamiques d'instabilité observées, notamment dans les zones touchées par une perte importante de végétation, afin de mieux comprendre les dynamiques sédimentaires à l'œuvre dans les bassins versants.

- Lithologie

La lithologie dominante de chaque bassin versant a été identifiée à partir d'une couche géologique existante (Depicker *et al.*, 2021b). Pour cela, nous avons utilisé l'outil *Zonal Statistics* dans QGIS, en sélectionnant l'option permettant d'extraire la valeur majoritaire au sein de chaque polygone.

Cette approche permet d'associer à chaque bassin la classe lithologique la plus représentée. Même si ce choix implique une simplification de la diversité géologique, il permet d'avoir une première lecture du substrat dominant à l'échelle du bassin, utile pour interpréter certains comportements géomorphologiques, comme la sensibilité à l'érosion ou la stabilité des versants.

4.4. Description de la base de données obtenue

La base de données finale se présente sous la forme d'une table attributaire volumineuse dans laquelle chaque ligne correspond à un ensemble d'observations associées à un bassin versant. Pour chaque bassin, l'ensemble des indicateurs morphométriques et environnementaux décrits précédemment a été intégré. À cela s'ajoutent, lorsqu'elles sont disponibles, les observations réalisées manuellement à différentes périodes (orthomosaiques de 1957-1959, 1973-1974 et images satellites de 2018-2024).

Cette structure reflète la complexité temporelle des dynamiques observées. Un même bassin versant peut apparaître plusieurs fois dans la base de données, chaque entrée correspondant à une combinaison unique d'observations issues de périodes différentes. Les bassins sans observation directe sont tout de même conservés dans la base de données, car leurs paramètres ont été calculés et peuvent servir de comparaison.

Cette organisation permet une lecture plus fine des dynamiques fluviales étudiées, en tenant compte à la fois des observations locales (telles que les changements de sinuosité, la présence de deltas ou encore de barrages) et des caractéristiques globales des bassins.

4.5. Analyse de la contribution respective des facteurs anthropiques et naturels à l'évolution morphologique des cours d'eau via modélisation

Pour analyser le rôle respectif des facteurs naturels et anthropiques, nous avons appliqué une approche de modélisation sous Python, à l'aide d'un code co-écrit avec un modèle de langage (LLM) (*Annexe 7 : Scripts Python*). Deux dynamiques ont été retenues comme variables cibles : l'évolution de la sinuosité et l'apparition de deltas. L'objectif est de tester quels paramètres expliquent le mieux ces changements observés. La modélisation a été réalisée principalement avec la librairie scikit-learn (Pedregosa *et al.*, 2011).

Le jeu de données a d'abord été préparé par la sélection des variables prédictives issues des classes géomorphologiques et de l'occupation du sol. Les variables catégorielles, comme la lithologie, ont été transformées en variables factices lorsque nécessaire.

La première étape a consisté à examiner les corrélations entre, d'une part, les variables géomorphologiques et les dynamiques fluviales (*Annexe 3 a : Variables géomorphologiques et dynamiques fluviales*) et d'autre part, l'occupation du sol et ces mêmes dynamiques (*Annexe 3 b : Occupation du sol et caractéristiques fluviales*). Cette analyse exploratoire a permis d'identifier les variables au potentiel explicatif, mais aussi de vérifier leur cohérence avec l'évolution observée des cours d'eau. Dans un second temps, un contrôle de la multicolinéarité a été effectué à l'aide d'une matrice de corrélation entre prédicteurs (*Annexe 4 : Multicolinéarité entre variables explicatives*), ce qui a permis de repérer les variables redondantes et de conserver les indicateurs les plus pertinents, limitant ainsi le risque de biais.

Deux modèles ont ensuite été comparés : une régression linéaire et un algorithme Random Forest. La régression logistique permet de tester l'effet direct de variables explicatives, mais reste limitée face à des relations complexes. À l'inverse, le modèle Random Forest, un algorithme de machine learning, offre une plus grande flexibilité en capturant des interactions non linéaires et multiples entre variables. Chaque modèle a été évalué selon deux conditions : avec l'ensemble des variables influentes et avec un jeu réduit, après contrôle de la multicolinéarité. Leur performance a été mesurée par validation croisée à 5 plis, en utilisant le

coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Cette démarche a permis de comparer la lisibilité d'un modèle simple à la robustesse d'un modèle plus complexe.

Cette logique rejoint celle adoptée par Mawe *et al.* (2024), qui ont analysé l'expansion des ravines urbaines en testant séparément l'effet de différents facteurs environnementaux. Leur approche illustre bien la démarche retenue ici : évaluer l'influence relative des variables explicatives sur des dynamiques morphologiques en mobilisant des modèles adaptés à des processus simples ou complexes.

Le modèle a permis d'estimer l'importance relative des variables prédictives et de déterminer quels facteurs influencent le plus la sinuosité et la formation de deltas.

Enfin, une analyse par clustering a été réalisée pour regrouper les bassins versants présentant des caractéristiques similaires. Cette étape vise à identifier des types de bassins partageant des dynamiques communes en fonction du relief, de l'occupation du sol et de leur évolution sédimentaire. Des analyses complémentaires, comme l'étude des tendances temporelles, et de la hiérarchie hydrographique, ont également été intégrées afin d'affiner la lecture des dynamiques fluviales. Les résultats détaillés de chacune de ces différentes étapes sont présentés dans la section suivante.

5. Résultats

Cette section présente les principaux résultats obtenus à partir des analyses menées sur les bassins versants des régions situées autour des lacs Kivu et Tanganyika. Elle est structurée en deux parties.

La première partie repose sur une analyse quantitative, qui vise à caractériser et à quantifier la base de données construite. Cette étape permet ainsi de dresser un aperçu global du jeu de données, en précisant le nombre d'entités identifiées (bassins, rivières, deltas, barrages) et en illustrant leur répartition spatiale.

La seconde partie s'appuie sur l'approche par modélisation, avec la mise en place de méthodes statistiques permettant d'identifier les facteurs majeurs influençant les dynamiques de sinuosité et de sédimentation dans les bassins versants.

5.1. Inventaire des éléments observés et quantification par type

Cette étude a permis d'identifier un total de 835 entités, comprenant à la fois des tronçons de rivières, des deltas et des barrages.

5.1.1. Bassins versants

La description des bassins versants suit les deux catégories précédemment définies : ceux pour lesquels des observations ont été réalisées, et ceux sans. Au total, 133 bassins versants comportant des observations ont été recensés. Nous constatons rapidement que la taille de ces bassins varie fortement, allant d'un peu plus de 1 km² pour le plus petit à plus de 873 km² pour le plus grand. Concernant les bassins versants pour lesquels aucune observation n'a été réalisée, 174 ont été recensés. Ces bassins présentent une variabilité plus faible en termes de superficie, allant de légèrement plus de 1 km² à un peu plus de 117 km².

La Figure 12 permet de visualiser ces deux types de bassins.

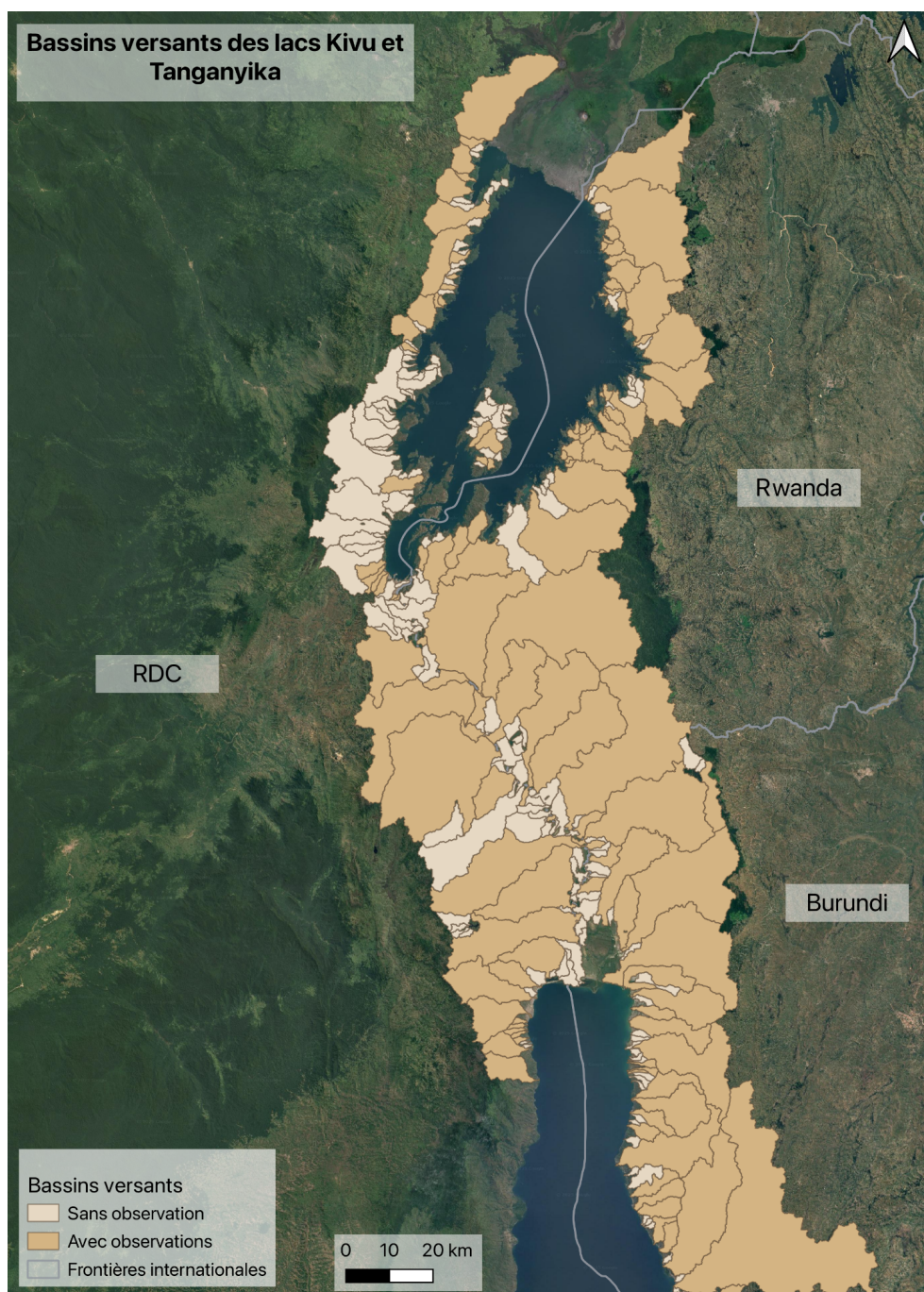


Figure 12 : Bassins versants des lacs Kivu et Tanganyika avec (beige foncé) ou sans observations (beige clair)

5.1.2. Rivières

Environ 400 points représentant des rivières ont été identifiés dans les épaules du rift via la grille d'analyse. Ce chiffre ne correspond toutefois pas au nombre exact de cours d'eau distincts, car une même rivière peut traverser plusieurs cellules et ainsi être comptée plusieurs fois.

Pour les orthomosaïques de 1957-1959, un total de 189 rivières a été identifié. Sur les rives est des lacs Kivu et Tanganyika, 105 rivières ont été recensées : 38 au Burundi, dans la région de Bujumbura, et 67 sur le territoire rwandais. Du côté ouest, en RDC, 84 rivières ont été recensées pour cette même période.

Pour les orthomosaïques de 1973-1974, 298 rivières ont été identifiées, toutes situées sur les rives est des lacs.

Enfin, sur base des images satellite récentes, 403 rivières ont été recensées. Sur les rives est, 158 rivières ont été identifiées au Rwanda et 142 au Burundi. Sur les rives ouest, 103 rivières ont été recensées.

5.1.3. Deltas

Le nombre de deltas identifiés augmente au fil des périodes analysées. Sur les orthomosaïques de 1957-1959, 11 deltas ont été repérés (Figure 13 a). Ce nombre passe à 30 pour les images aériennes historiques de 1973-1974 (Figure 13 b), puis à 102 sur les images satellites (Figure 13 c). Pour une meilleure visualisation, la Figure 13 est accessible via *Annexe 5 : Évolution des deltas au cours du temps*.

Évolution spatiale des deltas autour des lacs Kivu et Tanganyika

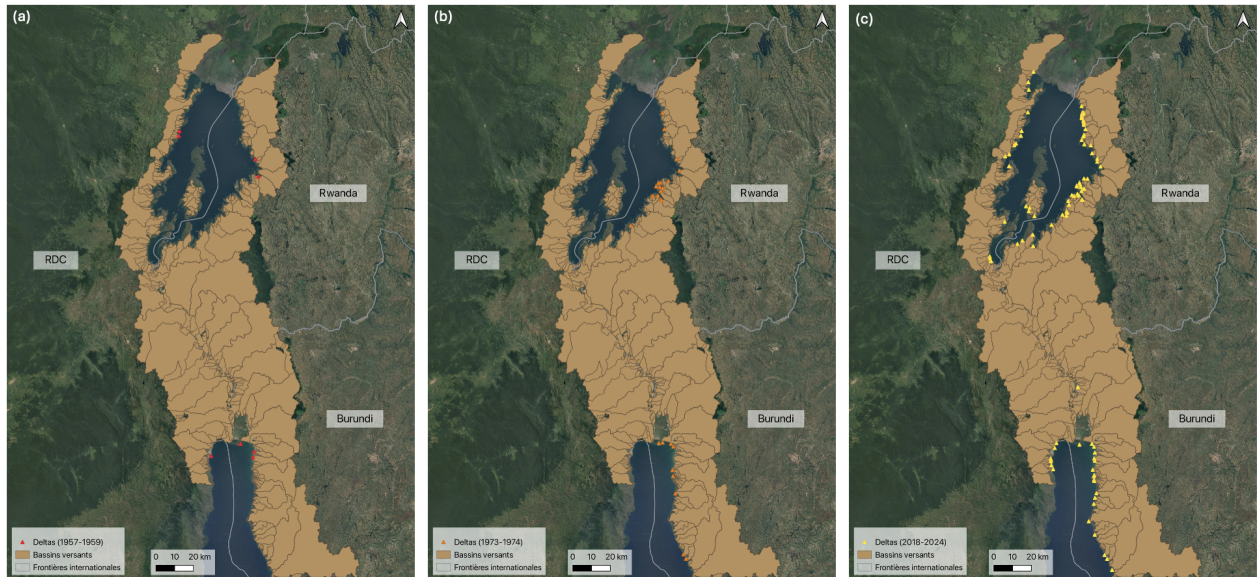


Figure 13 : Localisation des deltas identifiés autour des lacs Kivu et Tanganyika aux périodes 1957-1959 (a), 1973-1974 (b) et 2018-2024 (c)

5.1.4. Barrages

Pour les périodes 1957-1959 et 1973-1974, le nombre de barrages identifiés reste très faible. Un seul barrage a été recensé en RDC pour la période 1957-1959, tandis que deux barrages ont été identifiés au Rwanda pour la période 1973-1974.

En revanche, les images Google Earth révèlent une nette augmentation, avec 29 barrages recensés : 27 situés au Rwanda et au Burundi, et 2 en RDC (Figure 14).

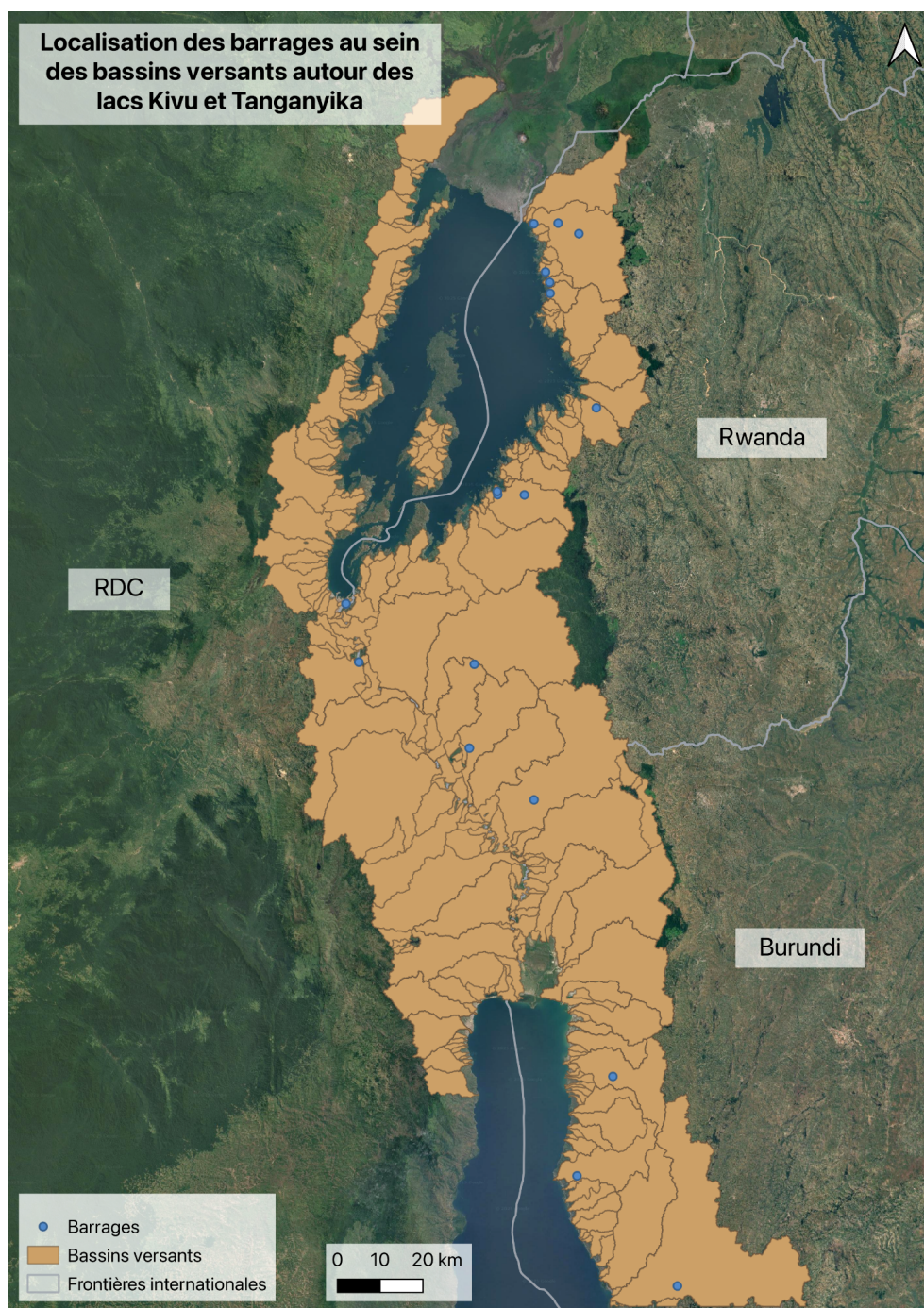


Figure 14 : Localisation des barrages identifiés au sein des bassins versants autour des lacs Kivu et Tanganyika

5.2. Résultats des analyses par modélisation

Cette partie présente les résultats issus des modèles Random Forest, en commençant par les dynamiques fluviales, puis l'organisation des réseaux hydrographiques, jusqu'à une analyse plus globale des bassins versants.

Elle se termine par une synthèse transversale, facilitant la compréhension des liens identifiés.

5.2.1. Analyse exploratoire des facteurs liés aux dynamiques fluviales

Les corrélations observées sont globalement faibles à modérées. Certaines variables géomorphologiques, telles que l'altitude moyenne ou l'indice d'humidité topographique, présentent une corrélation négative avec la sinuosité. D'autres variables, comme la susceptibilité aux mouvements de terrain, présentent une relation plus marquée avec l'évolution temporelle de la sinuosité, suggérant un lien possible entre les instabilités du terrain et les modifications du tracé fluvial (*Annexe 3 a : Variables géomorphologiques et dynamiques fluviales*). Du côté de l'occupation du sol, bien que les corrélations soient plus faibles, quelques tendances se manifestent, notamment une relation négative entre surface cultivée et sinuosité, ou encore une faible corrélation positive entre changements de couverture forestière et l'évolution de la sinuosité (*Annexe 3 b : Occupation du sol et caractéristiques fluviales*).

La multicolinéarité a mis en évidence de fortes redondances entre certaines variables, notamment entre la rugosité moyenne et maximale, ou encore entre les différentes mesures de couverture forestière (*Annexe 4 : Multicolinéarité entre variables explicatives*). Ces redondances ont conduit à ne conserver qu'un sous-ensemble de variables jugées les plus représentatives, parmi lesquelles l'altitude moyenne, le TWI moyen, la susceptibilité aux mouvements de terrain et la proportion de surface cultivée.

Ce premier tri permet d'obtenir une base de données épurée afin de ne conserver que les variables les plus représentatives. Cela permet d'aborder l'étape suivante : l'identification des facteurs qui influencent directement les dynamiques fluviales.

5.2.2. Facteurs explicatifs des dynamiques fluviales

Cette partie explore l'évolution de la sinuosité des cours d'eau entre les différentes périodes étudiées (1959-1974, 1974-2020 et 1959-2020).

L'objectif est de déterminer si cette sinuosité a augmenté, diminué ou est restée stable, puis de cartographier ces changements afin d'identifier les facteurs environnementaux et géomorphologiques qui pourraient les expliquer.

- Répartition des types de changements de sinuosité

L'analyse met en évidence une stabilité générale des cours d'eau dans la majorité des bassins versants au cours des différentes périodes étudiées. Toutefois, une proportion non négligeable de cours d'eau présente des tendances à l'augmentation ou à la diminution de la sinuosité (Figure 15). La répartition de ces changements varie légèrement selon les périodes.

Les performances des modèles permettent d'affiner la lecture de ces résultats. La détection des bassins à sinuosité stable est satisfaisante, tandis que l'identification des bassins avec une sinuosité en augmentation ou en diminution s'avère plus difficile. Ces derniers sont parfois classés, à torts, comme stables, probablement en raison de leur fréquence plus faible et de la subtilité des changements observés. Il convient alors d'interpréter ces résultats avec prudence, car ils ne reflètent qu'une approximation des dynamiques réelles.

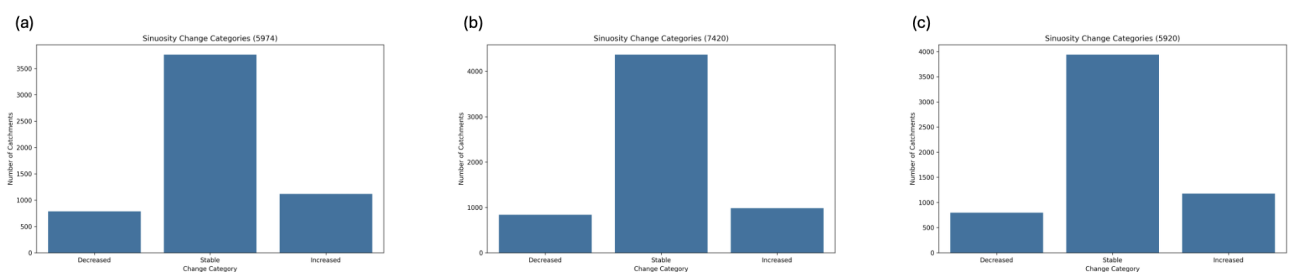


Figure 15 : Répartition des catégories de changement de sinuosité pour les périodes 1959-1974 (a), 1974-2020 (b) et 1959-2020 (c)

- Répartition spatiale des changements de sinuosité dans les bassins versants

Les cartes ci-dessous (Figure 16) illustrent la répartition spatiale des changements de sinuosité observés dans les bassins versants pour les trois périodes analysées.

Pour la période 1959-1974, les augmentations de sinuosité se concentrent principalement au sud et dans le centre-nord de la zone d'étude, tandis que les diminutions se situent principalement au nord. Entre 1974 et 2020, la tendance s'inverse. Les diminutions sont plus marquées dans les bassins du sud et du centre, tandis que les augmentations se situent davantage dans le nord et le centre.

Sur l'ensemble de la période 1959-2020, les augmentations se concentrent surtout au centre de la zone d'étude, tandis que les diminutions se répartissent principalement dans les parties nord et sud du territoire (Figure 16). Pour une meilleure visualisation, la Figure 16Figure 13 est accessible via *Annexe 6 : Répartition spatiale des variations de sinuosité des cours d'eau*.

Ces résultats soulignent une forte variabilité spatiale et temporelle des dynamiques fluviales.

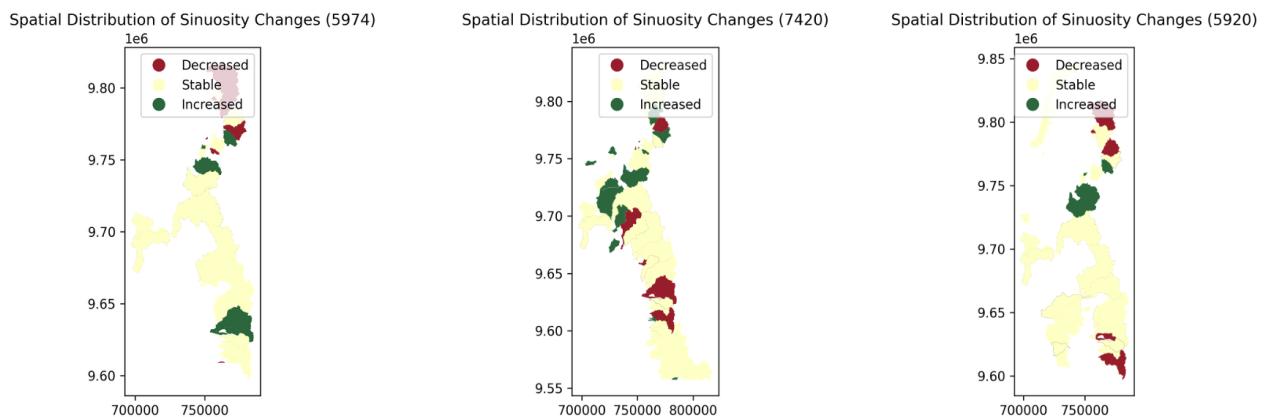


Figure 16 : Répartition spatiale des variations de sinuosité des cours d'eau (1959-1974, 1974-2020, 1959-2020) : diminution (rouge), stabilisation (jaune pâle), augmentation (vert foncé)

- Variables clés dans l'explication des dynamiques fluviales

Nous poursuivons notre analyse avec l'identification des facteurs susceptibles d'expliquer les évolutions de sinuosité mises en évidence dans la répartition spatiale.

Pour la période 1959-1974, le pourcentage de surfaces cultivées apparaît comme le facteur le plus influent, car il ressort en première position dans le classement des importances calculées par le modèle Random Forest (Figure 17). Cela souligne le rôle de l'occupation du sol dans les dynamiques fluviales. S'y ajoutent plusieurs variables topographiques, telles que l'altitude moyenne, le SPI, le TWI ou encore la susceptibilité aux glissements de terrain, qui révèlent une forte interaction entre la morphologie du terrain et l'évolution de la sinuosité. D'autres variables interviennent plus secondairement, comme la densité de glissements de terrain profonds et superficiels, ou encore le pourcentage de zones bâties (Figure 17).

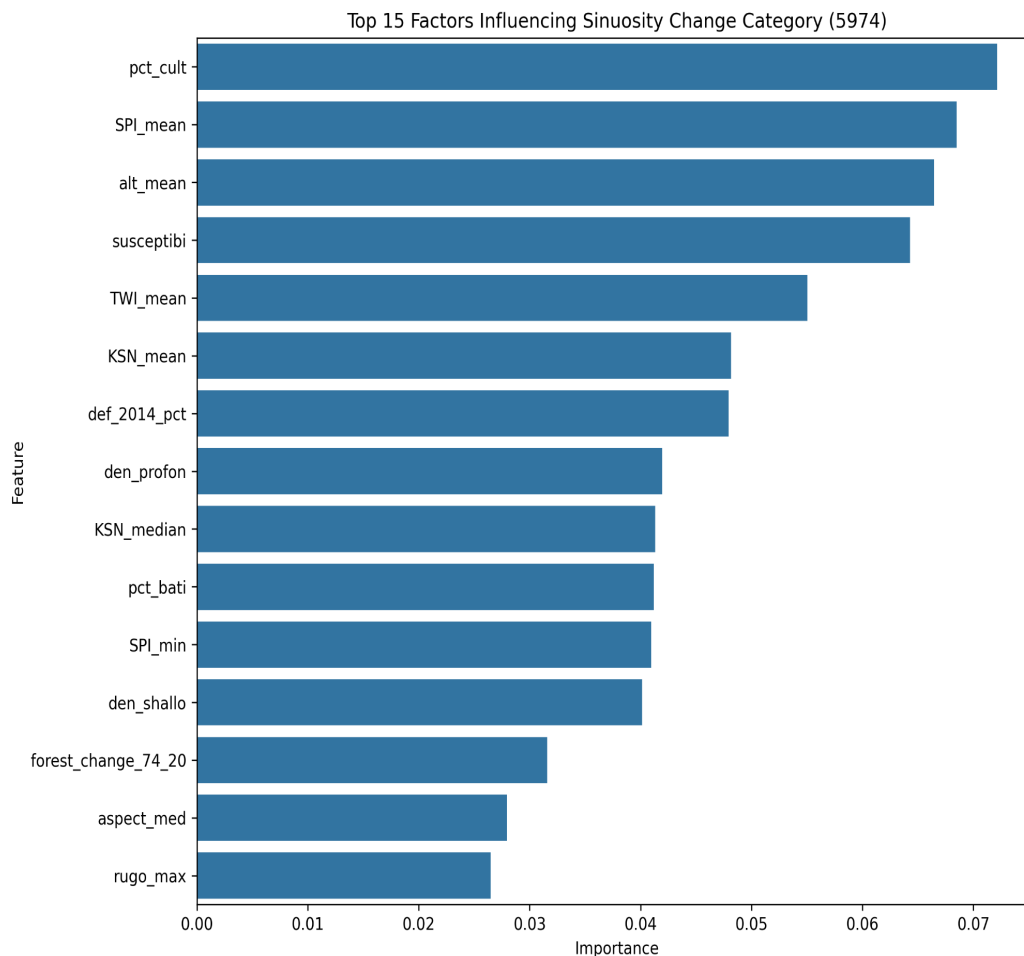


Figure 17 : Facteurs principaux explicatifs des changements de sinuosité (1959-1974) selon le modèle de Random Forest

Entre 1974 et 2020, l'anthropisation apparaît comme un facteur majeur des changements de sinuosité, notamment à travers la déforestation de 2014 et les dynamiques de couverture forestière enregistrés entre 1959-2020. Certains facteurs géomorphologiques, comme la densité de glissements de terrain profonds et l'indice HI, exercent également une influence significative sur l'évolution des tracés fluviaux (Figure 18).

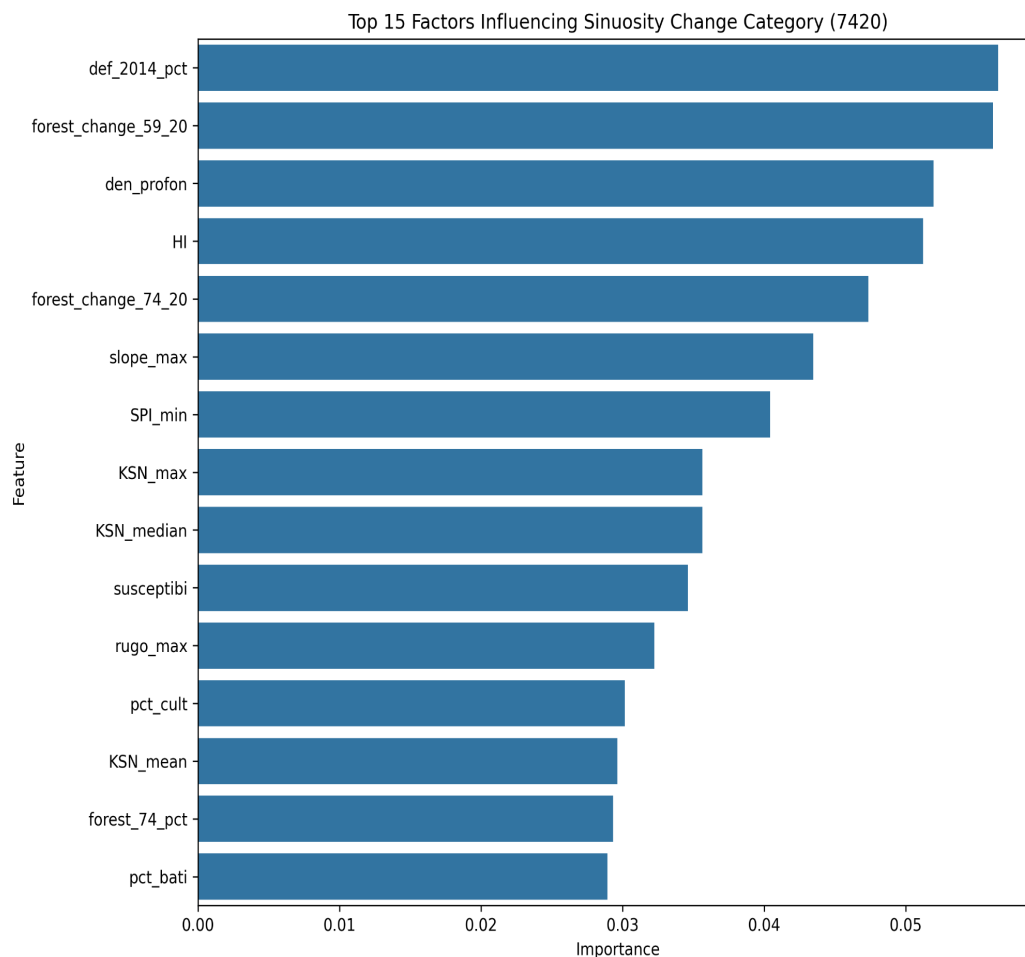


Figure 18 : Facteurs principaux explicatifs des changements de sinuosité (1974-2020) selon le modèle de Random Forest

Pour l'ensemble de la période analysée (1959-2020), les facteurs anthropiques se distinguent nettement, avec une influence marquée du pourcentage de surfaces cultivées, des zones bâties et de la déforestation. Parallèlement, des facteurs géomorphologiques, comme la susceptibilité aux glissements de terrain et la densité des glissements profonds, contribuent également de manière significative aux changements de sinuosité observés (Figure 19).

Ces résultats s'inscrivent dans la continuité de ceux obtenus pour les périodes précédentes, confirmant la récurrence de certaines variables explicatives dans les dynamiques fluviales, comme pour le pourcentage de surfaces cultivées, les modifications de la couverture forestière ou encore la densité de glissements de terrains.

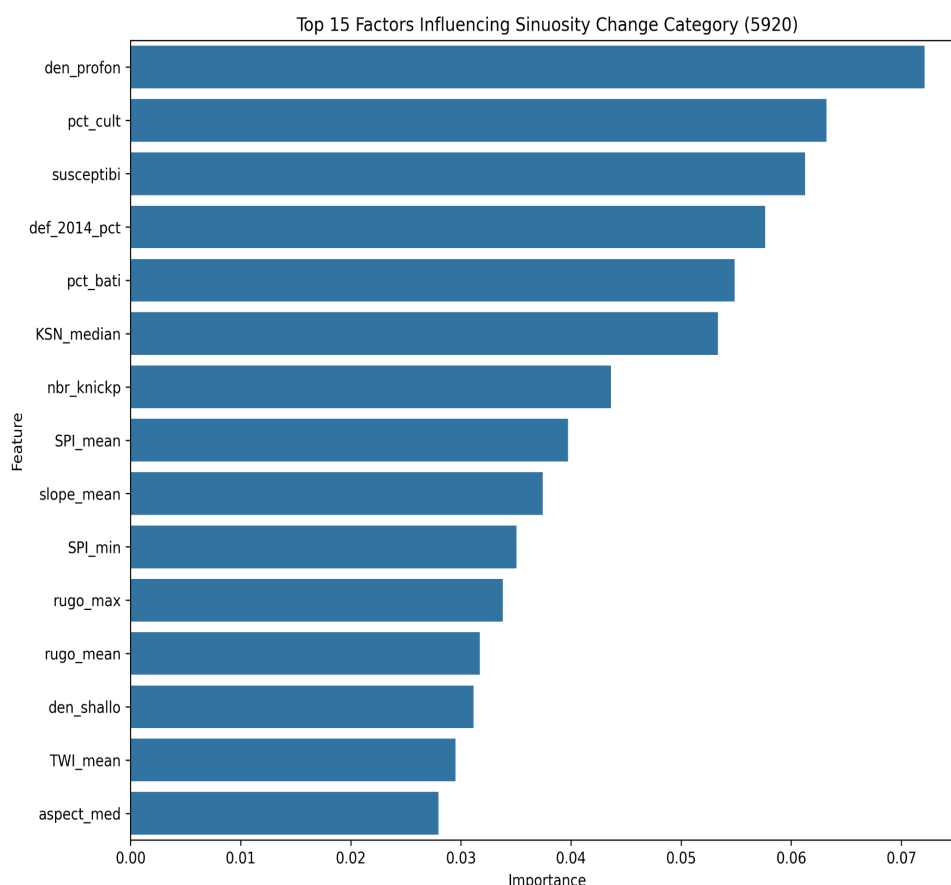


Figure 19 : Facteurs principaux explicatifs des changements de sinuosité (1959-2020) selon le modèle de Random Forest

5.2.3. Analyse par hiérarchie des réseaux hydrographiques

Dans l'objectif d'identifier comment les facteurs influencent les dynamiques fluviales à travers la hiérarchie des cours d'eau, cette section examine les résultats en fonction de l'ordre de Strahler.

L'analyse s'appuie sur la distribution des cours d'eau par ordre, puis explore comment les variations de sinuosité et l'apparition de deltas se répartissent selon cette hiérarchie. Cette approche permet d'évaluer si la structure hiérarchique du réseau influence les changements morphologiques.

- Nombre de tronçons par ordre de Strahler

La Figure 20 met en évidence une prédominance des cours d'eau d'ordre 3, suivis des ordres 4 et 5. Ensemble, ces ordres supérieurs représentent plus de la moitié de l'échantillon total. Les ordres 1 et 2 sont également bien représentés, même s'ils sont légèrement moins nombreux.

Cette distribution relativement équilibrée permet d'examiner les dynamiques fluviales selon l'ordre des cours d'eau, en comparant les comportements à différentes échelles du réseau.

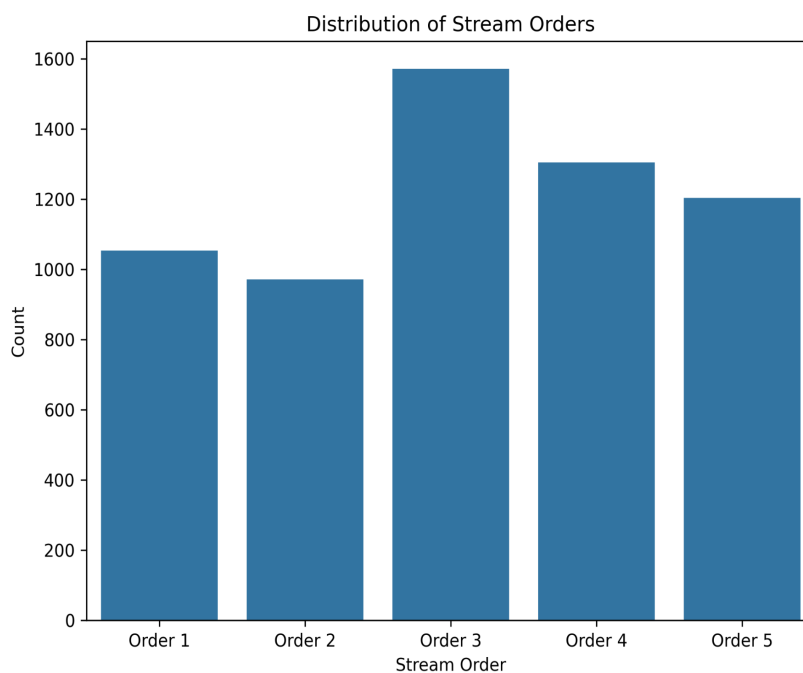


Figure 20 : Distribution des cours d'eau selon l'ordre de Strahler

- Répartition des changements de sinuosité selon l'ordre de Strahler

La Figure 21 illustre la proportion des changements de sinuosité en fonction de l'ordre de Strahler.

Les cours d'eau d'ordre 1 présentent une majorité de tronçons stables, avec toutefois une proportion marquée de segments montrant une augmentation de leur sinuosité. À l'inverse, les rivières d'ordre 2 affichent une part plus importante de tronçons ayant connu une diminution de sinuosité.

À partir de l'ordre 3, la stabilité devient prédominante, en particulier pour les cours d'eau d'ordre 5. Cette stabilité accrue pourrait s'expliquer par le fait que ces segments correspondent aux tronçons principaux du réseau hydrographique, moins sensibles aux perturbations locales et morphodynamiques (Figure 21).

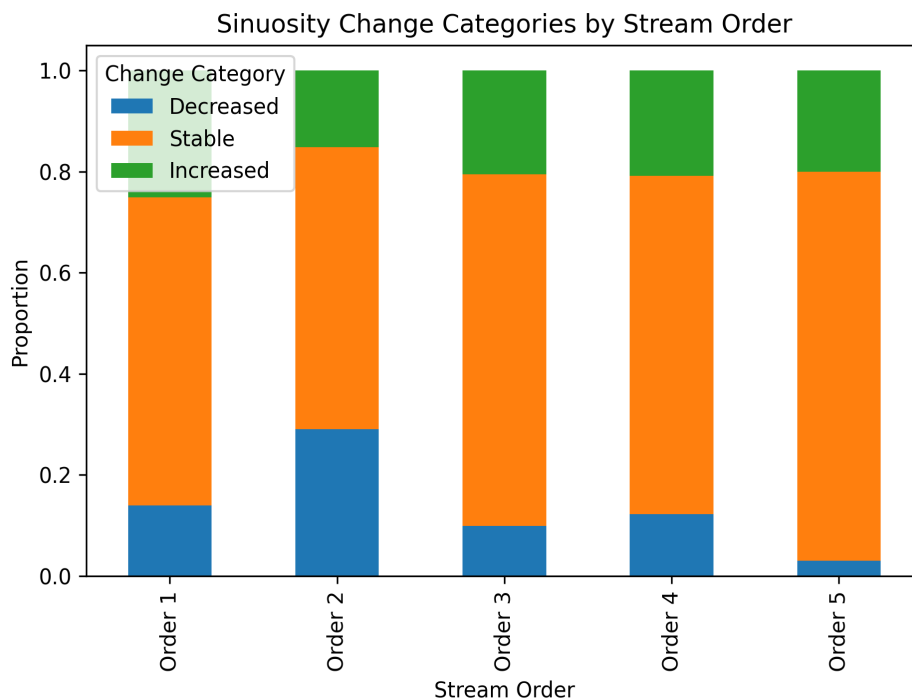


Figure 21 : Répartition des catégories de changement de sinuosité selon l'ordre des cours d'eau

- Évolution de la sinuosité selon l'ordre de Strahler

La Figure 22 montre l'évolution de la sinuosité moyenne entre 1959, 1974 et 2020 pour chaque ordre de Strahler, permettant de mieux visualiser les dynamiques propres à chaque niveau hiérarchique du réseau.

La sinuosité des cours d'eau évolue de manière différenciée selon l'ordre. Les cours d'eau de petit ordre (1 et 2) présentent une variabilité plus marquée, avec notamment une baisse importante en 1974 suivie d'une remontée. En revanche, les cours d'eau d'ordre supérieur, en particulier les ordres 3 et 5, montrent une sinuosité plus stable, suggérant une moindre sensibilité aux dynamiques locales et une plus grande résilience.

Les différences observées reflètent probablement l'influence de facteurs locaux spécifiques, comme l'altitude ou l'occupation du sol, déjà identifiés dans l'analyse des variables explicatives. Cela confirme l'intérêt d'une approche multifactorielle pour comprendre l'évolution de la sinuosité.

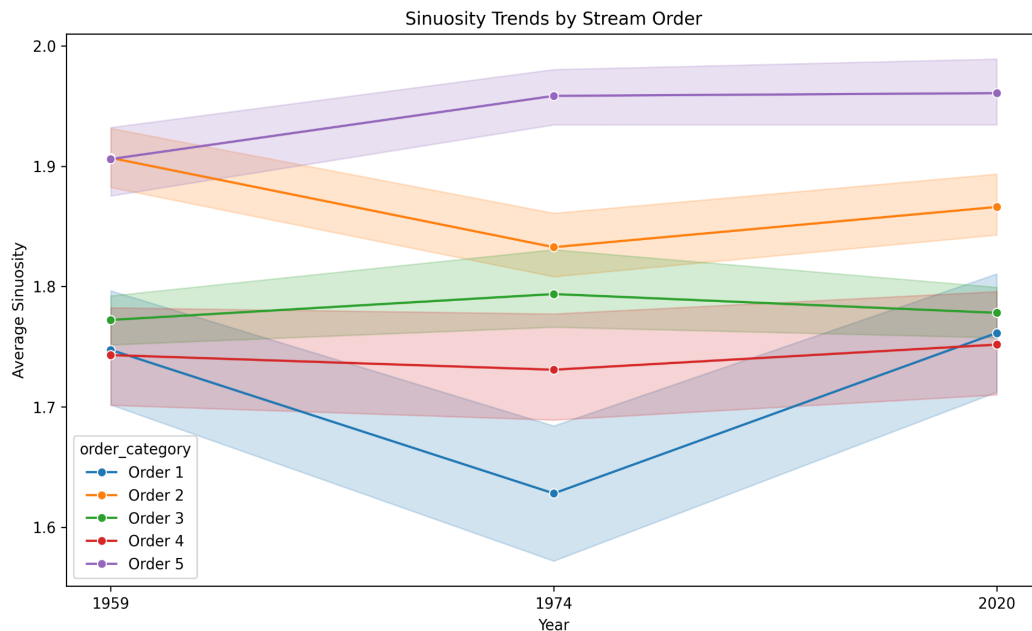


Figure 22 : Évolution de la sinuosité moyenne des cours d'eau selon l'ordre de Strahler (1959, 1974, 2020), avec bandes de confiance illustrant la variabilité interbassins

- Apparition des deltas selon l'ordre de Strahler

Aucune relation claire n'a pu être observée entre les facteurs environnementaux et l'apparition des deltas lorsqu'on distingue les cours d'eau par ordre de Strahler.

L'absence de résultats significatifs s'explique à la fois par le faible nombre de deltas recensés par ordre et par la complexité des facteurs impliqués (hydrodynamiques, géomorphologiques et anthropiques), difficile à saisir par les variables testées individuellement.

Bien que l'approche par ordre se soit montrée utile pour analyser la sinuosité, elle semble moins adaptée pour expliquer l'apparition des deltas dans ce contexte.

5.2.4. Analyse par clustering de bassins versants

Les bassins versants ont été regroupés en clusters selon leurs caractéristiques morphologiques, topographiques et environnementales. Cette classification met en évidence des groupes aux traits similaires, indépendamment de leur localisation, afin d'identifier d'éventuelles tendances communes sur la sinuosité et l'apparition de deltas.

- Sinuosité et formation de deltas : tendances générales par cluster

La Figure 23 permet de comparer la sinuosité actuelle et la fréquence d'apparition de deltas à l'échelle des clusters.

À la Figure 23 (a), certains clusters présentent une sinuosité moyenne actuelle nettement plus élevée que d'autres. Le cluster 5 se distingue particulièrement, avec une sinuosité plus élevée que la moyenne générale (indiquée par la ligne pointillée). Les clusters 8 et 9 présentent également des sinuosités relativement élevées.

Quant à la Figure 23 (b), celle-ci montre que le taux d'apparition des deltas entre 1974 et 2020 varie fortement selon les clusters, cette période ayant été retenue car elle correspond à la phase où le développement de deltas est plus fréquemment observé dans les données. Les clusters 5 et 9 se démarquent par des taux moyens élevés, tandis que les clusters 1, 4 et 6 présentent également des valeurs notables, bien que plus modérées.

Nous notons également une forte variabilité intra-cluster dans certains cas, notamment pour le cluster 5, comme en témoignent les barres d'erreur, tandis que d'autres clusters tels que le cluster 6 présentent des valeurs plus homogènes.

Ces observations soulignent l'intérêt de l'approche par clustering, qui permet de regrouper des bassins versants aux dynamiques fluviales similaires. Cette classification constitue ainsi un outil pertinent pour cibler les groupes de bassins nécessitant une analyse plus approfondie dans la suite du travail.

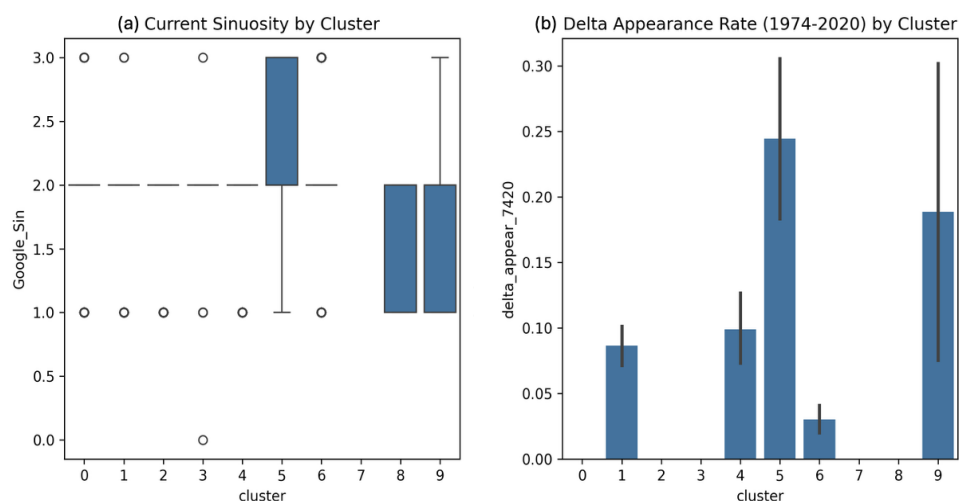


Figure 23 : Variabilité de la sinuosité (a) et du taux d'apparition des deltas (b) selon les clusters de bassins versants (1974-2020)

- Distribution spatiale des clusters

La Figure 24 présente la répartition spatiale des clusters identifiés à partir de l'analyse multivariée. Chaque couleur correspond à un groupe de bassins versants partageant des caractéristiques similaires.

Nous remarquons une forte concentration spatiale de certains groupes, notamment du cluster 6 (en vert clair), majoritairement localisé dans la partie centrale du territoire. À l'inverse, les bassins de cluster 9 (en jaune) sont exclusivement situés en bordure des lacs, ce qui est cohérent avec les taux élevés d'apparition de deltas observés dans ce groupe (Figure 24). De plus, nous observons que certains clusters sont faiblement représentés spatialement, ce qui implique que certaines tendances observées doivent être interprétées avec un certain recul.

Cette visualisation permet d'être complémentaire à l'étape précédente et ainsi de mieux cibler les zones géographiques où les dynamiques fluviales spécifiques, comme la formation de deltas, méritent d'être étudiées plus en détail dans la suite de l'analyse.

Spatial Distribution of Catchment Clusters

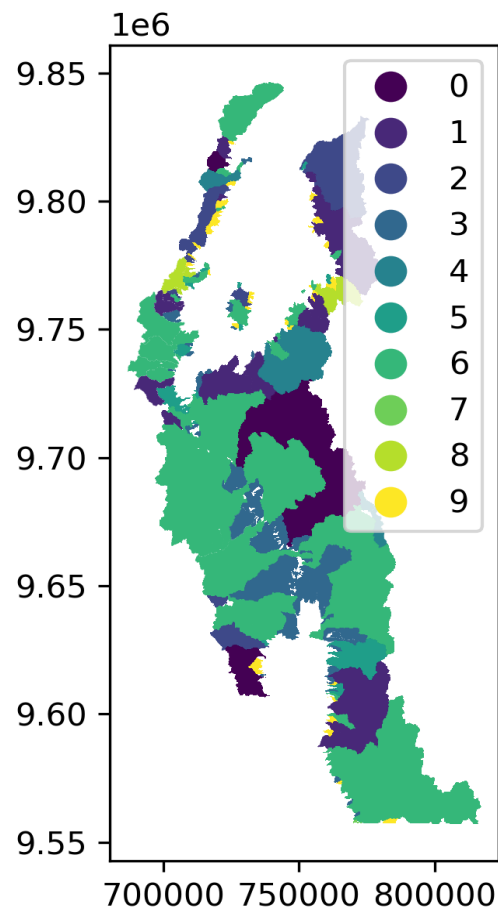


Figure 24 : Répartition spatiale des clusters de bassins versants. Chaque couleur correspond à un groupe aux caractéristiques similaires

5.2.5. Synthèse des facteurs explicatifs majeurs

Cette dernière section propose une synthèse des facteurs qui apparaissent comme les plus influents dans l'explication des dynamiques fluviales observées.

- Facteurs les plus influents selon l'ordre des cours d'eau

La Figure 25 présente les six variables les plus influentes sur la sinuosité pour les cours d'ordre 1 à 5, accompagnées des scores R^2 associés à chaque modèle.

Pour les ordres 1 et 2, les scores R^2 indiquent une capacité explicative modérée, permettant de faire ressortir quelques tendances. Pour l'ordre 1, les facteurs liés à la topographie (altitude), aux dynamiques hydro-sédimentaires (SPI) et à la susceptibilité aux glissements de terrain ressortent. Cela reflète le caractère plus naturel et contraint de ces petits tronçons.

En ce qui concerne l'ordre 2, ce sont les variables liées à l'humidité des sols (TWI) et aux changements de couverture forestière qui prennent davantage d'importance, suggérant une transition vers des influences plus variées.

Pour l'ordre 3, le modèle présente une capacité explicative très faible ($R^2 = -0,09$), ce qui indique de considérer les résultats avec prudence. Le changement de couverture forestière entre 1974 et 2020 domine nettement, suivis par la densité de glissements de terrain profonds et TWI moyen.

Pour l'ordre 4, le score R^2 reste également bas ($R^2 = 0,08$), mais la répartition des variables est un peu plus équilibrée. L'humidité du sol (TWI) et les changements de couverture forestière demeurent dominants.

À l'inverse, le modèle pour l'ordre 5 affiche une performance plus robuste ($R^2 = 0,35$). Il met en évidence un ensemble de facteurs plus diversifiés : le SPI, les changements de couverture forestière, la proportion de surfaces cultivées, ainsi que plusieurs indicateurs topographiques comme l'altitude et la rugosité. Ce résultat suggère un effet combiné de facteurs naturels et anthropiques sur la sinuosité des cours d'eau à cet ordre.

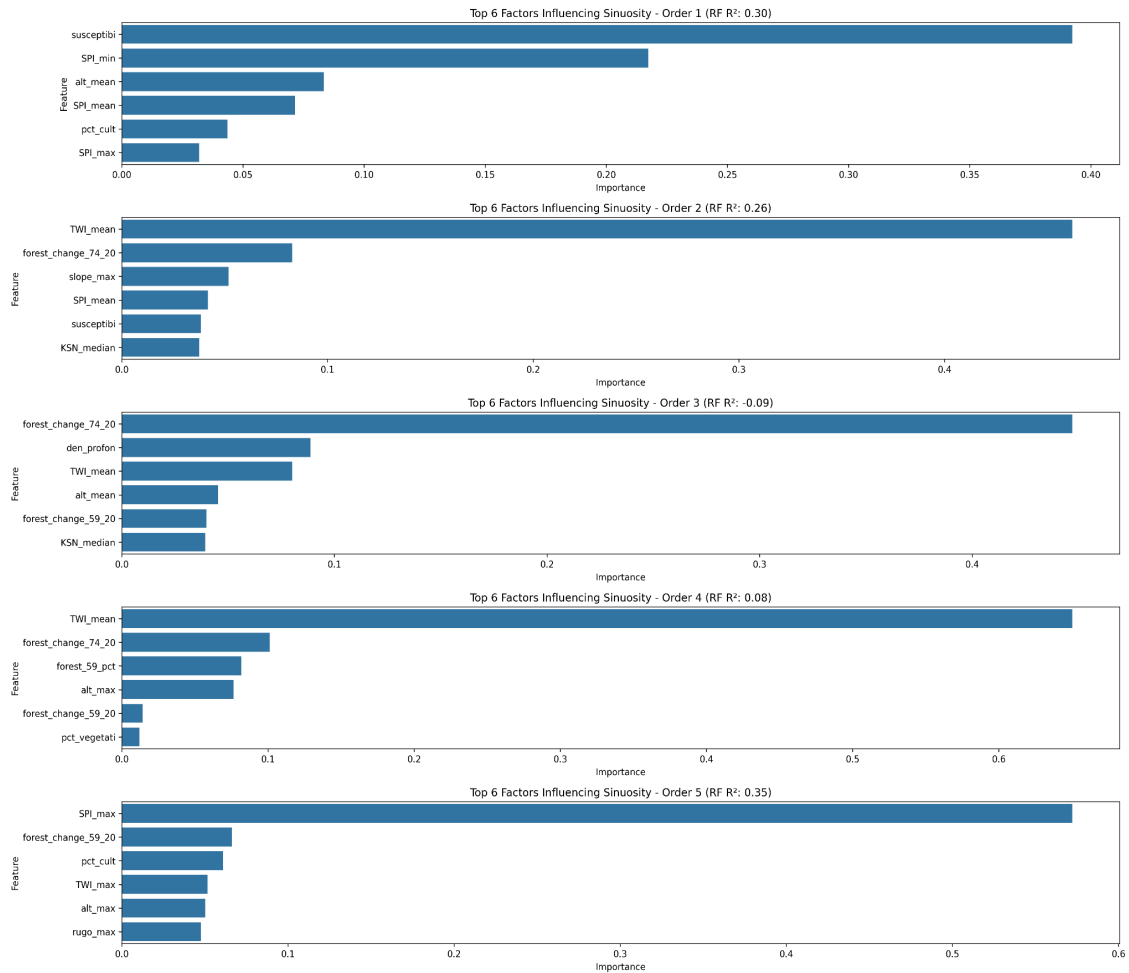


Figure 25 : Principaux facteurs de sinuosité par ordre de Strahler (six variables les plus influentes issues du modèle Random Forest)

Les résultats montrent que la nature des facteurs influençant la sinuosité varie selon l'ordre de Strahler, à l'exception des variables liées aux pressions anthropiques, qui demeurent présents quel que soit le niveau du réseau.

- Résumé des facteurs associés à la sinuosité et aux deltas

La Figure 26 propose une synthèse des six principales variables associées, d'une part, à la sinuosité actuelle des cours d'eau, et d'autre part, à l'apparition de deltas entre 1974 et 2020.

Concernant la sinuosité actuelle (Figure 26 (a)), ce sont principalement des facteurs topographiques et liés aux dynamiques sédimentaires qui ressortent comme influents, tels que l'altitude, le TWI, la densité de glissements de terrain profonds ou encore la rugosité de terrain. Le nombre de knickpoints émerge également comme un facteur significatif. L'impact anthropique est aussi représenté, notamment à travers le pourcentage de surfaces cultivées, qui influence la stabilité et l'évolution morphologique des cours d'eau.

En ce qui concerne l'apparition de deltas entre 1974 et 2020 (Figure 26 (b)), les variables explicatives reflètent également une influence conjointe de facteurs naturels et anthropiques. Nous retrouvons notamment la densité de glissements de terrain profonds, l'aspect, l'indice Ksn, les changements de couverture forestière (entre 1959 et 2020) ainsi que la proportion de zones bâties.

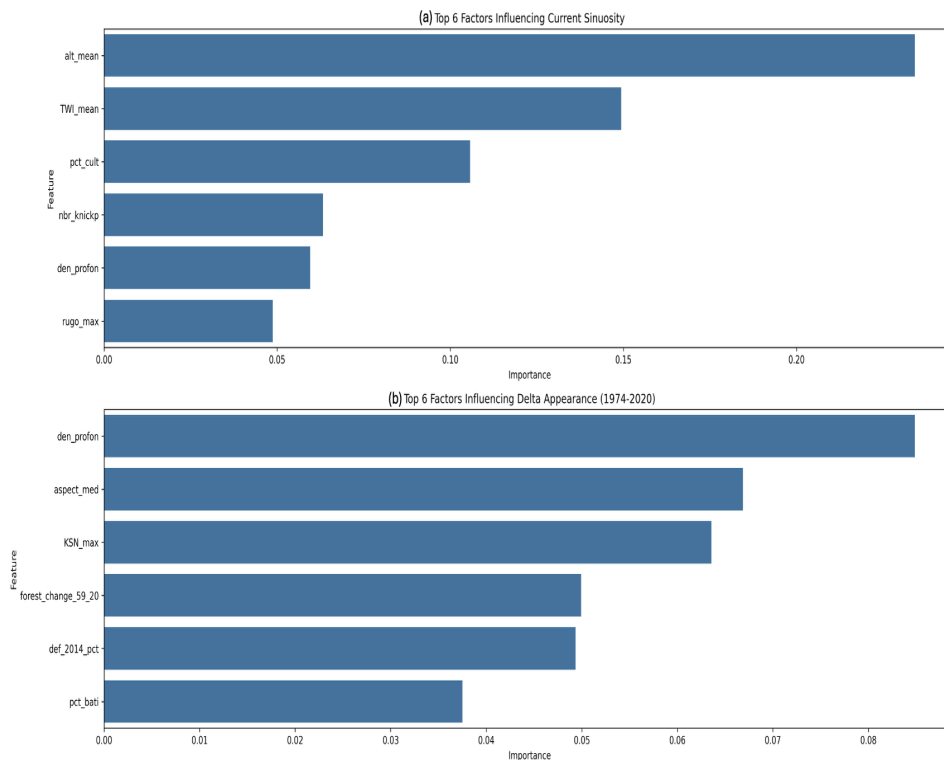


Figure 26 : Facteurs principaux de la sinuosité actuelle et de l'apparition de deltas (six variables les plus influentes selon le modèle Random Forest)

L'analyse multi-échelles met en évidence une stabilité globale de la sinuosité dans la majorité des bassins versants, malgré des variations locales et temporelles marquées. Les cartes et les modèles montrent, cependant, que certaines zones connaissent des augmentations ou diminutions significatives, liées à des combinaisons de facteurs environnementaux et anthropiques.

Les variables les plus récurrentes, concernant les changements de sinuosité et l'occurrence de deltas, sont l'humidité du sol (TWI), l'altitude, la couverture forestière et son évolution, la proportion de surfaces cultivées, ainsi que la densité de glissements de terrain. L'approche par ordre de Strahler confirme que la stabilité augmente dans les cours d'eau de plus grand ordre, tandis que les plus petits ordres présentent une variabilité plus forte, traduisant une sensibilité accrue aux perturbations locales. Quant à l'analyse des deltas, celle-ci montre des liens plus difficiles à établir, probablement en raison d'un nombre de données plus limitées que les cours d'eau.

Ces résultats constituent une base solide pour la suite de l'étude, en orientant l'attention vers les structures fluviales et les contextes morphologiques où les dynamiques sont les plus marquées.

5.3. Étude approfondie des clusters 5 et 9

À partir de l'analyse globale, les clusters 5 et 9 ont été retenus car ils présentent les variations les plus marquées de sinuosité et de formation de deltas (Figure 23).

L'objectif est d'examiner plus finement leurs caractéristiques afin de vérifier si les facteurs identifiés globalement se retrouvent localement et de mettre en évidence d'éventuels contrastes propres à ces groupes.

L'analyse distingue également les bassins situés à l'est et à l'ouest des lacs, afin d'évaluer l'influence potentielle des différences topographiques ou socio-économiques.

5.3.1. Distribution des bassins versants regroupés dans les clusters 5 et 9

Pour comparer les dynamiques propres aux rives est et ouest, il est essentiel de connaître la répartition spatiale de ces bassins versants.

Les bassins versants du cluster 5 sont plus nombreux et majoritairement situés sur la rive ouest de la zone d'étude. À l'inverse, ceux du cluster 9, bien que moins représentés en nombre, sont légèrement plus présents sur la rive est (Figure 27). Nous observons également sur la Figure 27 que les bassins du cluster 9 sont majoritairement situés le long des rives des lacs, tandis que ceux du cluster 5 sont plus dispersés, aussi bien à l'est qu'à l'ouest.

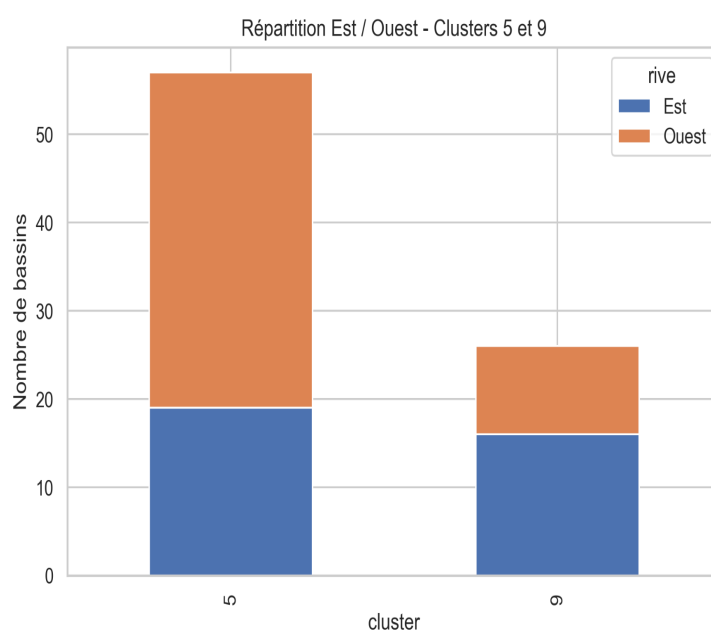


Figure 27 : Répartition des bassins des clusters 5 et 9 entre les rives est et ouest des lacs

Nous avons également examiné la distribution des surfaces de ces bassins pour mieux comprendre leurs dynamiques. Nous observons clairement une différence nette : les bassins du cluster 5 sont très hétérogènes, avec des surfaces parfois étendues, tandis que ceux du cluster 9 sont plus petites et homogènes (Figure 28).

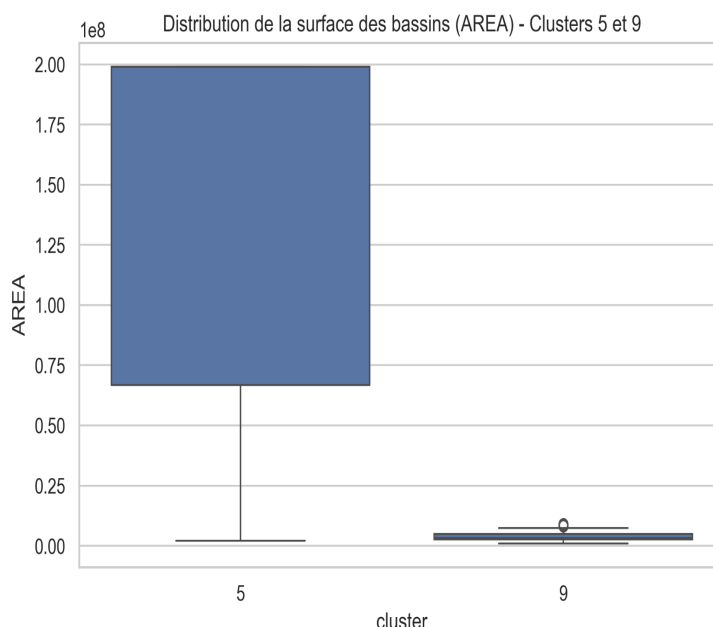


Figure 28 : Distribution des surfaces des bassins des clusters 5 et 9

5.3.2. Analyse comparative des facteurs par cluster

Afin de mieux comprendre les différences entre bassins situés sur les rives est et ouest, une analyse comparative des variables normalisées a été réalisée. Cette approche permet d'identifier les variables qui se distinguent nettement entre les deux rives.

Nous commençons par examiner les bassins versants regroupés dans le cluster 5 (Figure 29). Ce cluster regroupe majoritairement des bassins situés à l'ouest. Cette surreprésentation, combinée à la présence de valeurs extrêmes pour certains paramètres, peut accentuer visuellement les contrastes observés entre rives. Malgré cela, plusieurs tendances se dégagent.

À l'ouest, les altitudes maximales sont plus élevées, tandis que les altitudes moyennes restent relativement identiques entre rives. La pente et la rugosité suivent la même tendance : des valeurs maximales plus marquées à l'ouest, pour des valeurs moyennes similaires. En revanche, les rives diffèrent nettement par leur orientation dominante.

Pour l'humidité des sols et l'écoulement, les indices TWI et SPI moyens sont comparables entre les rives, mais les valeurs maximales sont plus élevées à l'ouest. Les écarts-types, élevés des deux côtés, traduisent toutefois une forte variabilité interne entre bassins d'une même rive.

La répartition des instabilités de terrain diffère également : les glissements de terrain sont plus nombreux à l'est, tandis qu'ils sont pratiquement absents à l'ouest. En termes de densité, ce sont les glissements profonds qui ressortent davantage à l'est.

Ces contrastes se retrouvent aussi dans l'occupation du sol. L'ouest est largement dominé par la végétation, avec peu de cultures et très peu de forêts. À l'est, au contraire, les cultures occupent la plus grande part, suivies par la végétation et les forêts. Le taux de surface bâtie, bien que faible par rapport aux autres variables, est légèrement plus élevé à l'est.

Enfin, même si leur présence reste limitée, les barrages sont un peu plus fréquents à l'est.

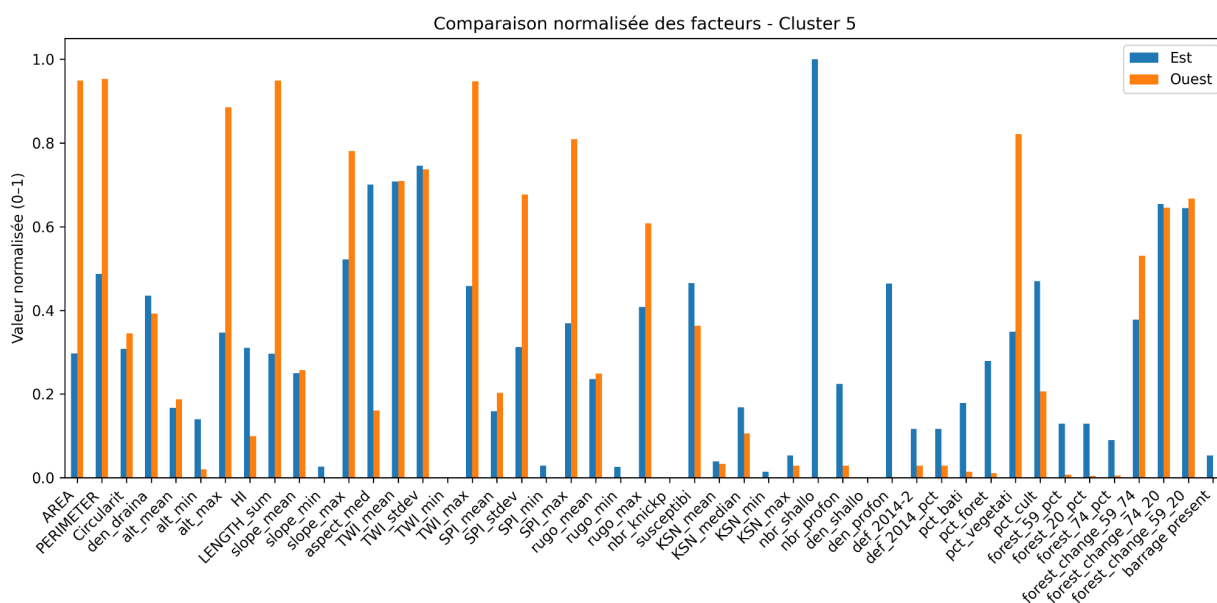


Figure 29 : Comparaison des facteurs normalisés du cluster 5 selon la localisation est (bleu) ou ouest (orange)

Pour les bassins de cluster 9, les contrastes entre rives est et ouest sont globalement moins prononcés (Figure 30).

Les altitudes moyennes sont similaires entre rives, tandis que la pente moyenne est légèrement plus élevée à l'ouest. La rugosité suit la même tendance, avec des valeurs plus marquées à l'ouest. À l'inverse, l'aspect se distingue davantage à l'est. La circularité des bassins est également plus importante à l'ouest, bien que la différence reste modérée.

Pour l'humidité et l'écoulement, le TWI moyen est proche pour les deux rives et les écarts-types sont comparables, indiquant une variabilité interne semblable. Le SPI, en revanche, présente des valeurs moyennes plus élevées à l'ouest, associées à des écart-types également plus importants, traduisant une hétérogénéité plus marquée dans les conditions d'écoulement sur cette rive.

L'indice Ksn reste faible en moyenne, quel que soit la rive, mais la médiane est plus élevée à l'ouest, ce qui traduit la présence de certains bassins à pentes et d'énergie de cours d'eau plus marquées. Les valeurs minimales, également plus hautes à l'ouest, illustrent une amplitude importante des conditions observées.

Concernant les instabilités de terrain, la densité de glissements profonds est élevée des deux côtés, avec une importance plus marquée à l'ouest. La densité de glissements peu profonds est faible dans l'ensemble, mais reste un peu plus marquée à l'ouest.

L'occupation du sol est dominée par la végétation sur l'ensemble du cluster, avec une présence renforcée à l'ouest. Les cultures sont légèrement plus fréquentes à l'est, tandis que les changements de couverture forestière sont importants sur les deux rives. Le taux de surface bâtie reste faible dans les deux cas, avec des valeurs un peu plus basses à l'ouest.

Enfin, les barrages sont peu nombreux mais légèrement plus présents à l'est.

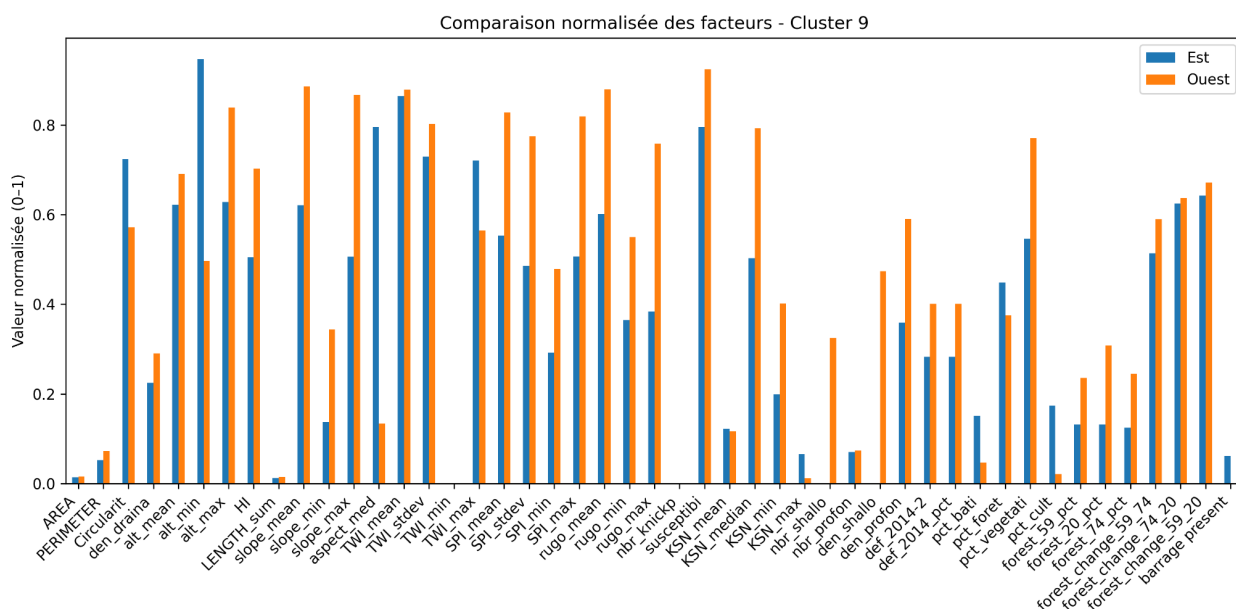


Figure 30 : Comparaison des facteurs normalisés du cluster 9 selon la localisation est (bleu) ou ouest (orange)

L'analyse des clusters 5 et 9 confirme l'influence des principaux facteurs identifiés à l'échelle globale, tout en révélant des contrastes est-ouest liés aux contextes topographiques et environnementaux. Ces résultats doivent toutefois être interprétés en tenant compte des déséquilibres de répartition des bassins qui peuvent amplifier certaines différences apparentes.

6. Discussion

Cette partie met en perspective les résultats obtenus dans le contexte du rift NTK. L'objectif est de comprendre les tendances observées, en distinguant le rôle des facteurs naturels et des pressions humaines, d'évaluer ce que la méthode utilisée apporte, ainsi que les pistes d'amélioration possibles.

6.1. Interprétation et apports de l'étude à la compréhension des processus

Les résultats montrent une stabilité globale de la sinuosité dans la majorité des bassins versants du rift NTK, mais avec des variations parfois marquées à l'échelle fine.

Ce contraste - stabilité régionale et variabilité locale - est caractéristique des systèmes fluviaux tropicaux, où pressions anthropiques et contraintes naturelles interagissent avec une intensité variable selon les contextes locaux (Meadows & Thomas, 2009 ; Walsh & Blake, 2009).

Les facteurs explicatifs identifiés confirment ce rôle combiné. Les variables liées au relief (altitude, pente, rugosité), à l'hydrologie (TWI, SPI) et à l'occupation du sol apparaissent comme déterminantes. La déforestation et l'agriculture intensive, largement documentées dans la région (Bibentyo *et al.*, 2024 ; Depicker *et al.*, 2021a), constituent des moteurs récurrents de modification morphologique, notamment par l'augmentation de la connectivité et des apports sédimentaires vers les zones littorales (Jolivet, 2025 ; Lizaga *et al.*, 2025).

Un autre facteur marquant est la fréquence élevée des glissements de terrain, qui ressort nettement dans les résultats et joue un rôle direct sur la dynamique fluviale. Ces instabilités, souvent déclenchées par la combinaison de fortes pentes, de précipitations intenses et de pressions anthropiques (déforestation, cultures sur versants), contribuent à des apports massifs de sédiments (Depicker *et al.*, 2021a, 2021b ; Meadows & Thomas, 2009 ; Walsh & Blake, 2009 ; Wohl *et al.*, 2012). Ces glissements sont une composante essentielle des paysages tropicaux, et encore plus au sein du rift NTK, où ils influencent la connectivité entre versants - réseaux hydrographiques. Leur prise en compte est donc indispensable pour comprendre les contrastes observés entre les bassins.

Les clusters 5 et 9 illustrent bien cette diversité morphologiques et anthropiques :

- Le cluster 5 se caractérise par un relief abrupt et des pentes fortes à l'ouest, et une rugosité élevée, créant des conditions favorables à un ruissellement intense et à une érosion concentrée. La répartition des instabilités de terrain accentue ce contraste : elles sont pratiquement absentes à l'ouest, alors qu'à l'est, les glissements de terrain sont beaucoup plus nombreux, en particulier les glissements profonds. Ces instabilités s'ajoutent aux pratiques agricoles et à l'exploitation des versants, renforçant les transferts sédimentaires vers les chenaux. Dans les deux clusters, la déforestation constitue un facteur aggravant, mais son impact varie selon la proportion de végétation restante. À l'ouest, une couverture forestière importante subsiste, elle tend à freiner la dispersion sédimentaire, alors qu'à l'est, la végétation résiduelle est limitée et les cultures dominantes, favorisant le transfert de sédiments vers l'aval.
- Le cluster 9, en revanche, présente un relief moins contrasté, mais la rive ouest se distingue par des pentes moyennes plus élevées, un SPI plus fort et un indice Ksn supérieur, indiquant un potentiel énergétique localement important pour la mobilisation sédimentaire. Concernant les instabilités de terrain, la densité de glissements profonds est élevée dans l'ensemble du cluster, avec une importance plus marquée à l'ouest. Les glissements peu profonds restent plus rares, mais apparaissent aussi davantage sur la rive ouest. Toutefois, la forte présence de végétation dense et de forêts dans ce cluster joue probablement un rôle de régulation, en limitant localement l'intensité des processus érosifs. Néanmoins, la présence de deltas témoigne de transferts sédimentaires bien réels, suggérant que ces glissements et les apports diffus restent suffisamment importants pour alimenter des dynamiques de dépôt à l'exutoire.

Ces résultats rejoignent d'autres études en contexte tropical qui soulignent que la morphologie et la pente des bassins conditionnent la capacité érosive, tandis que l'usage du sol en module l'intensité et la répartition (Depicker *et al.*, 2021a ; Jolivet, 2025 ; Meadows & Thomas, 2009 ; Walsh & Blake, 2009).

Au-delà de la description des dynamiques, cette étude apporte une meilleure compréhension de la variabilité spatiale des trajectoires fluviales sur plus de 70 ans dans une région peu étudiée. Elle met en évidence que la stabilité régionale apparente masque des dynamiques locales

intenses, dont l'ampleur et la nature dépendent de la combinaison entre contraintes physiques et pressions anthropiques propres à chaque bassin.

Il est enfin important de mettre en perspective ces contrastes locaux avec les tendances globales. Dethier *et al.* (2022) montrent que les flux sédimentaires ont fortement augmenté au XX^e siècle dans les zones tropicales, principalement sous l'effet de l'intensification des usages du sol. Yanites *et al.* (2025) estiment que plus de 70% des fluctuations hydrologiques actuelles sont liées aux pressions humaines. Les dynamiques observées dans le rift NTK confirment ainsi que les pressions locales s'inscrivent dans des trajectoires plus larges, caractéristiques des bassins tropicaux fortement anthropisés.

6.2. Pertinence de la méthodologie et de l'inventaire réalisé

L'utilisation conjointe d'orthomosaïques historiques, d'imagerie satellitaire récente et de données morphométriques issues d'un DEM a permis de constituer une base spatio-temporelle étendue et homogène. Cette approche compense le manque de données continues sur le terrain tout en offrant une précision suffisante pour détecter des évolutions morphologiques, y compris dans de petits bassins versants. Elle a abouti à la création d'un jeu de données unique, couvrant plus de 300 bassins sur près de 25 000 km², soit une superficie comparable à celle de la Belgique.

La typologie produite constitue un atout majeur. Elle repose sur des indicateurs simples à identifier, ne nécessite pas de données lourdes et reste reproductible dans d'autres contextes, y compris dans d'autres régions où l'information est limitée.

La méthodologie combine une analyse multi-temporelle, la hiérarchisation des réseaux hydrographiques et une classification par clusters, permettant d'examiner à différentes échelles les facteurs influençant la morphologie des cours d'eau :

- L'approche par hiérarchie a montré que l'impact des facteurs varie selon le rang des cours d'eau, du ruisseau (ordre 1) au tronçon principal (ordre 5).
- L'analyse par clusters a permis d'identifier des configurations types de bassins, facilitant la compréhension des contrastes morphologiques et fournissant un cadre pertinent pour orienter de futures campagnes de terrain ou cibler des analyses plus fines.

Ainsi, l'inventaire obtenu couvre un large ensemble de bassins répartis sur trois pays avec, lorsque les données le permettaient, un suivi sur près de 70 ans. Dans un contexte où les données sont rares et souvent fragmentaires (Depicker *et al.*, 2024 ; Dewitte *et al.*, 2021 ; Jolivet, 2025 ; Kubwimana *et al.*, 2021), il constitue une ressource unique pour documenter les dynamiques hydro-sédimentaires à long terme.

6.3. Limites et perspectives de recherche

Cette étude présente plusieurs limites liées à la nature des données et aux choix méthodologiques.

D'abord, la résolution et la précision spatiale des sources sont hétérogènes.

Les orthomosaïques et les images satellites ne disposent pas toutes du même niveau de précision, ce qui peut entraîner de légers décalages dans l'identification du tracé des cours d'eau et influencer la mesure de paramètres, comme la sinuosité ou la position des deltas.

La qualité des photographies aériennes n'est pas toujours optimale, notamment en raison de la conservation sur papier (Kubwimana *et al.*, 2021), mais aussi de la présence fréquente de nuages ou d'ombres portées qui peuvent masquer une partie du paysage et compliquer l'interprétation. De plus, des distorsions géométriques peuvent apparaître en fonction de l'angle de prise de vue, altérant la représentation réelle des objets (Samyn, 2024). Ces facteurs affectent la netteté et la qualité des images et peuvent limiter la distinction fine des unités paysagères.

La continuité temporelle et spatiale des données constitue également une limite. Dans le cas de notre étude, certaines séries remontent jusqu'à 70 ans, tandis que d'autres couvrent des périodes plus courtes. De plus, il se peut que certaines archives soient absentes, ce qui empêche d'obtenir une continuité spatiale et temporelle optimale.

Ces contraintes peuvent biaiser l'inventaire et la lecture des dynamiques, par exemple, en compliquant la distinction entre différentes catégories de végétation, en risquant de surestimer ou de sous-estimer les phases de déforestation, ou encore en créant des incertitudes dans le suivi du tracé fluvial. Ces limites n'invalident pas les tendances générales observées mais doivent être prises en compte dans les comparaisons temporelles et spatiales.

Un autre point concerne le travail manuel d'interprétation, ce qui demande un temps conséquent et limite la rapidité des traitements. Ce choix s'explique toutefois par l'hétérogénéité des sources de données utilisées (orthomosaïques anciennes et images satellites récentes). Dans ce contexte, une automatisation complète n'était pas envisageable, et l'approche manuelle restait la seule manière de garantir une cohérence dans les observations.

Par ailleurs, les analyses statistiques et de modélisation présentent aussi certaines limites. La classification en clusters et la hiérarchisation des réseaux permettent de mettre en évidence des tendances générales, mais simplifient la complexité des processus en jeu. Ces méthodes offrent une lecture globale robuste, mais au prix d'une perte de détails sur les spécificités locales.

Malgré ces contraintes, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées.

Une première piste d'amélioration consisterait à affiner l'analyse de la végétation riveraine en mobilisant des données multispectrales (Yichun *et al.*, 2008), notamment le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) issu des archives Landsat. Une telle approche permettrait de caractériser plus précisément l'état et l'évolution de la végétation dans des bandes définies autour des cours d'eau. Comme le soulignent Yichun *et al.* (2008), il est d'autant intéressant d'appliquer cette méthode à des échelles fines, afin d'obtenir des résultats pertinents et de meilleure résolution. Elle pourrait ainsi contribuer à tester l'influence réelle du couvert végétal sur les dynamiques fluviales observées, en mettant en évidence d'éventuels seuils de dégradation ou de modification de la végétation associés à des variations mesurables de sinuosité ou à la formation de deltas. Ces informations pourraient également être intégrées comme variables explicatives dans la modélisation (clusters, hiérarchie), afin d'évaluer dans quelle mesure le couvert végétal constitue un indicateur pertinent des trajectoires hydro-sédimentaires. Néanmoins, cette option reste limitée par la disponibilité des images, qui ne sont disponibles qu'à partir des années 1990, et par leur résolution spatiale relativement faible (30 à 60 mètres), ce qui complique l'application d'analyses détaillées basées sur le NDVI ou d'autres indices de végétation.

Il serait également intéressant de travailler à une échelle plus fine, afin de mieux suivre l'évolution des deltas et des processus sédimentaires associés. Un tel suivi reste toutefois envisageable uniquement pour les deltas de taille suffisante et détectables sur des images à résolution modérée, telles que celles de Landsat ou Sentinel-2. Leur cartographie, replacée dans le contexte de leur bassin versant, constituerait un indicateur intéressant des dynamiques fluviales et sédimentaires, tout en permettant d'examiner plus en détail l'influence des facteurs environnementaux et anthropiques.

Enfin, l'analyse pourrait être enrichie par l'intégration d'autres facteurs explicatifs. Les données climatiques, comme la pluviométrie ou l'intensité des événements extrêmes, offriraient une meilleure compréhension du rôle des précipitations, déjà identifiées comme déclencheur majeur des glissements de terrain dans la région (Depicker *et al.*, 2021b ; Kubwimana *et al.*, 2021). Comme le rappellent Shekar et Mathew (2024), l'intérêt réside dans la combinaison de ces variables avec des données.

Les activités minières constituent également une pression importante, en favorisant la mobilisation de sédiments vers les cours d'eau (Depicker *et al.*, 2021a, 2024). Leur intégration, par le biais d'un inventaire local, permettrait d'en mesurer plus précisément l'impact. Dans ce sens, Faisal et Hayakawa (2023) proposent un outil de connectivité sédimentaire capable d'estimer la mobilisation des sédiments depuis les pentes jusqu'au réseau hydrographique.

De la même manière, l'ajout de variables hydrologiques, telles que les débits, la charge sédimentaire ou la granulométrie, apporterait des éléments essentiels pour mieux relier relief, occupation du sol et trajectoires fluviales, et affiner la compréhension des transferts sédimentaires entre amont et aval.

7. Conclusion

Cette étude a mis en évidence la complexité des dynamiques fluviales dans les bassins versants du Kivu et du Tanganyika, en croisant une grande diversité de facteurs géomorphologiques et anthropiques. Les analyses montrent que l'occupation du sol, en particulier l'expansion des surfaces cultivées et les changements liés à la déforestation, joue un rôle déterminant dans l'évolution de la sinuosité et l'apparition de deltas. Ces influences humaines s'articulent avec des contraintes topographiques fortes, telles que l'altitude, les indices hydrologiques (TWI, SPI) ou encore des instabilités de terrain (densité de glissements profonds). Ces facteurs révèlent l'importance des interactions entre processus naturels et pressions anthropiques.

La démarche méthodologique, combinant analyses exploratoires, modélisation par Random Forest et regroupements par clustering, a permis de renforcer la robustesse des résultats et de dégager des tendances cohérentes malgré la diversité des bassins. Les clusters ont notamment mis en évidence des types de bassins versants partageant des dynamiques fluviales identiques, ce qui souligne la pertinence d'une approche comparative pour mieux comprendre les mécanismes en jeu.

Ces résultats rappellent que les dynamiques fluviales dans les environnements tropicaux ne peuvent être expliquées par un facteur isolé, mais par la combinaison de conditions physiques et de pressions humaines, dont les effets s'additionnent. Ils ouvrent également des perspectives en soulignant l'importance d'intégrer conjointement facteurs géomorphologiques et anthropiques, et montrent l'intérêt d'approfondir la dimension temporelle (en intégrant davantage de séries historiques), d'explorer les interactions avec le climat, ou encore de coupler cette approche avec des observations de terrain.

8. Bibliographie

- Bibentyo, T. M., Dille, A., Depicker, A., Smets, B., Vanmaercke, M., Nzolang, C., Dewaele, S. & Dewitte, O. (2024). Landslides, bedrock incision and human-induced environmental changes in an extremely rapidly formed tropical river gorge. *Geomorphology*, 449, 109046. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109046>
- Bierman, P. R. & Montgomery, D. R. (2014a). Channels. In W.H. Freeman and Company, *Key concepts in geomorphology*. New-York, 179-216.
- Bierman, P. R. & Montgomery, D. R. (2014b). Coastal and Submarine Geomorphology. In W.H. Freeman and Company, *Key concepts in geomorphology*. New-York, 253-287.
- Birkel, C., Duvert, C., Correa, A. & Breñal, A. (2023). Preface special issue: "Processes and patterns in tropical hydrology". *Hydrological Processes*, 37(7). <https://doi.org/10.1002/hyp.14931>
- Cazenave-Piarrot, A., Ndayirukiye, S. & Valton, C. (2015). *Atlas des pays du Nord-Tanganyika*. IRD Éditions, Institut de recherche pour le développement.
- CDSE. (2021). *Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (Version 1.1)*. Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE). <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM>. Consulté le 01 mai 2025
- CIA. (2025a). *Burundi – Country Factsheet*. Central Intelligence Agency (CIA). <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/burundi/>. Consulté le 11 juillet 2025
- CIA. (2025b). *Rwanda – Country Factsheet*. Central Intelligence Agency (CIA). <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/rwanda/>. Consulté le 11 juillet 2025
- CIA. (2025c). *Congo, Democratic Republic of the – Country Factsheet*. Central Intelligence Agency (CIA). <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/congo-democratic-republic-of-the/factsheets/>. Consulté le 11 juillet 2025
- Delvaux, D., Mulumba, J. L., Sebagenzi, M. N. S., Bondo, S. F., Kervyn, F. & Havenith, H. B. (2017). Seismic hazard assessment of the Kivu rift segment based on a new seismotectonic zonation model (western branch, East African Rift system). *Journal of African Earth Sciences*, 134, 831-855. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.004>
- Depicker, A., Jacobs, L., Mboga, N., Smets, B., Van Rompaey, A., Lennert, M., Wolff, E., Kervyn, F., Michellier, C., Dewitte, O. & Govers, G. (2021a). Historical dynamics of landslide risk from population and forest-cover changes in the Kivu Rift. *Nature sustainability*, 4(11), 965-974. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00757-9>
- Depicker, A., Govers, G., Jacobs, L., Campforts, B., Uwihirwe, J. & Dewitte, O. (2021b). 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-9-445-2021>

- Depicker, A., Govers, G., Jacobs, L., Vanmaercke, M., Uwihirwe, J., Campforts, B., Kubwimana, D., Maki Mateso, J.-C., Mugaruka Bibentyo, T., Nahimana, L., Smets, B. & Dewitte, O. (2024). Mobilization rates of landslides in a changing tropical environment: 60-year record over a large region of the East African Rift. *Geomorphology*, 454, 109156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109156>
- Dethier, E. N., Renshaw, C. E. & Magilligan, F. J. (2022). Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans. *Science*, 376(6600), 1447-1452. <https://doi.org/10.1126/science.abn7980>
- Dewitte, O., Dille, A., Depicker, A., Kubwimana, D., Maki Mateso, J. C., Mugaruka Bibentyo, T., Uwihirwe, J. & Monsieurs, E. (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>
- Enabel. (2023). *Programme de coopération bilatérale entre le Royaume de Belgique et la République Démocratique du Congo 2023-2027*. Agence belge de coopération internationale (Enabel). <https://www.enabel.be/app/uploads/2023/11/Annexe-8-Strategie-Sud-Kivu.pdf>. Consulté le 10 août 2025
- ESA. (2021). *Worldwide land cover mapping*. European Space Agency (ESA). <https://esa-worldcover.org/en>. Consulté 17 juin 2025
- Faisal, B. R. & Hayakawa, Y. S. (2023). Geomorphometric characterization and sediment connectivity of the middle Brahmaputra River basin. *Geomorphology*, 429, 108665. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108665>
- Gazi, M. Y., Hossain, F., Sadeak, S. & Uddin, M. M. (2020). Spatiotemporal variability of channel and bar morphodynamics in the Gorai-Madhumati River, Bangladesh using remote sensing and GIS techniques. *Frontiers of Earth Science*, 14, 828-841. <https://doi.org/10.1007/s11707-020-0827-z>
- Greenberg, E. & Ganti, V. (2024). The pace of global river meandering influenced by fluvial sediment supply. *Earth and Planetary Science Letters*, 634, 118674. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118674>
- Harsha, J., Ravikumar, A. S. & Shivakumar, B. L. (2020). *Evaluation of morphometric parameters and hypsometric curve of Arkavathy river basin using RS and GIS techniques*. *Applied Water Science* 10: 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1164-9>
- HDX. (2021). *Limites de la RDC et de 20 pays avoisinants*. Humanitarian Data Exchange (HDX). <https://data.humdata.org/dataset/limites-de-la-rdc-et-de-20-pays-avoisinants-drc-and-neighbouring-countries>. Consulté le 12 juillet 2025
- Hou, X., Xie, D., Feng, L., Shen, F. & Nienhuis, J. H. (2024). Sustained increase in suspended sediments near global river deltas over the past two decades. *Nature Communications*, 15(1), 3319. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47598-6>

- Huang, H., Liu, J., Guillaumot, L., Chen, A., de Graaf, I. E. & Chen, D. (2025). Contrasting impacts of irrigation and deforestation on Lancang-Mekong River Basin hydrology. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 107. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02093-8>
- INSBU. (2024). *Effectif de la population résidente par province, commune selon le sexe et le rapport de masculinité*. Institut National de la Statistique du Burundi (INSBU). <https://www.insbu.bi/PopulationDataPageM>. Consulté le 9 août 2025
- Jolivet, M. (2025). Avulsion of the Nyabarongo River into Lake Rweru (Rwanda) Under Anthropogenic Pressure: Morpho-Sedimentary and Ecological Implications. *Wetlands*, 45(6), 75. <https://doi.org/10.1007/s13157-025-01966-0>
- Kubwimana, D., Ait Brahim, L., Nkurunziza, P., Dille, A., Depicker, A., Nahimana, L., Abdelouafi, A. & Dewitte, O. (2021). Characteristics and distribution of landslides in the populated hillslopes of Bujumbura, Burundi. *Geosciences*, 11(6), 259. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060259>
- Le Monde. (2025). *RDC: l'ONU dénonce les attaques du M23, qui a tué "au moins 319 civils" en juillet*. https://www.lemonde.fr/afrique/article/2025/08/06/rdc-l-onu-denonce-les-attaques-du-m23-qui-a-tue-au-moins-319-civils-en-juillet_6627149_3212.html. Consulté le 10 août 2025
- Lizaga, I., Bagalwa, M., Latorre, B., Van Oost, K., Navas, A., Blake, W. & Boeckx, P. (2025). Tracing the trail of eroded fertile soils during a high intensity rainfall event: A fingerprinting study in war-torn tropical mountains. *Journal of Environmental Management*, 373, 123573. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123573>
- Masolele, R. N., Marcos, D., De Sy, V., Abu, I. O., Verbesselt, J., Reiche, J. & Herold, M. (2024). Mapping the diversity of land uses following deforestation across Africa. *Scientific Reports*, 14(1), 1681. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52138-9>
- Mawe, G. I., Landu, E. L., Imwangana, F. M., Hubert, A., Dille, A., Biolders, C. L., Poesen, J., Dewitte, O. & Vanmaercke, M. (2024). What controls the expansion of urban gullies in tropical environments? Lessons learned from contrasting cities in DR Congo. *Catena*, 241, 108055. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108055>
- Meadows, M. & Thomas, D. (Eds.). (2009). Tropical savannas. In Slaymaker, O., Spencer, T. & Embleton-Hamann, C. (eds), *Geomorphology and global environmental change*. Cambridge University Press, 248-269.
- Nienhuis, J. H., Ashton, A. D., Edmonds, D. A., Hoitink, A. J. F., Kettner, A. J., Rowland, J. C. & Törnqvist, T. E. (2020). Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain. *Nature*, 577(7791), 514-518. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1905-9>
- NISR. (2022). *Population size and population characteristics*. National Institute of Statistics of Rwanda (NISR). <https://www.statistics.gov.rw/statistical-publications/population-size-and-population-characteristics>. Consulté le 9 août 2025

- Nsabimana, J., Henry, S., Ndayisenga, A., Kubwimana, D., Dewitte, O., Kervyn, F. & Michellier, C. (2023). Geo-hydrological hazard impacts, vulnerability and perception in Bujumbura (Burundi): a high-resolution field-based assessment in a sprawling city. *Land*, 12(10), 1876. <https://doi.org/10.3390/land12101876>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn : Apprentissage automatique en Python. *Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.
- Petropoulos, G. P., Kalivas, D. P., Griffiths, H. M. & Dimou, P. P. (2015). Remote sensing and GIS analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two Mediterranean river deltas: The case of the Axios and Aliakmonas rivers, Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.004>
- Samyn, M. (2024). *The potential of historical aerial imagery for imaging and studying environmental changes in tropical Africa - A case-study of Burundi*. Mémoire de master en sciences géographiques, Louvain-La-Neuve, KU Leuven, inédit, 106 p.
- Shekar, P. R. & Mathew, A. (2022). Evaluation of morphometric and hypsometric analysis of the Bagh River basin using remote sensing and geographic information system techniques. *Energy Nexus*, 7, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100104>
- Shekar, P. R. & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. *Watershed Ecology and the Environment*, 6, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>
- Stive, M., Cowell, P. & Nicholls, R. (Eds.). (2009). Beaches, cliffs and deltas. In Slaymaker, O., Spencer, T. & Embleton-Hamann, C. (eds), *Geomorphology and global environmental change*. Cambridge University Press, 158-176.
- UNDP. (2020). *Annuaire statistique RDC 2020*. United Nations Development Programme (UNDP). <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/cd/UNDP-CD-ANNUAIRE-STAT.-2020-.pdf>. Consulté le 10 août 2025
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Broeckx, J. & Nyssen, J. (2014). Sediment yield in Africa. *Earth-Science Reviews*, 136, 350-368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.06.004>
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Govers, G. & Verstraeten, G. (2015). Quantifying human impacts on catchment sediment yield: A continental approach. *Global and Planetary Change*, 130, 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.04.001>
- Vanmaercke, M., Chen, Y., Haregeweyn, N., De Geeter, S., Campforts, B., Heyndrickx, W., Tsunekawa, A. & Poesen, J. (2020). Predicting gully densities at sub-continental scales: a case study for the Horn of Africa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(15), 3763-3779. <https://doi.org/10.1002/esp.4999>

- Walsh, R. & Blake, W. (Eds.). (2009). Tropical rainforests. *In* Slaymaker, O., Spencer, T. & Embleton-Hamann, C. (eds), *Geomorphology and global environmental change*. Cambridge University Press, 214-243.
- Wohl, E., Barros, A., Brunsell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., Goldsmith, S., Harmon, R., Hendrickx, J., Juvik, J., McDonnell, J. & Ogden, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 2(9), 655-662.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1556>
- World Bank Group. (2025a). *The World Bank in Burundi*.
<https://www.worldbank.org/en/country/burundi/overview>. Consulté le 11 juillet 2025
- World Bank Group. (2025b). *The World Bank in Rwanda*.
<https://www.worldbank.org/en/country/rwanda/overview>. Consulté le 11 juillet 2025
- World Bank Group. (2025c). *The World Bank in DRC*.
<https://www.worldbank.org/en/country/drc/overview>. Consulté le 11 juillet 2025
- Yanites, B., Clark, M., Roering, J., West, A., Zekkos, D., Baldwin, JW, Cerovski-Darriau, C., Gallen, S., Horton, D., Kirby, E., Leshchinsky, B., Mason, B., Moon, S., Barnhart, K., Booth, A., Czuba, A., McCoy, S., McGuire, L., Pfeiffer, A. & Pierce, J. (2025). Cascading land surface hazards as a nexus in the Earth system. *Science*, 388 (6754).
<https://doi.org/10.1126/science.adp9559>
- Yichun Xie, Zongyao Sha. & Mei Yu. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, Volume 1, Issue 1, Pages 9–23.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>

9. Annexes

Annexe 1 : Données géologiques et lithologiques

Age	Chronostratigraphy	Lithostratigraphy	Main lithological constitution
10 Ka–present	Late Quaternary	Recent volcanics	Lava, tuff, and ash, deposited in the past decades and centuries, a result of eruptions of the Nyiragongo and Nyamulagira.
2–1 Ma	Early Quaternary	Young volcanics	Relatively fresh basalts, deposited at ± 2 Ma.
12–6 Ma	Neogene	Old volcanics	Highly weathered basalt, deposited at 11–4 Ma.
23 Ma–present	Late Cenozoic	Rift sediments	Sand along the lake or swamps more inland.
360–201 Ma	Karoo		Black shales, tillite, not metamorphosed.
1000–540 Ma	Neoproterozoic	Itombwe	Black shales, tillite, silicified tillite, weakly metamorphosed.
		Malagarasi	Black shales, tillite, silicified tillite, weakly metamorphosed. Presence of dolomites and volcanic rocks (basalts).
820–720 Ma	Mesoproterozoic	Alcaline complexes	Granitic rocks, intrusive volcanic rocks (rhyolite).
1375–980 Ma		Granites	Two-mica and leucogranites.
1600–1000 Ma		Kivu	Pelites, quartzopelites, and quartzites at different degrees of weathering. Moderately metamorphosed.
2500–1600 Ma	Paleoproterozoic	Ruzizi and ante-Ruzizi	Gneiss and micaschists, prone to chemical weathering, and quartzites, resistant to weathering. Strongly metamorphosed.
4000–2500 Ma	Archaen		Gneiss and micaschists, prone to chemical weathering, and quartzites, resistant to weathering.

Figure 31 : Âge et composition des 12 unités lithologiques (Depicker et al., 2021b)

Annexe 2 : Synthèse de la typologie et méthodologie d'analyse

Catégorie de la typologie	Description et modalités de codage
Sinuosité	Type de chenal observé : 1 = droit, 2 = sinueux, 3 = tressé, 4 = anastomosé, 0 = aucune rivière, 6 = visible uniquement sur Google Earth
Delta	1 = présent ; 0 = absent
Barrage	1 = présent ; 0 = absent
Végétation	Type de végétation observé : f = forêt, cp = terres cultivées et prairies, v = végétation, nv = aucune végétation
Extra	Observations supplémentaires ; détails à consulter dans les tableaux ??
Coordonnées de la rivière	Localisation précise du tronçon de rivière observé
Coordonnées du delta	Localisation du delta identifié
Coordonnées du barrage	Position du barrage situé sur le tronçon observé
Coordonnées d'un delta secondaire	Autre delta présent dans la même cellule de la grille
Coordonnées d'un second barrage	Second barrage identifié sur le même tronçon de rivière

Figure 32 : Typologie utilisée pour caractériser des rivières

Annexe 3 : Corrélations exploratoires

Annexe 3 a : Variables géomorphologiques et dynamiques fluviales

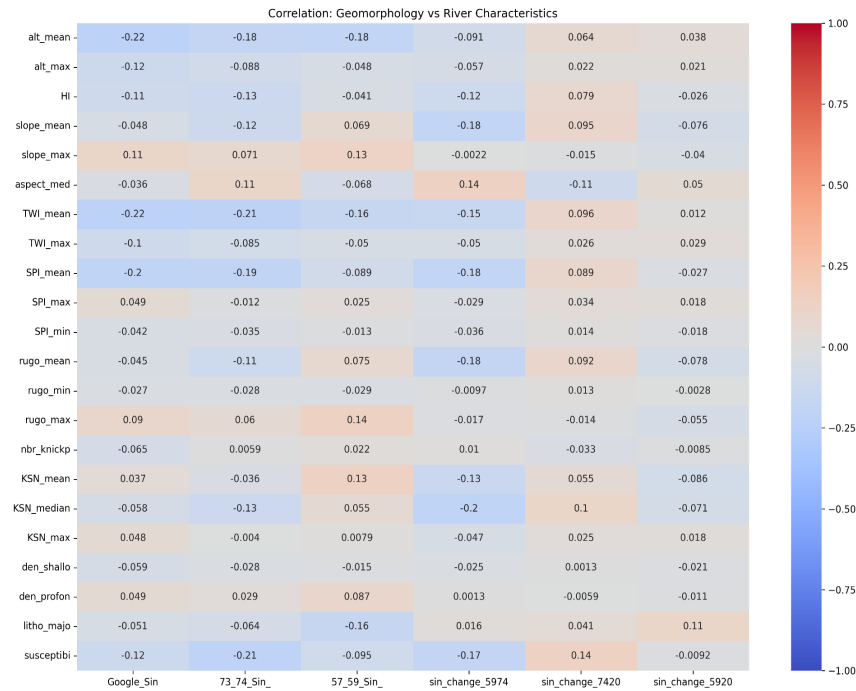


Figure 33 : Corrélation entre variables géomorphologiques et dynamiques fluviales

Annexe 3 b : Occupation du sol et caractéristiques fluviales

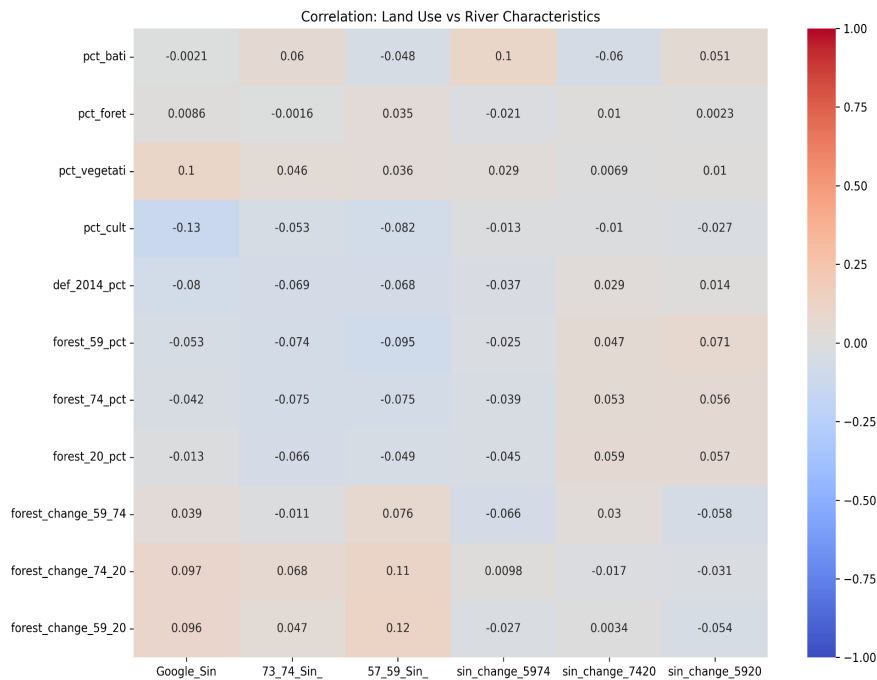


Figure 34 : Corrélation entre occupation du sol et dynamiques fluviales

Annexe 4 : Multicolinéarité entre variables explicatives

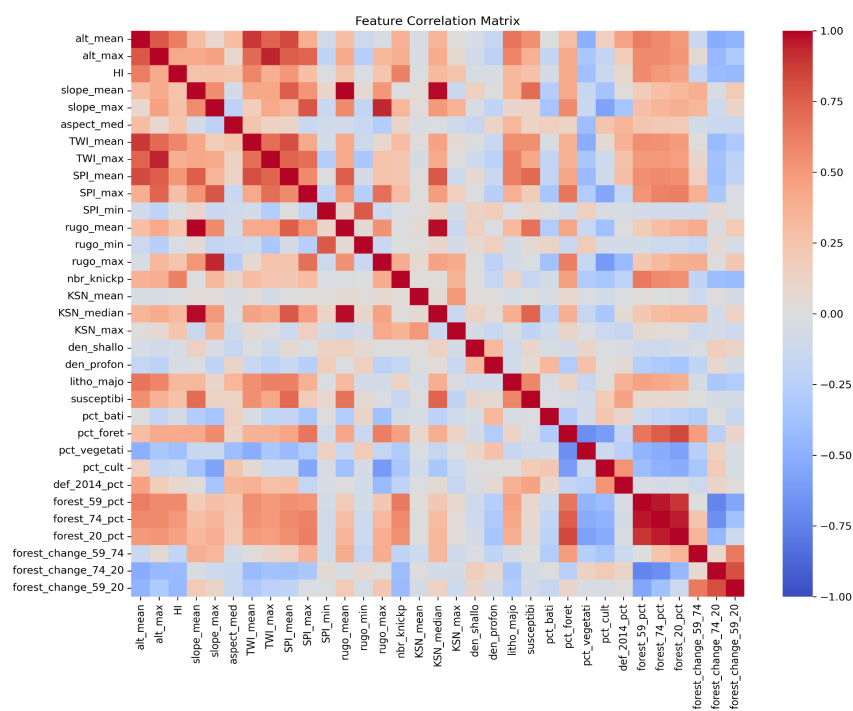


Figure 35 : Corrélation entre variables explicatives (multicolinéarité)

Annexe 5 : Évolution des deltas au cours du temps

Évolution spatiale des deltas autour des lacs Kivu et Tanganyika

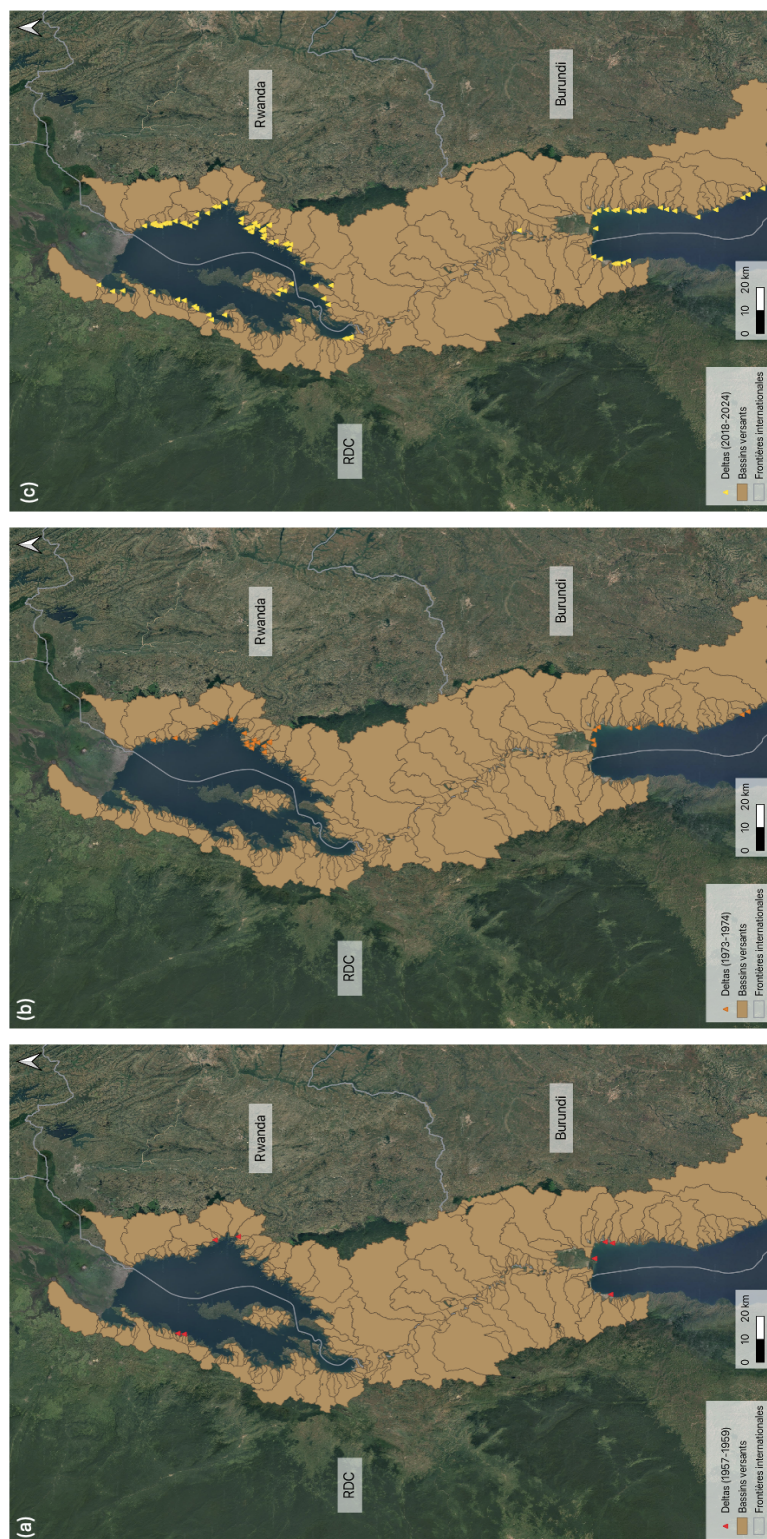


Figure 36 : Formation des deltas sur les 70 dernières années

Annexe 6 : Répartition spatiale des variations de sinuosité des cours d'eau

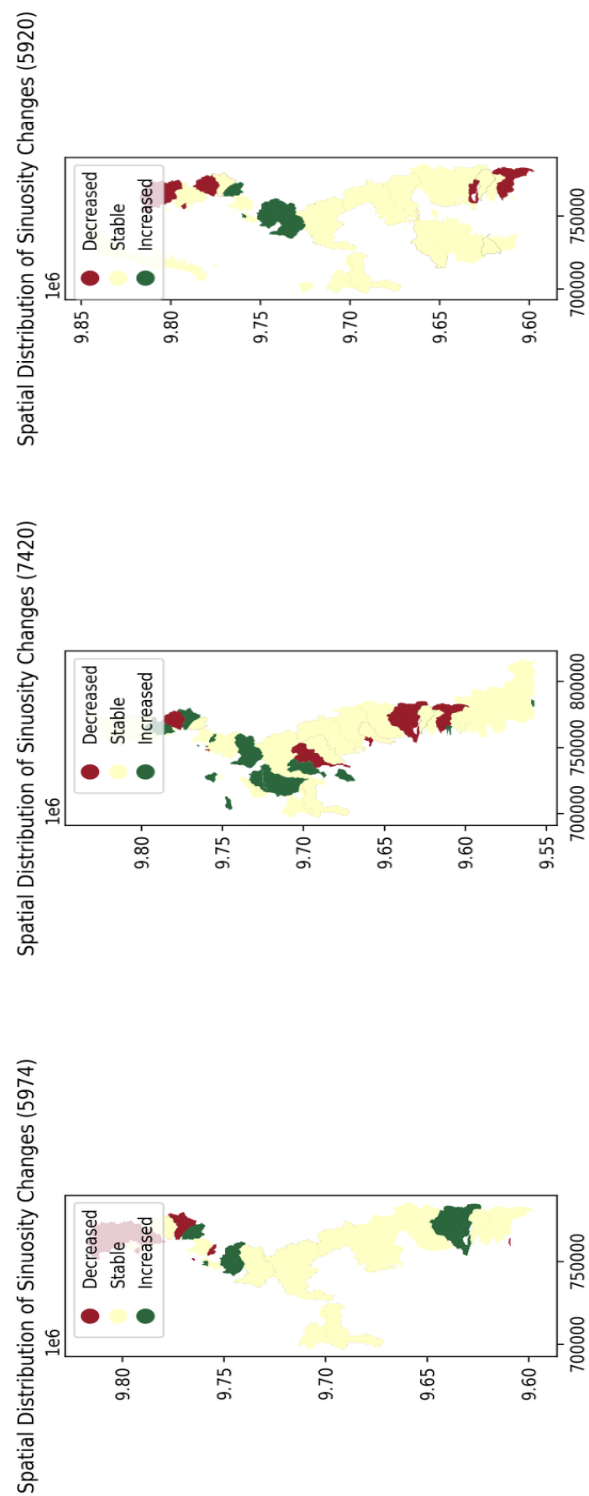


Figure 37 : Changements spatiaux de sinuosité (1957-1974, 1974-2020, 1959-2020)

Annexe 7 : Scripts Python

Le code Python développé pour l'analyse des bassins versants est disponible en ligne sur GitHub : <https://github.com/Victotoria/code-memoire>.

Ce dépôt contient les scripts utilisés pour le traitement des données et l'analyse statistique présentée dans ce mémoire. Ce code a été écrit à l'aide d'outils d'assistance numérique.