

Cartographie de l'érosion hydrique des sols et priorisation des mesures de conservation dans le territoire d'Uvira (République démocratique du Congo)

Jean Nacishali Nteranya

Volume 20, numéro 3, décembre 2020

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1079347ar>

DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.28888>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Nacishali Nteranya, J. (2020). Cartographie de l'érosion hydrique des sols et priorisation des mesures de conservation dans le territoire d'Uvira (République démocratique du Congo). *VertigO*, 20(3).
<https://doi.org/10.4000/vertigo.28888>

Résumé de l'article

L'érosion des sols est un risque naturel qui est exacerbé par les activités anthropiques en République démocratique du Congo. Cependant, il existe peu d'information sur la spatialisation de ce phénomène à l'échelle territoriale. Cette étude est basée sur l'utilisation du modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) et des données en accès libre pour cartographier les zones à risque d'érosion et faire la priorisation des zones pour la conservation des sols dans le territoire d'Uvira. Au regard de résultats, 52,79 % du territoire est caractérisé par un risque d'érosion faible tandis que 47,21 % font face à un risque de perte de sol supérieure à la limite tolérable de 11 t/ha/an dans le contexte des paysages tropicaux et montagneux. Ce risque est accentué par la perte du couvert végétal au profit de l'extension des zones urbaines et agricoles. Le faible niveau de sensibilité à l'érosion se trouve au niveau de la plaine de la Ruzizi tandis que les zones situées dans les plateaux présentent une forte sensibilité en raison de leur relief accidenté et une pluviosité forte. L'analyse statistique des rapports de fréquence des glissements de terrain montre l'existence d'une relation entre leur occurrence et les zones d'intensité d'érosion. La modélisation de la perte de sol en fonction des différentes méthodes de protection de sol montre que l'approche de mise en place des bandes enherbées et l'aménagement des terrasses sont les plus appropriés pour réduire le risque d'érosion dans ce secteur. Ces méthodes peuvent être associées aux efforts d'afforestation pour une protection efficace des sols.



Cartographie de l'érosion hydrique des sols et priorisation des mesures de conservation dans le territoire d'Uvira (République démocratique du Congo)

Jean Nacishali Nteranya

Introduction

- 1 Le territoire d'Uvira, situé en République Démocratique du Congo (RDC), fait partie intégrante du Rift est-africain. Cette région a subi ces dernières années une recrudescence des risques hydro-climatiques avec des conséquences souvent catastrophiques. Le territoire d'Uvira en particulier est en proie à des problèmes d'érosion (Ongezo *et al.*, 2014) qui menacent les écosystèmes du lac Tanganyika, dégrade les sols, les ressources hydriques et les infrastructures urbaines. Ce problème est exacerbé par le contexte topographique, climatique, géologique et démographique particulier de ce territoire. En effet, le changement d'occupation de terre a favorisé l'extension des zones agricoles et urbaines au détriment des zones forestières. Par ailleurs, suite à une croissance démographique galopante dans la cité d'Uvira et suite aux contraintes foncières, la population qui était jadis concentrée au niveau des plaines alluviales tend à occuper aussi les zones à forte altitude qui présentent une forte susceptibilité aux risques d'érosion et au glissement des terrains.
- 2 Pour maintenir la productivité dans cette zone, assurer l'habitabilité à long terme et contribuer à la protection de la biodiversité, une gestion durable des terres s'avère nécessaire. C'est ainsi que les recherches sur la cartographie des risques d'érosion sont importantes pour la planification de l'aménagement du territoire et la conservation des ressources afin d'atteindre les objectifs de développement durable dans le territoire

d'Uvira. Plusieurs approches sont utilisées dans la cartographie du risque d'érosion. Il existe des approches empiriques, semi-empiriques et physiques. L'approche par mesure directe est la plus fiable, mais demande un coût énorme en termes de temps et d'argent pour la collecte des données (Ganasri et Ramesh, 2015). C'est ainsi qu'à l'absence des stations de suivi permanentes de perte de sol par l'érosion, l'approche par la modélisation utilisant le Système d'Information géographique (SIG) peut permettre de donner une première approximation du risque d'érosion à l'échelle d'un bassin versant ou d'un territoire plus large en identifiant les zones à haut risques (Tamene *et al.*, 2017; Tadesse *et al.*, 2017). Cette approche contribue également à la priorisation des zones pour la conservation (Singh et Kumar, 2017; Gashaw *et al.* 2017).

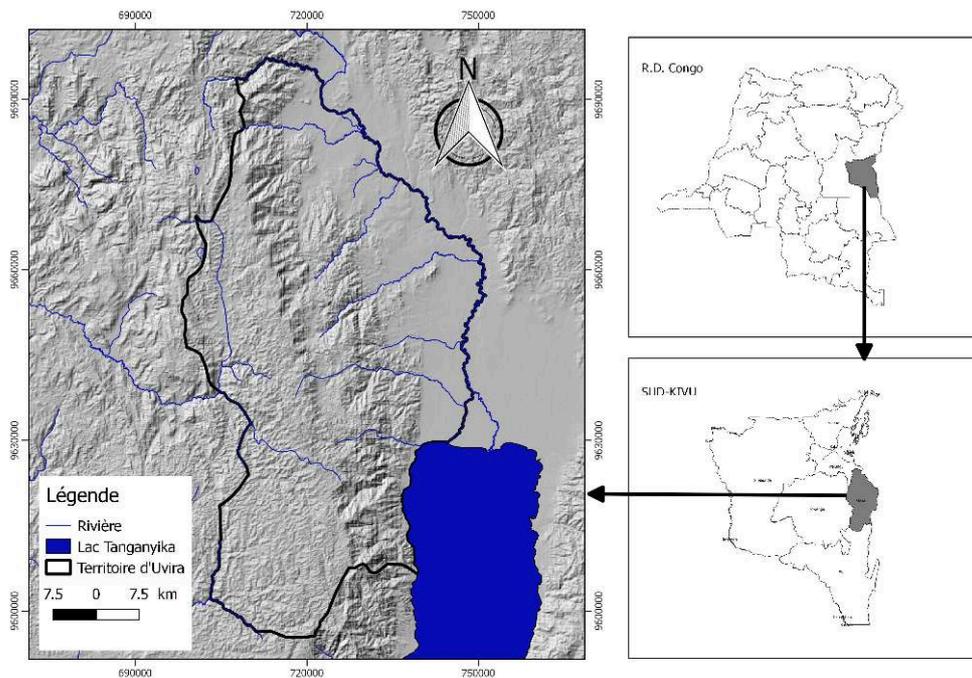
- 3 Dans le territoire d'Uvira, quelques études ont associé le SIG et le modèle SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) pour déterminer les sources de sédiment au niveau des sous-bassins du Lac Tanganyika. C'est le cas des travaux de Ongezo *et al.* (2014) dans le micro-bassin de Mulongwe et de Azanga *et al.* (2016) dans le micro-bassin versant de Kalimabenge. Ces travaux ne portent que sur des superficies limitées en raison du manque des données hydrométéorologiques de terrain (données météorologiques, données de débit fluvial, des flux de sédiments et des nutriments) qui sont nécessaires pour calibrer et valider le modèle SWAT sur de vastes étendues et pour une longue période. Il manque cependant des informations à l'échelle du territoire pour guider le choix de décideur lors de l'aménagement du territoire d'Uvira. C'est dans ce contexte que ce travail tente de montrer comment l'intégration des données multisources à accès libre au travers l'utilisation d'un SIG libre (QGIS et SAGA GIS) et l'Équation universelle de perte de sol (USLE) de Wischmeier et Smith (1978) offrent une possibilité pour la cartographie rapide et à moindre coût du risque d'érosion hydrique à l'échelle du territoire. Cette approche permettra de déterminer les zones prioritaires pour la conservation des terres.

Matériel et méthode

Milieu d'étude

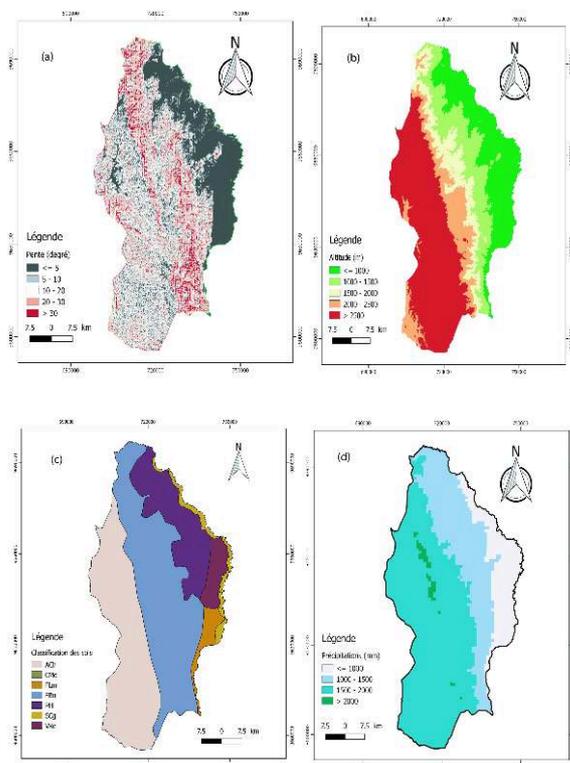
- 4 Le territoire d'Uvira est situé dans la province du Sud-Kivu en République démocratique du Congo (RDC). Il est limité au nord par le territoire de Walungu, au sud par le territoire de Fizi, à l'est par le Lac Tanganyika et la rivière Ruzizi, à l'ouest par le territoire de Mwenga (Figure 1). Il présente un réseau hydrographique très dense constitué du lac Tanganyika et des rivières qui prennent naissance dans la chaîne des Mitumba située à l'Ouest à plus de 1500 m d'altitude.

Figure 1. Localisation du territoire d'Uvira / Location of the Uvira territory.



- 5 Le territoire d'Uvira se situe dans la branche occidentale du Rift Est-Africain qui est caractérisé par une morphologie en escalier des failles faite d'une succession des horsts et de graben (Ilunga, 1991). Son soubassement géologique est constitué des formations précambriennes et des formations récentes d'ère quaternaire. Les formations anciennes sont du burundien, plissées et métamorphisées. On y trouve les gneiss, quartzites, micaschistes, amphibolites, schistes, granites. Quant aux formations du Quaternaire, on peut distinguer: les alluvions anciennes sablo-graveleuses, avec de grands blocs des roches précambriennes; les diverses formations du delta de la Ruzizi et les dépôts de la plage actuelle (Ilunga, 1991). Son relief est caractérisé par deux grands ensembles géomorphologiques nettement distincts: la plaine littorale et le versant oriental de la chaîne des Monts Mitumba (Ilunga et Alexandre, 1982). Se référant aux données disponibles dans la base des données SOTERCAF, 7 unités des sols sont répertoriées dans le territoire d'Uvira (Figure 2). Les ferrassols humiques, les acrisols hapliques et les phaeozems luviques sont les plus prépondérantes et représentent respectivement 40,30; 33,09 et 16,35 % de la superficie totale tandis que les cambisols dystriques, les mollis fluvisols, solonchaks gleyiques et les vertisols eutriques sont les moins prépondérantes et représentent respectivement 0,01; 2,95; 3,08 et 4,22 % de la superficie totale.

Figure 2. Pente (a), Altitude (b), Type des sols (c) et Précipitation annuelle (d) dans le territoire d'Uvira / Slope (a), Altitude (b), Soil type (c) and Annual precipitation (d) in the territory of Uvira.



ACh (Haplic Acrisols), CMD (Dystric Cambisols), FLm (Mollie Fluvisols), FRu (Humic Ferralsols), PHI (Luvic Phaeozems), SCg (Gleyic Solonchaks), VRe (Eutric Vertisols)

- 6 Le territoire d'Uvira est caractérisé par des altitudes contrastées qui augmentent de l'est vers l'ouest avec des valeurs allant de 767 m à 3291 m. L'altitude moyenne est de 1945 m. La pente varie entre 0 et 57° avec une moyenne de 12,54°. Les pentes faibles se trouvent à l'est du territoire au niveau de la plaine de Ruzizi et des rivages du lac Tanganyika. Par contre, les pentes fortes sont au centre du territoire et dans le versant oriental de la chaîne des monts Mitumba qui sont entaillés par les cours d'eau qui prennent naissance et formant des vallées très encaissées. Ce territoire jouit d'un climat tropical qui est contrasté par son relief qui s'élève progressivement de l'est vers l'ouest. Ce climat est marqué par une alternance d'une saison de pluie allant du septembre en avril et d'une saison sèche qui va de mai en août (Ngumbu, 2004). Les précipitations annuelles varient entre 868 mm et 2041 mm avec une moyenne de 1525 mm. Au niveau de la cité d'Uvira, les précipitations sont inférieures à 1000 mm, mais avec l'accroissement de l'altitude, les précipitations sont comprises entre 1000 et 2000 mm au niveau des hauts plateaux au centre et à l'Ouest (Figure 2).

Données et méthode

- 7 Les données utilisées (Tableau 1) sont de différentes sources et ont été projetées dans le système WGS 84, UTM zone 35 Sud. Il s'agit des données climatiques issues de la base des données Wordclim2.0¹, les données pédologiques issues de la base des données *Soil and Terrain database of Central Africa* (SOTERCAF1.0)², les données SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) et les images Landsat 7 du 30 août 2016 et du 19 août 2006 issues du site de l'USGS³ pour voir l'évolution de la densité du couvert végétal sur une période de

10 ans. Ces données ont permis d'estimer les paramètres de l'Équation universelle des pertes de sol (USLE - Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier et Smith (1978). Ce modèle permet de calculer les pertes en sol annuelles moyennes possibles à long terme (A) par l'érosion hydrique en fonction des paramètres climatiques, topographiques, pédologiques et le mode d'usage et de conservation des terres. Cette équation est définie par:

- $A = R * K * LS * C * P$, A (en t/ha.an)
- R l'indice d'érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h.an),
- K l'indice d'érodibilité des sols (t.ha.h/ha.MJ.mm),
- LS le facteur topographique (adimensionnel),
- C le facteur de végétation (adimensionnel),
- P le facteur de pratique de soutien ou facteur de protection (adimensionnel).

Tableau 1. Données utilisées / Used data.

Type de données	Facteur associé	Format	Échelle / Taille du Pixel	Source des données
SRTM	LS	Raster (Géo Tif)	30 m	http://earthexplorer.usgs.gov
Climat	R	Raster (ESRI grids)	1 km	Wordclim2.0 http://worldclim.org/version2
Carte pédologique	K	Vecteur (Shape)	1/2000000	SOTERCAF1.0 www.isric.org
Landsat 7	C	Raster (Shape)	30 m	http://earthexplorer.usgs.gov

- 8 Le facteur R a été calculé grâce à l'équation $R = - 8.12 + (0.562 \times P)$ (Hurni, 1985; Belayneh *et al.*, 2019), P étant la précipitation moyenne annuelle calculée grâce aux données climatiques Wordclim2.0 de 1950 à 2000 (Fick et Hijmans, 2017). Le choix de cette équation est dicté par la disponibilité des données d'entrées et le contexte (climatique et géographique) du secteur d'étude. En effet, l'équation USLE dans sa forme originale requiert des données d'intensité de précipitation pour calculer le facteur R (Wischmeier et Smith 1978). Cependant, suite à l'absence des données d'intensité des pluies dans certaines régions, c'est notamment le cas pour le secteur d'Uvira, des équations empiriques des corrélations entre R et la précipitation moyenne annuelle (P) ont été établies pour faciliter le calcul de R (Lo *et al.*, 1985; Renard et Freimund, 1994; Roose, 1977; Hurni, 1985; Nguyen, 1996). Ces équations ont été développées pour être utilisées dans des contextes géographiques et climatiques spécifiques. En Afrique, Roose (1977) a établi une relation simple entre l'érosivité annuelle moyenne R (ft tons inch acre⁻¹ h⁻¹ year⁻¹) et la précipitation annuelle P (mm) pour l'Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire, Burkinafaso, Sénégal, Niger, Chad, Cameroun et Madagascar):

$$R = \alpha P \text{ avec } 0,45 \leq \alpha \leq 0,55$$

- 9 Cette équation a été utilisée dans le passé en R.D. Congo par Ndolo (2015) dans le bassin versant de la rivière Ndjili. Toutefois, cette relation n'est pas valide dans les régions montagneuses, dans les zones côtières ainsi que dans les zones tropicales de transition entre 1 et 2 saisons de pluie (Roose, 1977). Étant donné que le territoire d'Uvira fait partie des paysages montagneux de la branche occidentale du Rift est africain, l'équation de Roose (1977) n'est plus applicable dans ce secteur. C'est ainsi que, dans le cadre de cette étude, l'équation de Hurni (1985), préalablement développée pour le contexte de l'Éthiopie, a été utilisée. Le choix de cette équation se justifie par le fait qu'elle est applicable dans les zones montagneuses du Rift est africain, jouissant d'un climat sub-tropical avec une gamme des variations des précipitations qui est similaires à celle du territoire d'Uvira. En effet, cette équation a été appliquée dans des zones montagneuses où les précipitations moyennes annuelles varient entre 1024 mm et 2091 mm (Gashaw *et al.*, 2017; Belayneh *et al.*, 2019). Dans la cité d'Uvira, il existe une seule station météorologique qui est basée au Centre de Recherche en Hydrobiologie (CRH) et dont les précipitations moyennes sont de 1100 mm pour la période de 1975 à 2008 (Ongezo, 2014). Disposant des données de précipitation moyenne annuelle uniquement pour une seule station sur l'ensemble du territoire, la précipitation moyenne correspondant à la station du CRH n'a pas été utilisée pour calculer R; auquel cas nous aurions une valeur unique de R pour tout le territoire d'Uvira. De ce fait, les précipitations moyennes annuelles calculées sur base des données climatiques Wordclim2.0 de 1950 à 2000 (Fick et Hijmans, 2017) ont été utilisées pour trouver R et pour tenir compte de la variabilité spatiale des précipitations dans ce secteur.
- 10 Le facteur topographique LS tient à la fois compte de la longueur de pente (L) et de la valeur angulaire de la pente (S) qui influencent la vitesse de ruissellement de surface et jouent un rôle important dans l'érosion et le glissement de terrain (Sarathi et Pani, 2015). Initialement, le facteur L a été défini par Wischmeir et Smith (1978) suivant la relation $L = (\lambda/22.13)^m$ avec λ la longueur de la pente en mètre et m équivaut à 0,5 pour les pentes plus raide que 5 %; 0,4 pour les pentes comprises entre 3 %-4 %; 0,3 pour les pentes se trouvant entre 1 %-3 % et 0,2 pour les pentes inférieures à 1 % pour une parcelle élémentaire de 22,13 m. Le facteur S de la raideur de la pente qui reflète l'influence du gradient de pente sur l'érosion peut être estimé suivant l'équation de McCool *et al.* (1978): $S=10,8*\sin\theta+0,03$ lorsque $\tan\theta<9\%$ et $S=16,8*\sin\theta-0,5$ si $\tan\theta \geq 9\%$, θ est le gradient de la pente en degré. Cependant, pour les zones à topographie complexe comme le territoire d'Uvira dont la complexité morphologique s'explique par le contexte de *rifting* dont il fait partie, l'équation de Desmet et Govers (1996) est la plus appropriée (Panagos *et al.*, 2015). Cette équation est donnée par :

$$L_{ij} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{(D^{m+2} * \cos^m a_{i,j} * 22.13^m)}$$

- 11 avec L_{ij} , le facteur de la longueur de pente pour une cellule de grille de coordonnées (i,j); $A_{i,j-in}$ étant la surface d'accumulation des flux ou l'aire de contribution à la cellule de grille d'entrée (i,j) mesurée en m²; D la taille de cellule de grille en mètre, $X_{i,j} = \sin a_{i,j} + \cos a_{i,j}$; $a_{i,j}$ est la direction de l'aspect de la cellule de grille de coordonnées (i,j); m varie entre 0 et 1 et est donné par la relation

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \text{ avec } \beta = \frac{\frac{\sin\theta}{0.0896}}{[0.56 + 3 * (\sin\theta)^{0.8}]}$$

- 12 θ est l'angle de pente en degré.
- 13 Dans le territoire d'Uvira, le facteur LS a alors été calculé à partir d'un Model numérique de terrain (MNT) dérivé d'une image SRTM de 30 m de résolution spatiale grâce à l'outil de géotraitement (*Basic terrain analysis*) de SAGA GIS 2.3.2 (*System for Automated Geoscientific Analyses*) suivant l'équation de Desmet et Govers (1996). Ces derniers ont développé un algorithme pour calculer le facteur L en se basant sur l'équation de Foster et Wischmeier (1974), dans laquelle ils considèrent l'accumulation des flux comme une estimation de la longueur de la pente. Dans un premier temps, un prétraitement de l'image SRTM par remplissage des cuvettes a été réalisé dans le logiciel QGIS grâce à l'outil *fill sink*. Ensuite, le module *basic terrain analysis* de SAGA GIS a permis de faire le calcul de LS.
- 14 L'indice d'érodibilité des sols K (t.ha.h/ha.MJ.mm) est une valeur numérique qui varie entre 0 et 1. La valeur d'érodibilité de sol proche de 0 représente un sol moins sensible à l'érosion hydrique (Ganasri et Ramesh, 2015). Dans la forme originale du modèle USLE, le facteur K est déterminé expérimentalement en considérant la texture et la structure, le contenu en matière organique et la perméabilité du sol (Wischmeier et Smith, 1978). Le monographe de sol est la méthode la plus utilisée pour obtenir la valeur du facteur K en fonction de ces paramètres (Gashaw *et al.*, 2017). Il existe également des méthodes alternatives qui excluent la structure et la perméabilité des sols dans le calcul de K. De ce fait, le choix de l'équation ou de la méthode à utiliser lors du calcul de K dépend de la disponibilité des données pédologiques (Benavidez *et al.*, 2018). Dans le cadre de cette étude, l'érodibilité K pour les différentes classes texturales de sol a été calculée grâce à l'équation de William (1995). Le choix de l'équation de William (1995) pour le calcul du facteur K est lié à la disponibilité des données pédologiques dans le secteur d'étude. En effet, suivant cette équation le facteur K est calculé en utilisant les propriétés des sols telles que le taux d'argile, de sable, de limon et la fraction de carbone organique. Ces données peuvent être extraites dans la base des données SOTERCAF1.0 (*Soil and Terrain database for Central Africa*). Cette base des données comprend un *shapefile* (polygone) des unités pédologiques dont la table attributaire contient les propriétés des sols des pays d'Afrique Centrale (R.D. Congo, Burundi et Rwanda) qui ont été compilé par différentes organisations de 1940 à 2001 (Batjes, 2007). Le *shapefile* de la limite du territoire d'Uvira telle que défini par le Référentiel géographique commun (RGC) a permis d'extraire (découper) la carte des unités pédologiques de ce territoire (Figure 2).
- 15 L'équation de William (1995) est donnée par la relation:
- 16 $K = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand}$
- 17 où f_{csand} est un paramètre qui donne un facteur d'érodibilité faible pour les sols avec un contenu en sable élevé et un facteur élevé pour les sols avec peu de sable, f_{cl-si} est un facteur qui donne un facteur d'érodibilité faible pour le sol avec un grand rapport argile/silt, f_{orgc} est un facteur qui réduit l'érodibilité pour des sols avec un contenu en carbone organique, f_{hisand} est un facteur qui réduit l'érodibilité de sol pour les sols avec des contenus en sable extrêmement élevé.

$$fcsand = 0.2 + 0.3 * \exp \left[-0.256 * ms * \left(1 - \frac{msilt}{100} \right) \right]$$

$$fcl - si = \left(\frac{msilt}{mc + msilt} \right)^{0.3}$$

$$forgc = 1 - \frac{0.036 * orgC}{orgC + \exp[3.72 - (2.95 * orgC)]}$$

$$fhisand = 1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{ms}{100} \right)}{\left(1 - \frac{ms}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{ms}{100} \right) \right]}$$

- 18 Où *ms* est le pourcentage en sable (diamètre des particules de 0,05-2,00 mm), *msilt* est le pourcentage de silt contenu (0,002-0,05 mm de diamètre), *mc* est le pourcentage en argile contenu (diamètre des particules <0,002 mm), et *orgC* est le contenu en carbone organique (%). Ces paramètres ont été tous calculés suivant les formules proposées par William (1995) en se basant sur les données relatives à la composition des sols de la RDC telles que présentées dans la base des données SOTERCAF 1.0. Pour chaque unité pédologique, les propriétés du sol nécessaire au calcul du facteur K ont été extraites en se référant à la table attributaire des données. Le tableau 2 contient les données extraites de la base des données SORTECAF et qui ont été utilisées dans le calcul de K pour le territoire d'Uvira.

Tableau 2. Propriétés et classification des sols dans le territoire d'Uvira / Soils properties in Uvira Territory.

Classification des sols	Code (FAO)	% Sable	% Silte	% Argile	C organique (g.kg ⁻¹)	% C organique
Acrisols hapliques	ACh	21	29	50	80,8	8,08
Cambisols dystriques	CMd	48	15	37	20,4	2,04
Mollie Fluvisols	FLm	0	43	57	46,9	4,69
Ferralsols humiques	FRu	31	25	44	36,16	3,616
Phaeozems luviques	PHl	49	22	29	16,4	1,64
Solonchaks gleyiques	SCg	35	46	19	24,51	2,451
Vertisols eutriques	VRe	10	25	65	25,4	2,54

- 19 Le facteur C de couverture du sol (adimensionnel) représente les effets de la couverture végétale du sol et des pratiques de gestion sur l'érosion du sol (Ndolo, 2015). C'est le rapport entre les pertes en sols nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sols correspondants aux sols sous système d'exploitation (Alexandridis *et al.*, 2014). Une manière simple de déterminer ce facteur dans les zones où les stations expérimentales de suivi de perte de sol ne sont pas encore installées, consiste à assigner des valeurs de C aux types d'occupation de sol en se référant sur les valeurs disponibles dans la littérature ou les valeurs de C trouvées dans la même région. Cependant, la définition

de classes d'occupation des sols dépend d'un pays à l'autre. À titre illustratif, une classe forêt peut représenter une forêt tropicale dans un pays et une forêt à pin dans un autre pays (Benavidez *et al.*, 2018). Pour pallier à ce problème, une approche de détermination de C en se basant sur les valeurs de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) a été proposée par plusieurs auteurs (Van der Knijff *et al.*, 2000, Durigon *et al.*, 2014, De Jong, 1994). En R.D. Congo, les deux approches ont été appliquées dans l'estimation du facteur C. En effet, Tshikeba *et al.* (2018) ont estimé les valeurs du facteur C dans la ville de Kinshasa en assignant les classes d'occupation des sols obtenues à partir de la carte *Glob Land Cover (2008-2012)* aux valeurs de C disponibles sur le site internet de *European Space Agency, Climate Change Initiative*⁴. Par contre, Karamage *et al.* (2016) ont utilisé la relation C-NDVI pour trouver les valeurs de C dans le bassin du Lac Kivu. Cette dernière approche a été privilégiée dans le cadre de cette étude étant donné que les valeurs de C correspondant aux différentes classes d'occupation de sol ne sont pas disponibles pour le contexte spécifique du secteur d'étude. Dans le territoire d'Uvira, le facteur C a été calculé grâce à l'équation $C = \exp(-a \cdot (NDVI / (b - NDVI)))$, a et b étant les paramètres de forme de la courbe C-NDVI (Oliveira *et al.*, 2015). Le NDVI a été calculé à partir des images Landsat 7 du 30 août 2016 et de 19 août 2006 pour déterminer l'évolution spatiale de la densité du couvert végétal sur une période de 10 ans. Les valeurs de a et b ont été obtenues en se référant aux travaux similaires réalisés en R.D. Congo. Pour ce faire, les valeurs de a=2 et b=1 adoptées par Karamage *et al.* (2016) dans le bassin du lac Kivu ont été utilisées.

- 20 Le facteur de pratique de soutien ou de conservation (adimensionnel) a une valeur qui varie entre 0 et 1, les valeurs qui se rapprochent de 0 indiquent de bonnes pratiques de conservation et les valeurs qui se rapprochent de 1 indiquent des mauvaises pratiques de conservation (Ganasri et Ramesh, 2015). Ce facteur exprime l'effet des pratiques de conservation (paillage, afforestation, culture en courbe de niveau, aménagement des terrasses, etc.) sur la réduction de l'érosion. Selon le projet LADA (*Land Degradation Assessment in Drylands*), à l'exception de l'Égypte et de l'Afrique du Sud, dans la plupart des pays africains, la R.D. Congo y compris, il existe des mauvaises pratiques de gestion de terre (Nachtergaele *et al.*, 2010; Karamage *et al.*, 2016). À l'absence des données sur le mode de protection de sol, la valeur maximale de P=0,75 proposée par le projet LADA (*Land Degradation Assessment in Drylands*) pour les pays africains avec des aménagements mineurs des terres (Nachtergaele *et al.*, 2010; Karamage *et al.*, 2016) a été utilisée plutôt qu'une valeur de 1 qui indique une absence des pratiques de conservation. Dans le territoire d'Uvira, il y a des efforts d'afforestation qui ont été entrepris sous l'impulsion des organisations non gouvernementales pour suppléer aux besoins en bois énergie dans ce secteur et pour la promotion des activités agroforestières. Ces efforts quoique mitigés contribuent en une certaine mesure à la conservation des sols dans ce territoire.
- 21 Pour la détermination des zones prioritaires pour la conservation des sols, il s'est avéré, dans un premier temps de calculer la susceptibilité du terrain à l'érosion en fonction de la topographie, du climat et de la pédologie (A=RKLS). Ceci a permis de calculer l'érosion potentielle (de Figueiredo et Fonseca, 1997; Pradhan *et al.*, 2012; Le Van *et al.*, 2014; Karamage *et al.*, 2018). La spatialisation du risque d'érosion dans le territoire d'Uvira a exigé l'intégration des facteurs de couverture et de protection de sol à la démarche précédente. Les différentes cartes issues de cette approche ont ensuite été comparées de manière visuelle pour déterminer les zones les plus affectées par

l'érosion. Dans cette optique, des classes de perte de sols ont été définies pour prioriser les zones de conservation. Dans un premier temps, la limite de perte de sol tolérable de 11 t/ha/an pour les paysages montagneux tropicaux (Gashaw *et al.*, 2017) a été adoptée afin de discriminer les zones qui dépassent la limite tolérable de perte de sol et qui nécessitent des mesures particulières de conservation. En second lieu, 5 classes d'intensité d'érosion ont été définies en s'inspirant de la classification de Adinarayana *et al.* (1999) et en tenant compte de la limite tolérable de 11 t/ha/an (Gashaw *et al.*, 2017). Adinarayana *et al.* (1999) ont distingué quatre classes d'intensité d'érosion pour les bassins montagneux et hétérogènes en fonction de la perte annuelle de sol: (a) très sévère (>50 t/ha/an), (b) sévère (40-50 t/ha/an), (c) modérée à sévère (20-40 t/ha/an), (d) faible à modérée (<20 t/ha/an). Tenant compte de la limite tolérable de 11 t/ha/an, dans le contexte du territoire d'Uvira, la classe d'intensité faible à modérée (<20 t/ha/an) a été subdivisée en deux classes: une classe d'intensité d'érosion faible (Classe I) dont la perte de sol annuelle est inférieure à 11 t/ha/an (0-10 t/ha/an) et une classe d'intensité d'érosion modérée (Classe II) dont la perte de sol annuelle est comprise entre 10 et 20 t/ha/an. De 20 à 30 t/ha/an, l'intensité d'érosion a été considérée comme étant élevée (classe III). Dans le contexte des zones montagneuses de l'est de l'Afrique, en Éthiopie par exemple, Belayneh *et al.*, (2019) ont considéré qu'une perte de sol inférieure à 5 t/ha/an correspond à une très faible intensité d'érosion tandis qu'une perte de sol de 30 à 50 t/ha/an équivaut à l'érosion sévère (classe IV) et lorsque la perte des sols est supérieure à 50 t/ha/an, l'érosion est très sévère (Classe V).

- 22 Pour déterminer l'influence des différentes méthodes de protection de sol (terrassement, contour, bandes enherbées) sur le risque d'érosion, les valeurs du paramètre P en fonction de la pente telles que proposées par Shin (1999) pour les différents modes de protection de sol ont été utilisées. Cette alternative a permis d'envisager des perspectives d'aménagement du territoire d'Uvira.
- 23 Les données vectorielles et matricielles étant des différentes sources et de résolution spatiales différentes, elles ont été découpées suivant les limites du territoire d'Uvira telles que définies sur la carte administrative de la R.D. Congo dans le Référentiel géographique commun (RGC) et ont été reprojctées dans le système WGS 84, UTM (Universal Transverse Mercator) zone 35 Sud. Un processus de rééchantillonnage a permis d'harmoniser les données matricielles (*raster*) à une même résolution spatiale de 30 m. Pour cela, la méthode d'interpolation spatiale basée sur le *plus proche voisin* a été appliquée afin de ne pas modifier les valeurs des pixels de l'image raster d'origine. Dans cette méthode de rééchantillonnage, le pixel prend la valeur du pixel de l'ancien raster le plus proche et présente l'avantage de ne pas créer de nouvelles valeurs. Tous les traitements des données ont été réalisés grâce aux logiciels QGIS 2.18.18 (Quantum GIS) et SAGA GIS 2.3.2 (*System for Automated Geoscientific Analysis*). De manière particulière, le logiciel QGIS a été utilisé pour préparer et standardiser les données d'entrées ainsi que pour faire les calculs (algèbre et statistique spatiale) au moyen des outils de géotraitement *raster calculator* et *zonal statistics*. Par ailleurs, le logiciel SAGA GIS a permis de calculer le facteur LS grâce à l'outil de géotraitement *Terrain analysis*. Cet outil de SAGA GIS comprend le module *Basic terrain analysis* qui permet de calculer le facteur LS en utilisant le MNT et ses dérivées comme données d'entrées.

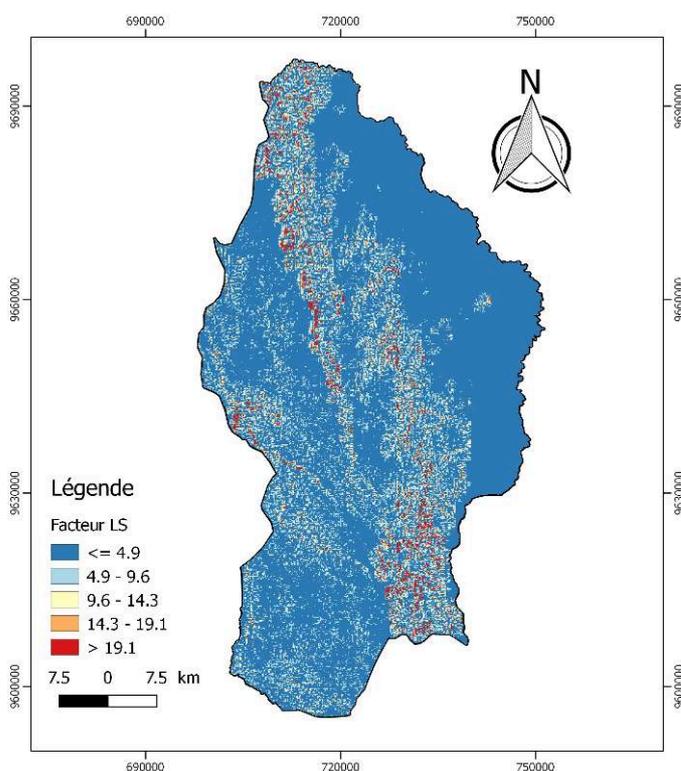
Résultats et discussion

Facteurs de l'érosion hydrique

Le facteur topographique LS

- 24 L'influence de la longueur de la pente et de son inclinaison sur les processus érosifs exprimée par le facteur LS (Figure 3) montre que les valeurs se répartissent entre 0,03 et 56,34. Ces valeurs sont modérées (plus de 50 % des valeurs sont supérieures à 5). Les valeurs les plus faibles se trouvent au niveau de la plaine de Ruzizi et les valeurs les plus fortes se trouvent au niveau des plateaux à l'Ouest et au centre du territoire. Dans le territoire d'Uvira, la valeur moyenne de LS est de 2,90 et est inférieure à celle de 4,79 trouvée par Karamage *et al.* (2016) dans le bassin du Lac Kivu. Les valeurs élevées du facteur LS exhibent des zones ayant de forts gradients des pentes qui ont une grande influence sur le facteur LS par rapport à la longueur de la pente. De manière générale, les zones ayant de forts gradients de pente ont des valeurs élevées du facteur LS du fait que le gradient de pente est le contrôle majeur des valeurs de LS. Par ailleurs, les surfaces concaves (zones d'accumulation des flux) ont des valeurs de LS supérieures au plan convexe (Desmet et Govert, 1996).

Figure 3. Facteur LS / LS Factor.

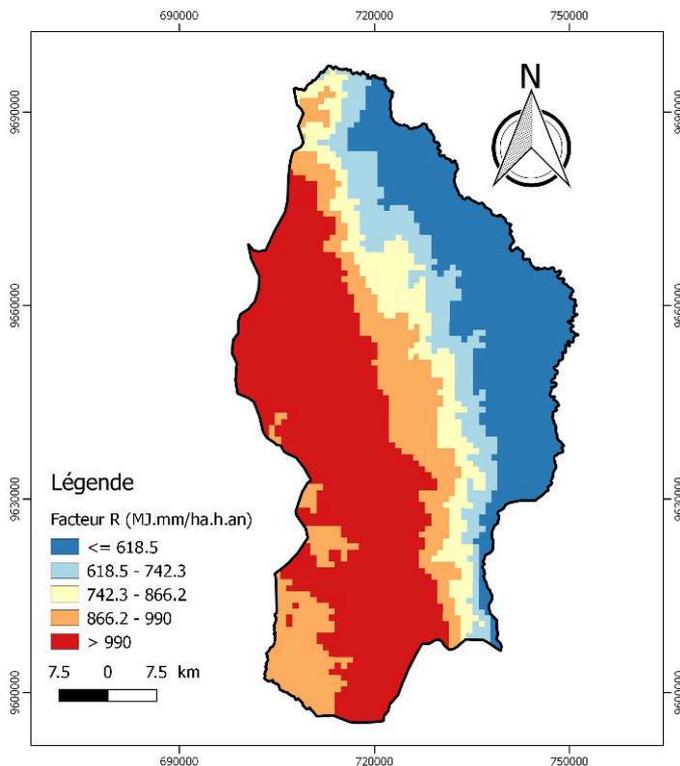


L'érosivité de pluie R

- 25 Le territoire d'Uvira jouit d'un climat tropical qui est contrasté par le relief. L'érosivité de la pluie tout comme la précipitation et l'altitude augmentent progressivement de l'est vers l'ouest. Le facteur R (Figure 4) varie entre 479,69 et 1138,92 MJ.mm/ha.h.an avec une moyenne de 849,04 MJ.mm/ha.h.an. Dans la plaine de la Ruzizi et au niveau du

littoral du lac Tanganyika où les précipitations ne dépassent pas 1000 mm, l'agressivité de la pluie est la plus faible. L'agressivité de pluie la plus élevée se trouve au niveau des hauts et moyens plateaux où les précipitations sont abondantes (entre 1000 et 2000 mm). Les valeurs de R trouvées dans le Secteur d'Uvira se rapprochent de celles trouvées par Tshikeba *et al.* (2018) dans la ville de Kinshasa où R varie entre 616 à 723 MJ.mm/ha.h.an. Par contre, Karamage *et al.* (2016) ont trouvé des valeurs plus élevées dans le bassin du lac Kivu (R moyen=4623 MJ.mm/ha.h.an) où les précipitations moyennes annuelles sont de 1285 mm. Ces valeurs élevées de R sont liées au fait qu'il a utilisé l'équation proposée par Lo *et al.* (1985) qui a été développé dans le contexte d'Hawaï où les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à celles qu'on retrouve dans la région du Kivu.

Figure 4. Facteur R / R Factor.



L'érodabilité des sols K

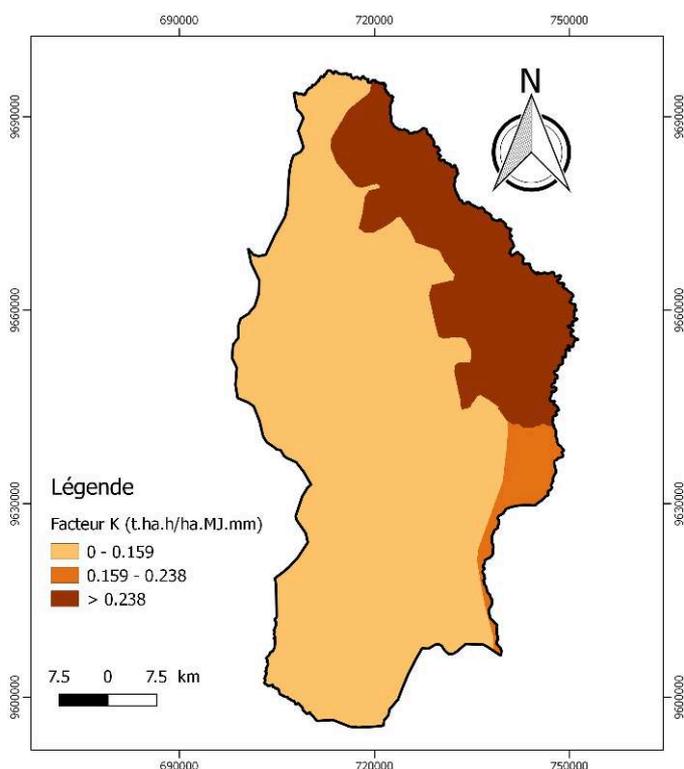
- 26 L'érodibilité varie en fonction des types des sols dans le territoire d'Uvira (Tableau 3). La faible érodibilité des acrisols hapliques ($K=0,147$) et des ferrasols humiques ($K=0,143$) s'explique par leur contenu en matière organique qui est élevé. En dépit de leur faible taux en matière organique, les cambrisols dystriques présentent l'érodibilité la plus faible ($K=0,13$ t.ha.h/ha.MJ.mm) à cause de leur rapport argile-silte qui est élevé ($f_{cl-si}=0,689$) et leur taux de sable élevé ($f_{sand}=0,20$). Par contre, les fluvisols ont l'érodibilité la plus élevée ($K=0,37$ t.ha.h/ha.MJ.mm) suite à l'absence des sables ($f_{sand}=0,5$).

Tableau 3. Calcul du Facteur K des sols du territoire d'Uvira / Calculation of the K factor in Uvira Territory.

Classification des sols	Code (FAO)	fsand	fcl-si	forgc	fhisand	Facteur K	Surface (ha)
Acrisols hapliques	ACh	0,207	0,740	0,964	1,000	0,147	111759,60
Cambisols dystriques	CMd	0,200	0,689	0,966	0,999	0,133	45,04
Fluvisols mollie	FLm	0,500	0,776	0,964	1,000	0,374	9947,94
Ferralsols humiques	FRu	0,201	0,737	0,964	1,000	0,143	136080,69
Phaeozems luviqes	PHl	0,200	0,777	0,970	0,999	0,151	55222,88
Solonchaks gleyiques	SCg	0,202	0,901	0,964	1,000	0,176	10413,44
Vertisols eutriques	VRe	0,244	0,681	0,964	1,000	0,160	14236,17

- 27 Les sols du territoire d'Uvira sont fortement érodables. Le facteur K varie entre 0,13 et 0,37 t.ha.h/ha.MJ.mm (Figure 5) avec une moyenne de 0,18 t.ha.h/ha.MJ.mm. Kamarage *et al.* (2016) avait trouvé des valeurs de K comprises entre 0,009 et 0,11 t.ha.h/ha.MJ.mm dans le bassin du Lac Kivu. Ceci montre que les sols du territoire d'Uvira présentent une très grande sensibilité à l'érosion par rapport aux sols du bassin du Lac Kivu. Les sols développés sur les sédiments lacustres et fluviaux au niveau des plaines alluviales et de la zone côtière du lac Tanganyika présentent l'érodabilité élevée par rapport aux sols développés sur les roches métamorphiques et acides dans les plateaux.

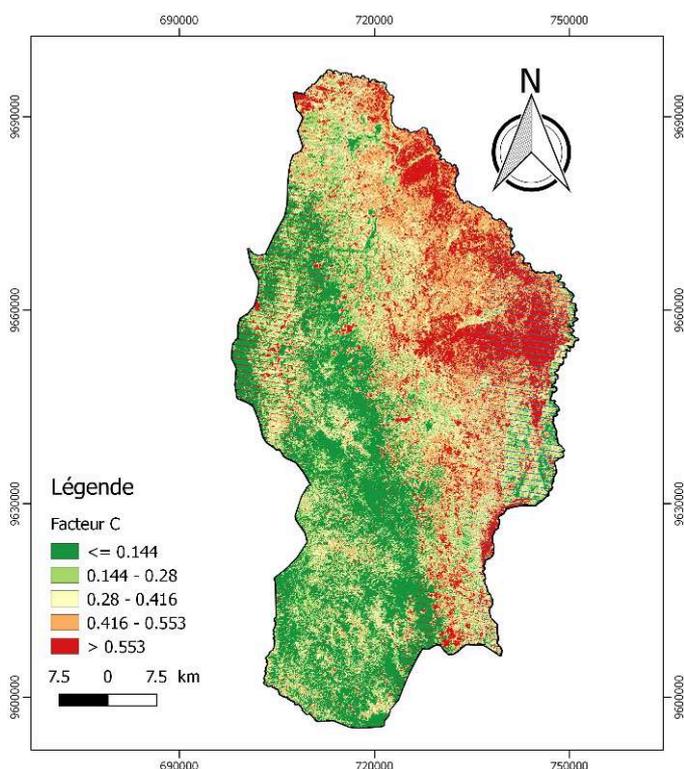
Figure 5. Facteur K / K Factor.



Le facteur C

- 28 La faible couverture végétale qui caractérise la zone comprise entre le lac Tanganyika et le haut plateau explique en partie l'état actuel de l'érosion. Le facteur C (Figure 6) montre des valeurs comprises entre 0,0075 et 0,689 avec une moyenne de 0,31 qui est supérieure à celle de 0,15 trouvée par Karamage *et al.* (2016) dans le bassin du Lac Kivu. Cette différence en termes de valeurs de C reflète la différence de densité du couvert végétal dans les deux secteurs. Dans le territoire d'Uvira, il existe des reliques de forêts qui ont subsisté aux pressions anthropiques et il existe des plantations agroforestières qui ont été implantées dans ce territoire pour suppléer aux besoins en bois-énergie. C'est dans ces zones où l'on retrouve les faibles valeurs du facteur C. Les valeurs le plus élevées de C se trouvent à l'Est et au centre du territoire qui est caractérisé par une faible couverture végétale suite à une extension urbaine importante et les activités agricoles surtout pratiquées au niveau de replat qui comprend des alluvions fertiles. Cependant, suite à l'extension urbaine et à l'accroissement de la population, l'agriculture de subsistance se fait également sur des zones à forte pente, accentuant ainsi le risque d'érosion. Les valeurs de C trouvées dans le territoire d'Uvira se rapprochent de celles trouvées dans la ville de Kinshasa où C varie entre 0 et 0,525 (Tshikeba *et al.*, 2018).

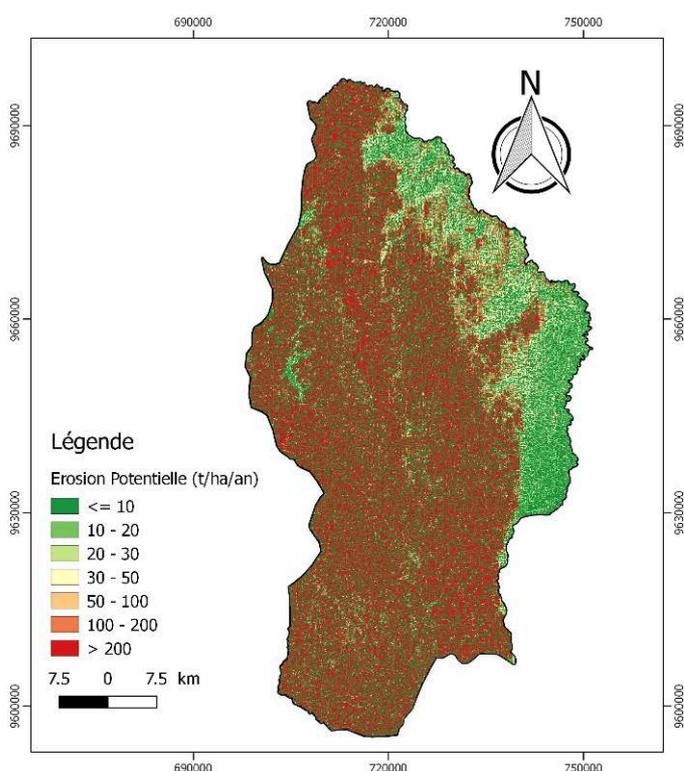
Figure 6. Facteur C / C Factor.



Érosion potentielle

- 29 L'érosion potentielle est définie pour des conditions maximales de perte en sol, c'est-à-dire en l'absence de tout couvert végétal (de Figueiredo et Fonseca, 1997). C'est le processus d'érosion qui ne tient pas compte des facteurs anthropiques et des pratiques culturales (Le Van *et al.*, 2014). Ce potentiel est défini indépendamment des facteurs anthropiques (pratiques culturales et du mode de protection de sol). Il est modélisé sur base de l'équation universelle de perte de sols, en tenant en compte uniquement des facteurs R, K et LS (de Figueiredo et Fonseca, 1997; Pradhan *et al.*, 2012; Le Van *et al.*, 2014; Karamage *et al.*, 2018). Le potentiel d'érosion est ainsi calculé suivant la relation $A=RKLS$ dans laquelle les facteurs C et P sont éliminés. Mathématiquement parlant, dans l'équation du potentiel de perte de sol, ces facteurs sont considérés comme équivalents à 1 (Khosrokhani et Pradhan, 2014). De ce fait l'érosion potentielle est calculée en considérant l'hypothèse selon laquelle la zone d'étude est un sol nu ($C=1$) où aucune méthode de protection de sol n'est mise en place ($P=1$).
- 30 La carte d'érosion potentielle indique les zones qui sont caractérisées par une vulnérabilité élevée sur base des facteurs naturels tels que la précipitation, les propriétés du sol et la topographie et qui ne peuvent pas être facilement contrôlées (Karamage *et al.*, 2016). Pour déterminer le risque maximum d'érosion hydrique dans le territoire d'Uvira, la carte de l'érosion potentielle (Figure 7) a été établie. Cette carte d'érosion potentielle indique les zones qui sont naturellement vulnérables à l'érosion hydrique suite à une forte intensité de précipitation et suite aux pentes fortes (de Figueiredo et Fonseca, 1997, Karamage *et al.*, 2016).

Figure 7. Érosion potentielle dans le territoire d'Uvira / Potential Erosion in the Uvira Territory



- 31 La susceptibilité du terrain à l'érosion en fonction de la topographie, du climat et de la pédologie montre que le territoire d'Uvira présente de manière globale deux grandes potentialités d'érosion (Tableau 4): un potentiel faible correspondant au niveau de susceptibilité I (24,08 % de surface) et un potentiel extrême correspondant au niveau de susceptibilité V (69,75 % de surface). Le faible niveau de susceptibilité à l'érosion se trouve au niveau des replats (plaine de la Ruzizi et zone côtière du lac Tanganyika), mais les zones situées dans les plateaux au centre et à l'ouest du territoire présentent une forte susceptibilité en raison de leur relief accidenté et une pluviosité forte.

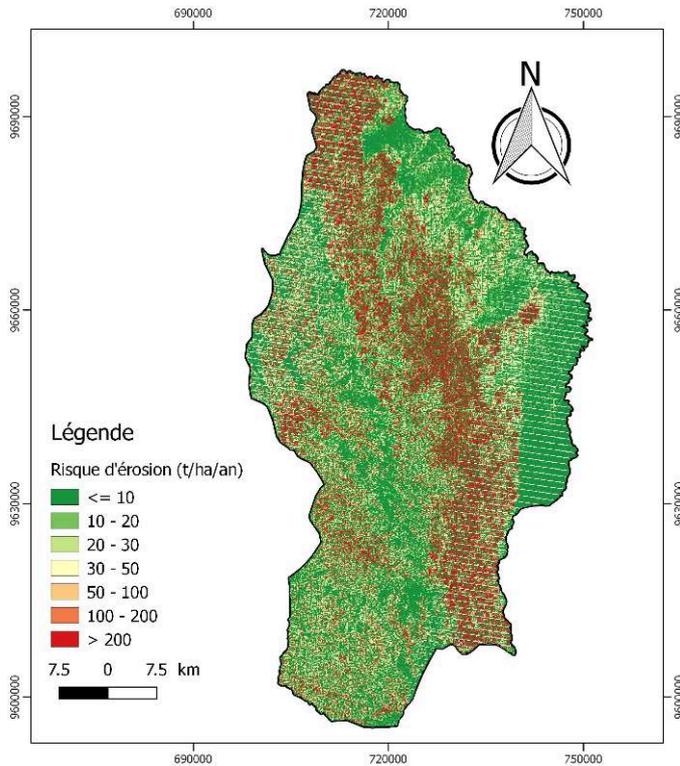
Tableau 4. Perte de sol potentielle, classe de sévérité d'érosion et leur priorité de conservation dans le territoire d'Uvira / Potential Soil Loss, Erosion Severity Class and Conservation Priority in Uvira Territory.

Perte de sol (tonne/ha/an)	Classe de Sévérité	Classe de priorité	Surface (ha)	Pourcentage de surface totale (%)	Érosion moyenne (tonne/ha/an)
0 à 10	Faible	I	80627,2	24,08	4,30
10 à 20	Modérée	II	18033,7	5,38	13,73
20 à 30	Élevée	III	12366,2	3,69	32,29
30 à 50	Sévère	IV	17039,0	5,09	46,11
> 50	Très sévère	V	206787	61,75	171,02

État du risque d'érosion

- 32 La situation de l'érosion représente l'état actuel de l'érosion potentielle en tenant en compte des effets de la végétation et des méthodes de culture. Ainsi, les coefficients C et P sont inclus dans l'équation de situation de l'érosion (Le Van et al., 2014). Contrairement à l'érosion potentielle qui ne tient compte que de 3 facteurs naturels (érosivité de pluie, érodibilité de sol, les facteurs de longueurs et du gradient de pente) pour indiquer les zones avec une vulnérabilité élevée, le risque d'érosion est estimé en faisant le produit des facteurs naturels anthropiques (érosivité de pluie, érodibilité de sol les facteurs de longueurs et du gradient de pente, facteur de couverture du sol et de pratique de protection) (Karamage et al., 2017).
- 33 Le risque d'érosion du sol est faible au niveau de la plaine de la Ruzizi à l'est du territoire d'Uvira. Par contre les zones situées dans les plateaux, à l'ouest du secteur d'étude, présentent la plus grande intensité d'érosion hydrique (Figure 8). La perte de sol moyenne sur l'ensemble du territoire d'Uvira est de 76,59 t/ha/an. Cette valeur est plus de deux fois supérieures à celle de 30 t/ha/an trouvée dans le bassin du Lac Kivu (Karamage et al., 2016), mais elle est inférieure à celle de 93 t/ha/an trouvée dans le bassin de Chemoga (Bewket et Teferi, 2009). Ce dernier se trouve dans le bassin du Nil où des valeurs moyennes de 23,7 t/ha/an ont été également reportées (Gashaw et al., 2017). Ces différences sont liées aux variations des conditions topographiques locales et au type d'usage des terres. Par exemple, il est reporté dans de nombreux travaux que les zones agricoles et les sols nus sont très exposés aux pertes des sols par rapport aux zones occupées par une végétation naturelle ou semi-naturelle (Karamage et al., 2016; Belayneh et al., 2019). Par ailleurs, dans les zones soumises au même type d'usage des terres, les pertes des sols élevées peuvent être attribuées aux variations des conditions topographiques locales. Dans le territoire d'Uvira, les valeurs les plus élevées des pertes des sols sont observées au niveau des hauts plateaux qui sont caractérisés par de fortes pentes et une pluviosité élevée par rapport à la plaine alluviale qui est localisée entre les escarpements de Mitumba-Itombwe et le lac Tanganyika. L'intensification des activités agricoles, le feu de brousse, la recherche des bois-énergie ainsi que l'extension des zones habitées dans les hautes terres sont autant d'activités qui occasionnent une déforestation et accentuent les processus érosifs dans les hauts plateaux d'Uvira.

Figure 8. État du risque d'érosion dans le territoire d'Uvira / Situation of erosion risk in Uvira territory



- 34 Étant donné que l'érosion des sols est à la fois induite par les processus naturels et anthropiques, le concept de perte de sol tolérable est utilisé comme un proxy pour informer sur la (non) durabilité des pratiques d'usage des terres (Bamutaze, 2015). La perte des sols acceptable qui peut maintenir une productivité varie entre 5 et 11 t/ha/an (Gashaw *et al.*, 2017; Bamutaze, 2015). Une limite générique de 5 t/ha/an pour les sols tropicaux est souvent utilisée, mais l'application de cette limite a été contestée par Morgan (2005) qui l'a considérée comme étant trop conservatrice et restrictive pour les habitants de la zone montagneuse de la région orientale de l'Afrique. De ce fait, il a proposé d'utiliser une valeur limite élevée allant jusqu'à 10 t/ha/an (Bamutaze, 2015). C'est ainsi que Karamage *et al.* (2016) a utilisé une valeur limite de 10 t/ha/an dans le bassin du Lac Kivu. D'autres études récentes qui ont été réalisées dans le Rift est-africain, dont celle de Gashaw *et al.* (2017) ont utilisé une valeur limite de 11 t/ha/an et considèrent les pertes des sols inférieures à 5 t/ha/an comme étant très faibles (Belayneh *et al.*, 2019). Une valeur limite de 11 t/ha/an a été également adoptée dans cette étude du fait que le territoire d'Uvira se trouve dans un contexte géomorphologique similaire (Rift est-africain). Dans ce territoire, la surface totale qui subit un taux d'érosion qui est au-dessus de la limite de maximum tolérable de 11 t/ha/an pour les paysages montagneux tropicaux est de 152 248,9 ha, soit 47 % de la surface totale du territoire. On observe que le risque d'érosion est faible dans 52,79 % du territoire avec une perte moyenne de 6,08 t/ha/an tandis que 30,58 % du territoire fait face à l'érosion sévère avec une perte annuelle de 93,98 t/ha (Tableau 5).

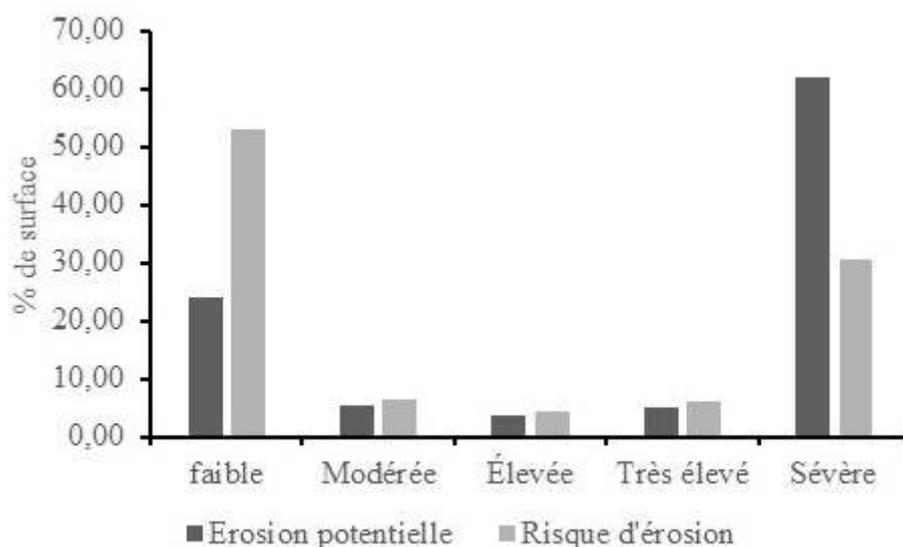
Tableau 5. Situation de perte de sol, classe de sévérité d'érosion et priorité de conservation dans le territoire d'Uvira / Current soil loss, erosion severity class and conservation priority in the Uvira territory.

Perte de sol (tonne/ha/an)	Classe de Sévérité	Classe de priorité	Surface (ha)	Pourcentage de surface totale (%)	Érosion Moyenne (tonne/ha/an)
0 à 10	Faible	I	170 391,0	52,79	6,08
10 à 20	Modérée	II	20 105,4	6,22	17,24
20 à 30	Élevée	III	13 806,6	4,27	27,76
30 à 50	Sévère	IV	19 645,4	6,08	42,17
> 50	Très sévère	V	98 792,2	30,61	93,98

Comparaison du risque d'érosion et de l'érosion potentielle

- 35 La comparaison de la carte du risque d'érosion et de l'érosion potentielle montre qu'en absence de la couverture de sol et de la protection actuelle de sol (Facteur C et P), la zone affectée par l'érosion très sévère peut doubler en passant de 30,61 % à 61,72 % du territoire. Une perte totale de la couverture végétale actuelle peut entraîner une augmentation de la zone ayant une perte de sol dépassant la limite tolérable de 11 t/ha/an de 53 % à 75 % (Figure 9).

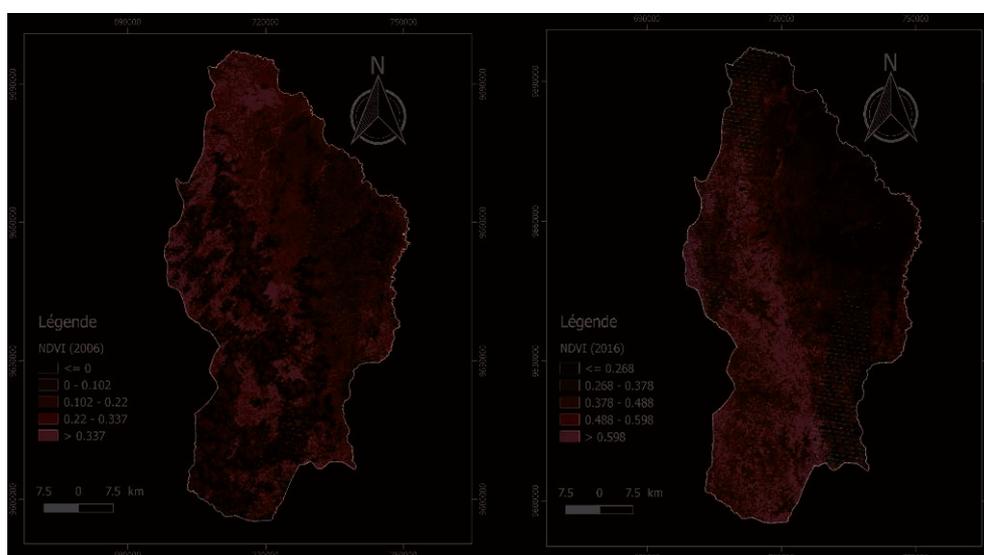
Figure 9. Comparaison de la situation du risque d'érosion et de l'érosion potentielle dans le territoire d'Uvira / Comparison of the current erosion risk and the erosion potential in Uvira territory.



- 36 En raison de la couverture végétale, le risque d'érosion est globalement inférieur à l'érosion potentielle suite aux efforts d'afforestation en cours dans la partie ouest et

sud du territoire d'Uvira où l'on observe une nette augmentation dans la densité du couvert végétal (Figure 10). Cependant, le territoire d'Uvira a subi au courant de ces dix dernières années une déforestation dans la zone comprise entre le lac Tanganyika et le haut plateau. L'agriculture se pratique au niveau de la plaine qui comprend des alluvions fertiles, mais suite à l'extension urbaine et à l'accroissement de la population, l'agriculture de subsistance se fait également sur des zones à forte pente. C'est ainsi qu'on observe une forte baisse de la densité du couvert végétal à l'est et au nord du territoire d'Uvira entre 2006 et 2016 (Figure 10). Par ailleurs, suite à la pression démographique, la population s'installe actuellement sur de fortes pentes, dans des lits des rivières et sur des sols instables sans tenir compte de toutes les conséquences que cela peut générer sur leur survie d'une part, et d'autre part, sur l'environnement. Ce qui contribue à l'aggravation du risque d'érosion dans ce secteur.

Figure 10. Comparaison de la densité de la végétation entre 2006 et 2016 / Comparison of vegetation density between 2006 and 2016.



Aménagement et protection

- 37 La carte de l'érosion potentielle est essentielle pour déterminer le risque d'érosion maximale dans le secteur et pour établir différents scénarios de perte de sol en fonction du changement d'usage des terres (Pradhan *et al.*, 2012). Ceci permet de mieux prendre les décisions d'aménagement. Pour déterminer l'influence des différentes méthodes de protection de sol sur le risque d'érosion les valeurs du paramètre P en fonction de la pente (Tableau 6) telles que proposées par Shin (1999) et Karamage *et al.* (2016) ont été utilisées.

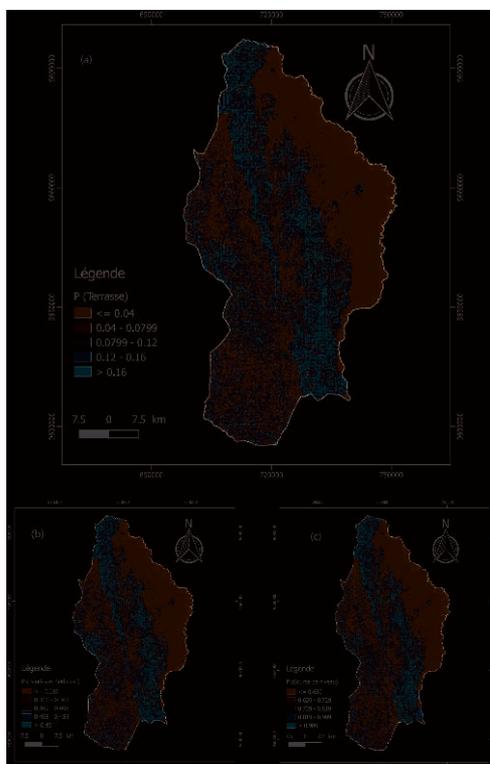
Tableau 6. Valeurs du facteur P suivant différentes pratiques de conservation de terre telles que proposés par SHIN (1999) / P-factor values for different soil conservation practices as proposed by SHIN (1999).

Pente (°)	Valeurs du facteur P		
		Culture en courbe de niveau	Bandes enherbées

0,0-7,0	0,55	0,27	0,1
7,0-11,3	0,60	0,3	0,12
11,3-17,6	0,8	0,4	0,16
17,6-26,8	0,9	0,45	0,18
>26,8	1	0,5	0,2

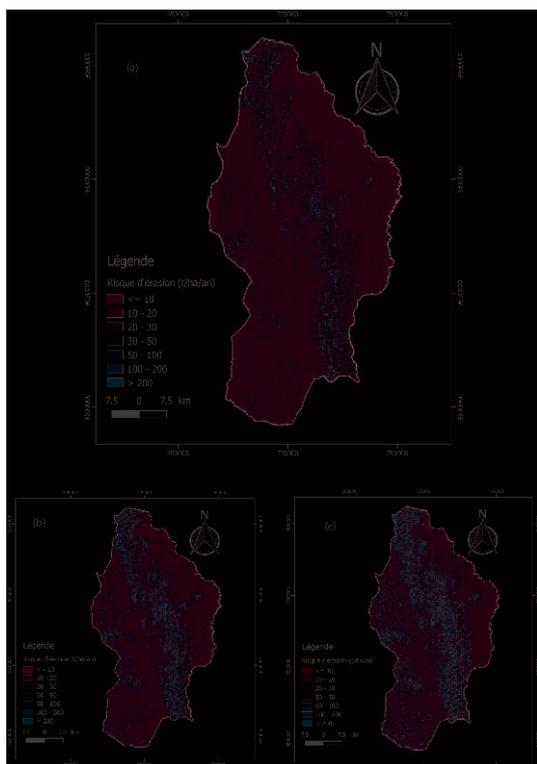
- 38 Les valeurs de P varient entre 0 et 0,2 avec une moyenne de 0,086 pour l'aménagement des terrasses, entre 0 et 0,5 avec une moyenne de 0,36 pour l'aménagement par la mise en place des bandes enherbées et entre 0 et 1 avec une moyenne de 0,72 pour l'aménagement par cultures en courbes de niveau (Figure 11).

Figure 11. Facteur de protection suivant les différentes méthodes de protection de sol : terrasse aménagée (a), bande enherbées (b), culture en courbe de niveau (c) / Protection factor according to different soil protection methods: terracing (a), strip cropping (b), contouring (c).



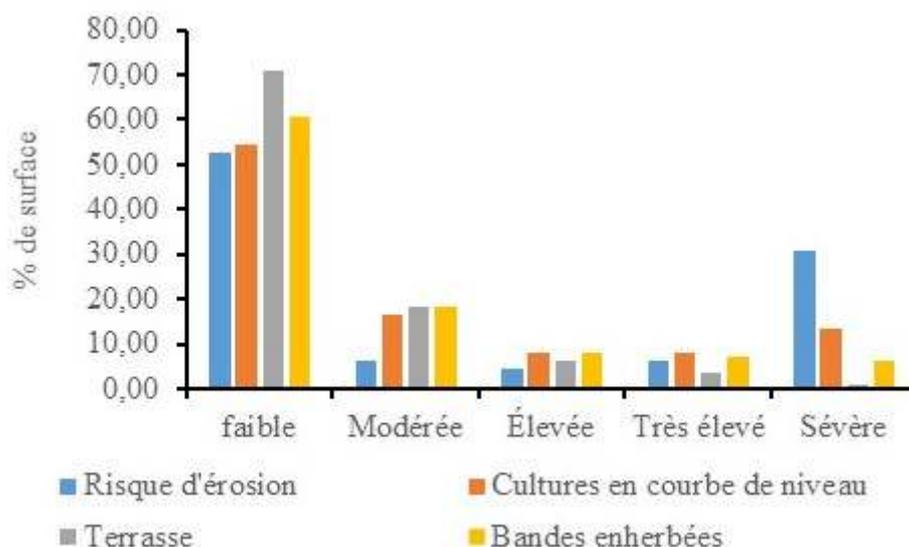
- 39 La Figure 12 présente la variabilité spatiale du risque d'érosion en fonction des techniques de protection de sol.

Figure 12. Risque d'érosion suivant les différentes méthodes de protection de sol: protection par terrasse aménagée (a), bande enherbées (b), culture en courbe de niveau (c) / Risk of erosion according to different soil protection methods: terracing (a), strip cropping (b), contouring (c).



- 40 La méthode de bandes enherbées et des terrasses permettraient de réduire sensiblement la zone à haut risque d'érosion et d'accroître la zone à faible risque. Par contre, la méthode de protection par cultures en courbes de niveau ne montre pas de différence par rapport à l'état actuel du risque d'érosion, quelle que soit la zone considérée. La méthode de protection de sol par des terrasses est la plus appropriée pour réduire le risque d'érosion. Elle peut permettre de réduire de 38,69 % la superficie de la zone caractérisée par une érosion supérieure à la limite tolérable de 11 t/ha/an et augmenter de 34,60 % la zone à faible risque d'érosion. Par contre, la méthode de protection par la mise en place des bandes enherbées et celles des cultures en courbes de niveau permettraient de réduire de 16,64 % et 3,15 % la superficie de la zone caractérisée par une érosion supérieure à la limite de 11 t/ha/an. La méthode de culture en courbe de niveau permettrait d'augmenter seulement de 2,81 % la zone à faible risque d'érosion tandis que la méthode de mise en place des bandes enherbées permettrait d'augmenter cette zone de 14,88 % (Figure 13).

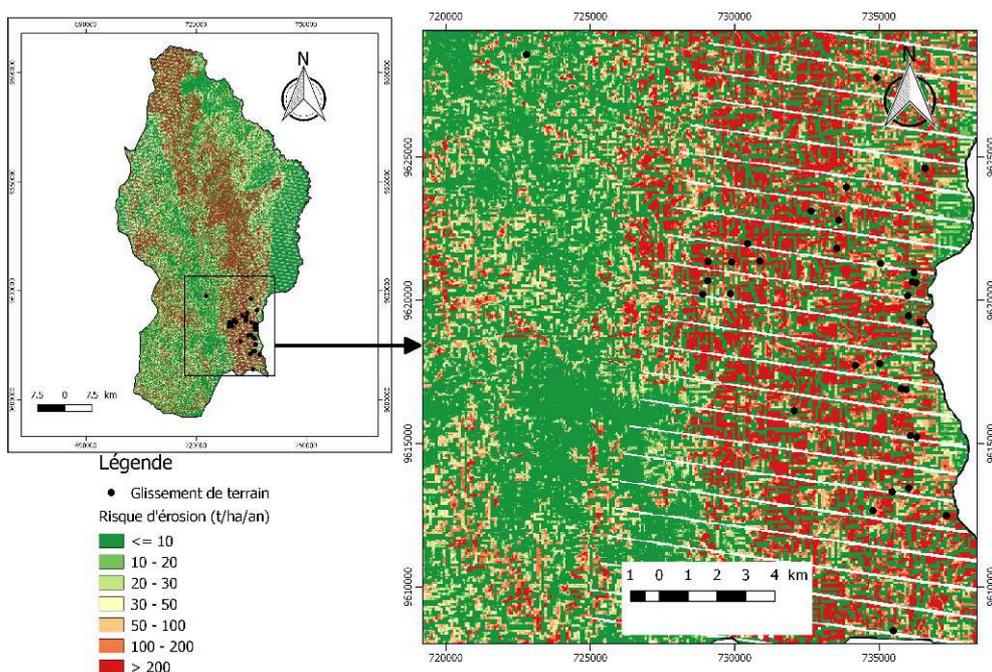
Figure 13. Variation de surface affectée par l'érosion en fonction de la méthode de protection adoptée / Variation of area affected by erosion according to the adopted protection method.



Relation entre la répartition spatiale des glissements de terrain et les zones d'intensité d'érosion

- 41 Bien que le modèle USLE ait été préalablement développé pour la quantification de l'érosion en nappe et en rigole (Wischmeier et Smith, 1978); dans les deux dernières décennies, plusieurs auteurs ont démontré qu'il peut exister une relation entre les zones d'intensité d'érosion définies sur base du modèle USLE et les zones d'occurrence des glissements de terrain (Lee, 2004 ; Pradhan *et al.*, 2012 ; Khosrokhani et Pradhan, 2014 ; Huang *et al.*, 2020). L'étude récente de Huang *et al.* (2020) dans la ville de Ganzhou (Chine) a permis de montrer que les modèles prédictifs de la susceptibilité au glissement de terrain qui prennent en compte la perte des sols due à l'érosion hydrique comme facteur de prédisposition sont plus performants que les modèles qui ne tiennent pas compte de ce processus. D'où la nécessité d'évaluer la relation entre les glissements de terrain et les zones d'intensités d'érosion dans d'autres régions.
- 42 La carte de la Figure 14 montre la répartition des glissements de terrain dans le territoire d'Uvira en se basant sur les données d'inventaire des glissements de terrain effectué par Butara (2012).

Figure 14. Répartition des glissements de terrains par rapport aux différentes zones d'érosion / Distribution of landslides in relation to different erosion zones.



- 43 La répartition spatiale des glissements des terrains est corrélée aux zones d'intensité d'érosion sur base de rapport de fréquence (Tableau 7). Dans cette approche, le rapport de fréquence (*Frequency ratio*) des glissements de terrain est défini comme le rapport entre la proportion des glissements de terrain qui occurs dans chaque classe d'intensité d'érosion et la proportion de la classe d'intensité d'érosion par rapport à la surface totale considérée (Lee, 2004 ; Khosrokhani et Pradhan, 2014 ; Huang *et al.*, 2020). Ce rapport permet de décrire la distribution spatiale des glissements de terrain dans chaque classe d'intensité d'érosion (Khosrokhani et Pradhan, 2014). Une valeur du rapport de fréquence égale à 1 est la valeur moyenne. Une valeur du rapport de fréquence supérieure à 1 indique une forte corrélation entre la zone d'intensité d'érosion et l'occurrence des glissements de terrain tandis qu'une valeur inférieure à 1 indique une corrélation faible (Lee, 2004; Huang *et al.*, 2020).

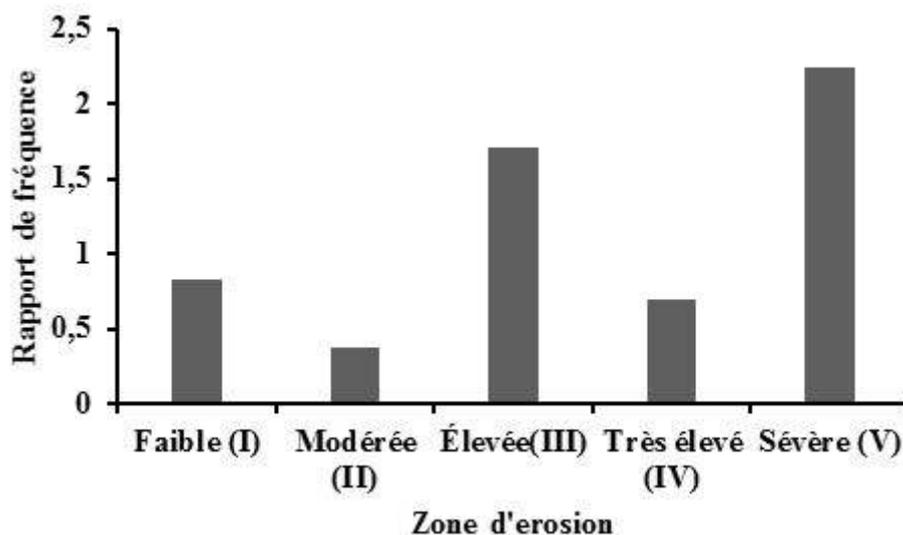
Tableau 7. Rapport de fréquence de l'occurrence des glissements des terrains Vs Zone d'intensité d'érosion (2016) dans le territoire d'Uvira / Frequency of landslide occurrence Vs Erosion intensity zone (2016) in the Uvira Territory.

Perte de sol (tonne/ha/an)	Classe d'intensité de l'érosion	Surface (ha)	Surface totale (%) (b)	Nombre de glissements de terrain	Glissement (%) (a)	Rapport de fréquence (b/a)
0 à 10	Faible (I)	170 391	52,81	14	43,75	0,83
10 à 20	Modérée (II)	20 105,2	6,23	2	6,25	0,38
20 à 30	Élevée (III)	13 806,8	4,27	5	15,625	1,71

30 à 50	Sévère (IV)	19 645,4	6,08	2	6,25	0,69
> 50	Très sévère (V)	98 691,5	30,58	9	28,125	2,243

44 Le calcul des rapports des fréquences d'occurrence des glissements de terrain dans le territoire d'Uvira montre que la zone à faible intensité d'érosion hydrique a une faible occurrence des glissements des terrains avec un rapport de fréquence de 0,83. La zone ayant une intensité d'érosion modérée est celle ayant la plus faible susceptibilité au glissement de terrain avec un rapport de fréquence de 0,38. Par contre la zone ayant la plus grande sévérité de perte de sol est celle ayant également la plus grande occurrence des glissements de terrain. Cette zone a un rapport de fréquence > 2 indiquant une forte probabilité au glissement de terrain (Figure 15). Ces résultats corroborent ceux des études antérieures qui suggèrent que les rapports de fréquence des glissements augmentent avec les classes d'intensité d'érosion et que les glissements de terrain sont les plus récurrents dans les zones à forte intensité d'érosion (Lee, 2004 ; Khosrokhani et Pradhan, 2014 ; Huang *et al.*, 2020). Ceci s'explique par le fait que l'intensité d'érosion hydrique définie sur base du modèle USLE constitue le résultat des conditions topographiques, pédologiques, pluviométriques et d'usage des terres qui influencent également sur l'occurrence des glissements de terrain. Notons toutefois que l'inventaire des glissements de terrain n'est pas exhaustif dans tout le territoire d'Uvira. C'est ainsi que cette analyse de fréquence des glissements de terrain a été faite uniquement sur base de la portion du secteur où les données sont disponibles.

Figure 15. Analyse des rapports de fréquences entre l'occurrence des glissements de terrain et la répartition des zones d'intensité d'érosion / Analysis of frequency ratios between the occurrence of landslides and the distribution of erosion intensity zones.



Limite de l'étude

45 Cette étude s'est basée sur l'usage des SIG et des données géospatiales disponibles (pédologie, topographie, climat, télédétection) pour la modélisation et la cartographie

de l'érosion hydrique dans le territoire d'Uvira en R.D. Congo. Pour cela, l'équation universelle des pertes des sols (USLE) et les données spatialisées en accès libre ont été utilisées. Ce qui a permis de faire une première approximation de l'intensité de l'érosion dans ce secteur. Les données utilisées dans ce travail permettent de faire une analyse de la variabilité de l'intensité d'érosion à l'échelle du territoire. En conséquence, elles permettent de prioriser les zones pour la conservation des sols. Cependant, il existe une nécessité de faire la calibration du modèle USLE en se basant sur des données des terrains. Il est aussi essentiel d'installer des stations de suivi permanent de l'érosion hydrique dans le territoire d'Uvira et de comparer les résultats de la modélisation USLE avec des données issues de ces stations. Ceci permettra de calibrer, de valider et d'évaluer l'applicabilité du modèle développé.

- 46 En effet, le modèle USLE a été préalablement élaboré par le département de l'agriculture des États unis pour anticiper l'érosion hydrique dans les zones agricoles cultivées ou pas. Actuellement, cette équation est utilisée dans des régions qui se trouvent dans des contextes différents du contexte d'origine pour lequel le modèle a été développé. C'est ainsi que des données expérimentales sont nécessaires pour calibrer les résultats obtenus en appliquant le modèle USLE dans sa forme originale afin de l'adapter au contexte local. Ces données expérimentales sont rares, voire inexistantes dans la plupart des territoires de la R.D. Congo. Dans cette région, la plupart des études sur les processus érosives se sont focalisées sur la description des formes d'érosions et sur l'analyse de la vulnérabilité des sites face au ravinement. C'est le cas des travaux d'Ilunga (2006) portant sur les sites majeurs d'érosion dans la cité d'Uvira. Cela est lié au fait que l'approche de quantification des pertes de sol requiert des données sur les paramètres quantitatifs avec une bonne résolution spatiale et temporelle. Néanmoins, ces données sont rares et difficiles à acquérir en R.D. Congo du fait que les mesures extensives de l'érosion des sols impliquent des coûts élevés en termes de temps et d'argent. De plus, les guerres à répétition qui ont prévalu dans la partie est de la R.D. Congo ainsi que les situations d'insécurité dans certaines zones ne permettent pas de faire des suivis à long terme. De ce fait, l'intégration des données secondaires à accès libre et des données issues de la télédétection dans le SIG constitue une alternative pour évaluer les pertes des sols à l'échelle du territoire dans cette région. Plusieurs difficultés entravent la mise en application de cette approche. C'est notamment le cas de l'hétérogénéité des données d'entrées qui sont des sources différentes et ont des résolutions spatiales et/ou temporelles différentes. En outre, le choix des équations spécifiques pour les paramètres du modèle USLE pose problème. Ce choix est délicat étant donné qu'à l'heure actuelle il n'existe pas d'équations spécifiques et des valeurs spécifiques de ces paramètres pour la R.D. Congo.
- 47 En tenant compte des données disponibles, les équations originales de calcul de R, K et LS, comme préalablement défini par Wischmeier et Smith (1978) n'ont pas été appliquées dans le cadre de cette étude. Un choix a été fait sur des équations développées dans des contextes morphologiques et climatiques similaires au secteur d'étude. À titre illustratif, différentes équations ont été utilisées en R.D. Congo pour l'estimation du facteur R. C'est le cas de l'équation de Lo *et al.* (1985) dans le bassin du Lac Kivu (Karamage *et al.*, 2016) à l'est de la R.D. Congo, de Renard et Freimund (1994) et de Roose (1977) dans le bassin de Ndgili (Ngoy, 2015) à l'ouest de la R.D. Congo, mais dans le cadre de cette étude c'est plutôt la régression proposée par Hurni (1985) qui a

été utilisée. Cette régression établit une relation entre l'érosivité et la précipitation moyenne annuelle avec un coefficient de corrélation allant de 0,88 à 0,93 (Hurni, 1985).

- 48 Le facteur LS a été déterminé sur base d'un MNT issu d'une image SRTM de 30 m de résolution spatiale. Cependant, il est actuellement établi que la résolution spatiale du MNT-SRTM a une influence sur les valeurs de LS (Panagos *et al.*, 2015, Oliveira *et al.*, 2013). En effet, la réduction de la résolution spatiale des images SRTM conduit à la diminution de la valeur moyenne du facteur topographique (Oliveira *et al.*, 2013). Par ailleurs, les petites longueurs de pente calculées sur les MNT sont surestimées par rapport aux mesures faites sur terrain (Datta, 2010) et la pente diminue avec l'augmentation de la taille des cellules (pixels) (Molnar et Julien, 1998). En outre, les pentes sont surestimées dans les zones planes tandis qu'elles sont sous-estimées dans les zones à forte pente (Guth, 2010). De ce fait, Wu *et al.* (2005) ont conclu que les MNT de 30 m de résolution sont plus adéquats pour l'estimation de l'érosion par rapport aux MNT de 100 m de résolution qui devraient être utilisés avec précaution, car ils occasionnent une diminution des pentes et une augmentation de la surface d'accumulation. Bien que les MNT-SRTM de 30 m de résolution spatiale aient été utilisés pour le calcul du facteur LS dans le territoire d'Uvira, il est à noter que dans une même zone géographique, les valeurs de ce facteur peuvent varier en fonction de l'équation utilisée. Néanmoins, l'équation de Desmet et Govert (1996) est particulièrement adaptée aux terrains à topographie complexes (Panagos *et al.*, 2015).
- 49 Le facteur C a été calculé sur base des images Landsat7 de 30 m de résolution spatiale. Compte tenu de la taille des exploitations agricoles familiales qui est généralement inférieure à 1 ha dans la région du Kivu, il serait intéressant d'utiliser des images satellitaires de haute résolution spatiale comme les images Sentinel-2 ou SPOT afin de prendre aussi en compte les petites parcelles d'exploitation agricole d'au moins 100 m² dans l'estimation du facteur C. Par ailleurs, cette étude n'a pas tenu compte de la saisonnalité de la végétation alors qu'elle est susceptible d'influencer sur les valeurs de C (Alexandridis *et al.*, 2014). Une prise en compte de la saisonnalité dans l'estimation du facteur C serait alors nécessaire pour améliorer les résultats du modèle USLE dans ce secteur.
- 50 Le facteur K a été estimé grâce à l'équation de William (1995) qui requiert des données sur le contenu en sable, argile, limon et le contenu du sol en matière organique. Ces données ont été acquises pour les 20 premiers centimètres du sol à partir de la base des données SOTERCAF. Cette étude n'a pas tenu compte de l'influence de la position topographique, de l'occupation du sol et de l'état de surface du sol sur la variabilité spatiale du facteur K. Ces paramètres peuvent être appréhendés par les facteurs C et P dans la modélisation USLE (Payet *et al.*, 2011). Ces deux facteurs varient en fonction du changement d'usage de terre. Ce dernier aspect n'a pas été pris en compte pour analyser la dynamique spatio-temporelle du risque d'érosion hydrique. Ainsi, la carte du risque d'érosion hydrique qui est présentée dans le cadre de cette étude est représentative de l'état d'érosion pour l'année 2016.
- 51 Enfin, le modèle USLE a été préalablement conçu pour la quantification de l'érosion en nappe et en rigole (Wischmeier et Smith, 1978). Ce modèle ne tient pas compte du ravinement. Pourtant ce phénomène est d'une grande ampleur dans le territoire d'Uvira (Ilunga, 2006) et contribue au flux des sédiments dans les rivières. Une cartographie de sites majeurs de ravinement dans ce secteur s'avère nécessaire afin

d'analyser s'il existe un lien entre les sites de ravinement majeurs et les zones d'intensité d'érosion établies sur base du modèle USLE.

Conclusion

- 52 Cette étude est basée sur l'utilisation des données spatiales en accès libre et les SIG pour la spatialisation des risques d'érosion dans le territoire d'Uvira en RDC. Elle a permis de montrer que dans le territoire d'Uvira, le risque d'érosion est exacerbé par la topographie dominée par des pentes raides à l'ouest et au centre, l'érosivité forte, une forte érodibilité du sol et une faible protection de sol. En outre, l'expansion des zones urbaines et agricoles dans les zones à pentes raides accentuent le risque d'érosion dans ce secteur. Les résultats de cette étude indiquent que 47,21 % du territoire d'Uvira subit une perte de sol qui est supérieure à la limite tolérable de 11 tonne/ha/an. Par ailleurs, le risque d'érosion est inférieur à l'érosion potentielle en raison du couvert végétal.
- 53 Les méthodes de protection de sol par l'aménagement des terrasses et des bandes enherbées sont les mieux adaptées pour faire face au risque d'érosion dans ce territoire. La vulgarisation de ces méthodes par les autorités locales, l'afforestation des zones à faible couverture végétale et l'encadrement des efforts déjà entrepris par la population permettront de protéger de manière durable les sols dans ce territoire. Ainsi, l'utilisation du modèle USLE, des techniques de SIG et des données multisources à accès libre peut être appliquée à un coût raisonnable pour la cartographie du risque d'érosion à l'échelle territoriale, l'analyse de la variabilité de l'intensité d'érosion et l'identification des zones prioritaires de conservation de sol en République Démocratique du Congo. Ces informations peuvent être utilisées par les gestionnaires du territoire en vue de la planification des stratégies de mitigation durable et la mise en œuvre des pratiques de conservation des sols.

Remerciements

- 54 Nous remercions le USGS et la NASA pour les images satellitaires et le MNT-SRTM du secteur d'étude, l'ISRIC avec la base des données SOTERCAF 1.0 pour les données pédologiques et l'équipe de WordClim pour les données climatiques qu'ils ont mises gratuitement à la disposition du public et qui ont été nécessaires dans la réalisation de ce travail. Nous remercions également les deux lecteurs anonymes pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

Adinarayana J, K.G. Rao, N.R. Krishna, P. Venkatachalam et J.K. Suri, 1999, A rule-based soil erosion model for a hilly catchment, *Catena* [en ligne], 37, pp. 309-318, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00023-5)

Alexandridis, T.K., A.M. Sotiropoulou, G. Bilas, N. Karapetsas et N.G.Silleos, 2014, The effects of seasonality in estimating the C-factor of soil erosion studies, *Land Degradation and Development* [en ligne], 16 p., DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2223>

Azanga, E., M. Majaliwa, F. Kansiime, N. Mushagalusa, K. Karume et M.M. Tenywa, 2016, Land-use and land cover, sediment and nutrient hotspot areas changes in Lake Tanganyika Basin, *African Journal of Rural Development* [en ligne], 1(1): 2016, pp. 75-90, DOI: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.263630>

Bakker, M.M., G. Govers, A.V. Doorn, F. Quetier, D. Chouvardas et M. Rounsevell, 2008, The response of soil erosion and sediment export to land use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern, *Geomorphology* [en ligne], Volume 98, Issues 3-4, 15 June 2008, pp. 213-226, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.027>

Bamutaze, Y., 2015, Revisiting socio-ecological resilience and sustainability in the coupled mountain landscapes in Eastern Africa, *Curr. Opin. Environ. Sustain.* [en ligne], 14, pp. 257-265, DOI :

<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.010>

Batjes, H.B., 2007, *SOTER-based soil parameter estimates for Central Africa-DR of Congo, Burundi and Rwanda (SOTWIScaf, version 1.0)*. Report 2007/02, ISRIC-World Soil Information, Wageningen, [en ligne] URL: http://www.isric.org/isric/webdocs/docs/isric_report_2007_02.pdf

Belayneh, M., Yirgu, T. and Tsegaye. D., 2019, Potential soil erosion estimation and area prioritization for better conservation planning in Gumara watershed using RUSLE and GIS techniques, *Environmental Systems Research* [en ligne], 8:20, 17 p., DOI: <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0149-x>

Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., Norton, K., 2018, A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* [en ligne], 22, pp. 6059-6086, DOI : <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>

Bewket. W., Teferi, E., 2009, Assessment of soil erosion hazard and prioritization for treatment at the watershed level: case study in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia, *Land Degrad Devlop* [en ligne], 20, pp. 609-622, DOI : <https://doi.org/10.1002/ldr.944>

Butara S., 2012, Glissements de terrain et cause de leur déclenchement : cas de la cite d'Uvira et sa partie méridionale (Sud-kivu, RDC). Travail de fin d'étude Master.

Claessens, L., Van Breugel, P., Notenbaert, A., Herrero, M., Van De Steeg, J., 2008, Mapping potential soil erosion in east Africa using the universal soil loss equation and secondary data, *IAHS Publ.* 2008, pp. 398-407.

Datta, P.S, Schack H.K., 2010, Erosion Relevant Topographical Parameters Derived from Different DEMs—A Comparative Study from the Indian Lesser Himalayas, *Remote Sensing* [en ligne], 2, pp. 1941-1961, DOI : <https://doi.org/10.3390/rs2081941>

de Figueiredo, T., Fonseca, F., 1997, Les sols, les processus d'érosion et l'utilisation de la terre en montagne au Nord-Est du Portugal: Approche cartographique sur quelques zones du Parc Naturel de Montesinho, *Réseau Eros Bull.*, 17, pp. 205-217

De Jong, S.M., 1994, Application of Reflective Remote Sensing for Land Degradation Studies in a Mediterranean Environment, Netherlands Geographical Studies, University of Utrecht.

Desmet, P. Govers, G.A., 1996, GIS procedure for automatically calculating the ULSE LS factor on topographically complex landscape units, *J. Soil Water Conserv.*, 51, pp. 427-433.

- Durigon, V.L., Carvalho, D.F., Antunes, M.A.H., Oliveira, P.T.S., Fernandes, M.M., 2014, NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed, *International Journal of Remote Sensing* [en ligne], 35, pp. 441-453, DOI : <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.871081>
- Fick, S.E. and Hijmans, R.J., 2017, Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology* [en ligne], 37,12, October 2017, pp. 4302-4315, DOI : <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Ganasri, B.P., Ramesh H., 2015, Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin, *Geoscience Frontiers* [en ligne], DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- Gashaw, T., Tulu, T. et Argaw, M., 2017, Erosion risk assessment for prioritization of conservation measures in Geleda watershed, Blue Nile basin, Ethiopia, *Environmental Systems Research* [en ligne], 6:1, 14 p., DOI : <https://doi.org/10.1186/s40068-016-0078-x>
- Guth, P.L., 2010, Geomorphometric comparison of ASTER GDEM and SRTM, Symposium of ISPRS Technical Commission IV & AutoCarto, November 15-19, 2010 Orlando, Florida, pp. 15-19, [En ligne] URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part4/files/Guth.pdf>
- Huang, F., Chen, J., Du, Z., Yao, C., Huang, J., Jiang, Q., Chang, Z. and Li, S., 2020, Landslide Susceptibility Prediction Considering Regional Soil Erosion Based on Machine-Learning Model, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* [en ligne], 9, 377, DOI : <https://doi.org/10.3390/ijgi9060377>
- Hurni H., 1985, Erosion-productivity-conservation systems in Ethiopia. In: Paper presented at the 4th international conference on soil conservation, 3-9 Nov. 1985, Maracacy, Venezuela
- Hurni, H., 1985, An Ecosystem Approach to Soil Conservation. In *Soil Erosion and Conservation*; Swaify, E.L., Samir, A., Moldenhauer, W.C., Eds.; Soil Conservation Society of America: Ankeny, IA, USA, 1985, 73, pp. 759-771.
- Ilunga L., 1991, Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du Sud-Kivu, *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 27, pp. 209-228
- Ilunga L., 2006, Etude des sites majeurs d'érosion à Uvira (R.D. Congo), *Geo-Eco-Trop*, 2006, 30.2, pp. 1-12
- Ilunga, L. et Alexandre, J., 1982, La géomorphologie de la plaine de la Ruzizi. Analyse et cartographie, *Geo-Eco-Trop*, 6,2, pp. 105-123
- Karamage, F., Shao, H., Chen, X, Ndayisaba, F., Nahayo, L., Kayiranga, A., Kehinde, O.J., Liu, T. and Zhang, C., 2016, Deforestation Effects on Soil Erosion in the Lake Kivu Basin, D.R. Congo-Rwanda, *Forests* [en ligne], 7, 281, 17 p. , DOI : <https://doi.org/10.3390/f7110281>
- Karamage, F., Zhang, C., Liu, T., Maganda, A. and Isabwe, A., 2017, Soil Erosion Risk Assessment in Uganda, *Forests* [en ligne], 8, 52, DOI : <https://doi.org/10.3390/f8020052>
- Khosrokhani M. Pradhan B., 2014, Spatio-temporal assessment of soil erosion at Kuala Lumpur metropolitan city using remote sensing data and GIS, *Geomatics, Natural Hazards and Risk* [en ligne], 5:3, pp. 252-270, DOI : <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.794164>
- Le Van, B., Truong, P.M., An Tran Thi, Raghavan, V., 2014, An open source GIS approach for soil erosion modeling in danang city, vietnam, *International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences 2014*, 8 p.

- Lee S., 2004, Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: a case study at Boun, Korea, *Environmental Geology* [en ligne], 45, pp. 457-465, DOI : <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0897-8>
- Lo, A., El-Swaify, S.A., Dangler, E.W., Shinshiro, L., 1985, Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii, dans: *Soil Erosion and Conservation*; E1-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C., Lo, A., Eds.; Soil Conservation Society of America: Ankeny, IA, USA, 1985; pp. 384-392.
- McCool, D., Brown, L., Foster, G., Mutchler, C., Meyer, L., 1987, Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation, *Trans. ASAE* 1987, 30, pp. 1387-1396.
- Molnar, D. and Julien, P., 1998, Estimation of upland erosion using GIS, *Comput. Geosci.* 1998, 24, pp. 183-192.
- Morgan, R.P.C., 2009, *Soil Erosion and Conservation*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2009.
- Nachtergaele, F., Petri, M., Biancalani, R., Van Lynden, G., Van Velthuizen, H., Bloise, M., 2010, Global Land Degradation Information System (Gladis); Beta Version. An Information Database for Land Degradation Assessment at Global Level. Land Degradation Assessment in Drylands Technical Report; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010; Volume 17, [en ligne] URL: http://www.fao.org/nr/lada/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=773&Itemid=165&lang=en, consulté le 17 juin 2015.
- Ndolo G.P., 2015, GIS-based soil erosion modeling and sediment yield of the N'djili river basin, Democratic Republic of Congo, Master degree thesis, Degree of Master of Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, Summer 2015, 220 p.
- Ngumbu, K., 2004, Contribution à l'inventaire systématique des oiseaux aquatiques dans les villes de Bukavu et Uvira, Sud-Kivu, mémoire, Inédit, Faculté des sciences, Département de Biologie, UOB, Bukavu, RDC
- Nguyen T. H., 1996, Determining the causing factors for soil erosion and the potential for predicting soil erosion in slope area, PhD. thesis, Thuy Loi University, Hanoi.
- Oliveira, J.D.A., Dominguez, J.M.L., Nearing, M.A., Oliveira, P.T., 2015, A GIS-based procedure for automatically calculating soil loss from the universal soil loss equation Gisus-m., *Appl. Eng. Agric.* [en ligne], 31, 907, DOI : <https://doi.org/10.13031/aea.31.11093>
- Oliveira, P.T.S., Rodrigues, D.B.B., Sobrinho A., T., Panachuki, E, Wendland, E., 2013, Use of SRTM data to calculate the (R)USLE topographic factor, *Acta Scientiarum. Technology* [en ligne], 15, pp. 507-513, DOI : <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v35i3.15792>
- Ongezo, M. S, Norbert, J., Mtalo, F. and Ndomba P.M., 2014, Sediment yields estimation and sources identification in Lake Tanganyika basin- the case of Mulongwe sub catchment - Uvira city - DR Congo, *Standard Global Journal of Geology and Explorational Research*, 1(2), pp. 032- 042.
- Panagos P., Borrelli P. and Meusburger K., 2015, A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water, *Geosciences* [en ligne], 5, pp. 117-126, DOI : <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
- Payet E., P. Dumas et G. Pennober, 2011, Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 11 Numéro 3 | décembre 2011, URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/12591>; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.12591>, Consulté le 18 juin 2019

- Pradhan, B., A. Chaudhari, J. Adinarayana et M. F. Buchroithner, 2012, Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia, *Environ Monit Assess* [en ligne], 184, pp. 715-727, DOI :<https://doi.org/10.1007/s10661-011-1996-8>
- Renard, K.G., J.R. Freimund, 1994, Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE, *Journal of Hydrology*, 157(1), pp. 287-306.
- Roose, E., 1977, Érosion et Ruissellement en Afrique de l'ouest--vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et Documents de l'ORSTOM No. 78, ORSTOM, Paris
- Sarathi, B. S., P. Pani, 2015, Estimation of soil erosion using RUSLE and GIS techniques: a case study of Barakar River basin, Jharkhand, India, *Model. Earth Syst. Environ.* 2015, 1:42, 13 p., DOI: [10.1007/s40808-015-0040-3](https://doi.org/10.1007/s40808-015-0040-3)
- Shin G., 1999, The Analysis of Soil Erosion Analysis in Watershed Using Gis. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Gang-Won National University, Chuncheon, Korea, 1999
- Singh, S., and Kumar, P.R., 2017, Grid-cell based assessment of soil erosion potential for identification of critical erosion prone areas using USLE, GIS and remote sensing: A casestudy in the Kapgari watershed, India, *International Soil and Water Conservation Research* [En ligne], 5, pp. 202-211, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.05.006>
- Tadesse, L., K.V. Suryabhagavan, G. Sridhar et G. Legesse, 2017, Land use and land cover changes and Soil erosion in Yezat Watershed, North Western Ethiopia, *International Soil and Water Conservation Research* [En ligne], pp. 85-94., DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.05.004>
- Tamene, L., Z. Adimassu, E. Aynekulu et T. Yaekob, 2017, Estimating landscape susceptibility to soil erosion using a GIS-based approach in Northern Ethiopia, *International Soil and Water Conservation Research* [En ligne], 5, pp. 221-230, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.05.002>
- Tshikeba, K.M., Muamba, T.R., Onema K.J-M., Gumindoga, W., and Tshimpampa, B.J., 2018, A GIS-based estimation of soil erosion parameters for soil loss potential and erosion hazard in the city of Kinshasa, the Democratic Republic of Congo, *Proc. IAHS*, 378, pp. 51-57, DOI : <https://doi.org/10.5194/piahs-378-51-2018>
- Van der Knijff, J. M., R.J.A. Jones et L. Montanarella, 2000, Soil Erosion Risk Assessment in Europe, [En ligne] URL: https://www.unisdr.org/files/1581_ereurnew2.pdf, consulté le 21 novembre 2018.
- Williams, J., 1995, *The EPIC model*, in *Computer Models of Watershed Hydrology*, edited by V. P. Singh, Colorado, USA, pp. 909-1000
- Wischmeier, W. H., D.D. Smith, 1978, *Predicting Rainfall Erosion Losses - À Guide to Conservation Planning*. U.S. Department of Agriculture Handbook No. 537. Washington, DC: USDA.
- Wu, S., J. Li et G. Huang, 2005, An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models, *Environ. Model. Assess.* [En ligne], 10, pp. 33-42, DOI : <https://doi.org/10.1007/s10666-004-6595-4>

NOTES

- [En ligne] URL : <http://worldclim.org/version2>
- Disponible [En ligne] URL : www.isric.org
- [En ligne] URL : <http://earthexplorer.usgs.gov>
- [En ligne] URL : <http://cci.esa.int/>

RÉSUMÉS

L'érosion des sols est un risque naturel qui est exacerbé par les activités anthropiques en République démocratique du Congo. Cependant, il existe peu d'information sur la spatialisation de ce phénomène à l'échelle territoriale. Cette étude est basée sur l'utilisation du modèle USLE (*Universal Soil Loss Equation*) et des données en accès libre pour cartographier les zones à risque d'érosion et faire la priorisation des zones pour la conservation des sols dans le territoire d'Uvira. Au regard de résultats, 52,79 % du territoire est caractérisé par un risque d'érosion faible tandis que 47,21 % font face à un risque de perte de sol supérieure à la limite tolérable de 11 t/ha/an dans le contexte des paysages tropicaux et montagneux. Ce risque est accentué par la perte du couvert végétal au profit de l'extension des zones urbaines et agricoles. Le faible niveau de sensibilité à l'érosion se trouve au niveau de la plaine de la Ruzizi tandis que les zones situées dans les plateaux présentent une forte sensibilité en raison de leur relief accidenté et une pluviosité forte. L'analyse statistique des rapports de fréquence des glissements de terrain montre l'existence d'une relation entre leur occurrence et les zones d'intensité d'érosion. La modélisation de la perte de sol en fonction des différentes méthodes de protection de sol montre que l'approche de mise en place des bandes enherbées et l'aménagement des terrasses sont les plus appropriés pour réduire le risque d'érosion dans ce secteur. Ces méthodes peuvent être associées aux efforts d'afforestation pour une protection efficace des sols.

Soil erosion is among the natural hazards that are exacerbated by human activities in the Democratic Republic of Congo (DRC). However, there is little information on the spatialization of this phenomenon at the territorial level in the DRC. This study assesses the potential use of Geographic Information System (GIS) techniques and open access data to map areas at risk of erosion and prioritize areas for soil conservation in Uvira's territory. In terms of results, 52.79% of this territory is characterized by a low risk of erosion with an average soil loss of 6.08 t ha⁻¹ year⁻¹ while 47.21% faces a risk of soil loss which excess the tolerable limit of 11 t ha⁻¹ year⁻¹ for highlands of tropical areas. This risk is accentuated by the loss of vegetation cover in profit of agricultural activities and urbanization. The low level of sensibility to erosion is found in the Ruzizi plain while the areas in the plateaus are highly susceptible due to their rugged terrain and high rainfall intensity. The statistical analysis of the frequency ratios of landslide shows the existence of a relationship between their occurrence and erosion intensity zones defined on the basis of the Universal Soil Loss Equation (USLE model). Soil loss modeling for different soil protection methods shows that the grassland banding and terracing approach are most appropriate to reduce the risk of erosion in this area. These methods can be combined with afforestation efforts for effective soil protection in Uvira.

INDEX

Mots-clés : érosion, SIG libre, aménagement du territoire, conservation des sols, République démocratique du Congo

Keywords : erosion, open GIS, spatial planning, soil conservation, Democratic Republic of Congo

AUTEUR

JEAN NACISHALI NTERANYA

Département de géologie, faculté des sciences, Université officielle de Bukavu (UOB), BP 570
Bukavu, R.D. Congo, courriel : j.nacishali@gmail.com