

Erosion Hydrique dans la ville de Kananga en RD. Congo : Krigeage et Modélisation

Bushabu Ngolo Hubert¹, Kabasele Yenga-Yenga Albert², Minga Milolo Stéphane³, Kitenge Okaya Singlaithons⁴, Kazadi Tshiamala Evariste⁵, Piema Makima Hilaire⁶

Département De Physique Et Techniques Appliquées, Université Pédagogique De Kananga (UPKAN), Kananga, RD. Congo

Département De Physique Et Sciences Appliquées, Laboratoire De Télédétection Spatiale, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD. Congo

Département De Physique Et Sciences Appliquées, Laboratoire De Géophysique, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD. Congo

Ecole De Télécommunication Et De Télédétection Spatiale (ETS), Laboratoire Osmac, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD. Congo

Section De Mécanique, Institut Supérieur Des Techniques Appliquées (ISTA) De Domiongo, Domiongo, RD. Congo

Résumé

Contexte : L'érosion hydrique reste un fléau naturel favorisée par une couverture végétale de faible indice de végétation par différence normalisée (NDVI), des précipitations saisonnières très fortes précipitations et un relief dominé par des pentes de déclivité moyenne 14 % (Yamba, 2016). Le volume de terre arraché et la masse de terre érodée dépendent aussi des structures géologiques qui forment la ville de Kananga. Cette étude vise à évaluer ces deux grandeurs érodées selon le type de sols afin d'en donner la distribution spatiale.

Matériels et Méthodes : Le krigeage est une méthode d'interpolation qui permet d'estimer la valeur d'une variable en des points non mesurés, en tenant compte de la spatialisation des données connues. Les étapes sont les suivantes :

- Construction du variogramme expérimental, représentant la variabilité spatiale des données.
- Ajustement d'un modèle théorique (sphérique dans cette étude).
- Application du krigeage ordinaire pour interpoler la surface d'érosion.
- Validation croisée (cross-validation) pour mesurer la précision du modèle.

Résultats : Les résultats confirment que l'érosion hydrique à Kananga est fortement liée à des facteurs anthropiques, notamment la mauvaise gestion de l'urbanisation. Le krigeage s'est révélé être un outil efficace pour détecter les zones critiques, avec une précision satisfaisante. Cependant, la qualité des résultats dépend de la densité et de la distribution spatiale des points d'observation.

Des données complémentaires (type de sol, infiltration, usage du sol) pourraient améliorer la précision des estimations. L'intégration future de modèles hydrologiques (type RUSLE ou WEPP) renforcerait l'analyse en tenant compte des processus dynamiques. Les résultats sont comparables à d'autres études menées à Mbuji-Mayi ou dans le sud du Tchad, où l'urbanisation incontrôlée favorise l'érosion.

Conclusion : Le résultat du krigeage montre que le sud-ouest de la ville est moins vulnérable que le reste. Ses profondeurs pouvant varier entre 10,43132 m – 12,83744 m pour la première zone et 16,21722 m – 37 m pour la seconde.

Mots clés : krigeage, variogramme, modélisation, érosion.

Date of Submission: 01-05-2025

Date of Acceptance: 10-05-2025

I. Introduction

L'on procède dans cette étude au krigeage de dix-neuf sites érosifs qui menacent la ville de Kananga et l'on modélise le volume cumulé de terre arraché ainsi que la masse érodée par rapport aux changements climatiques. Les érosions vives sont ensuite groupées selon la structure géomorphologique de la ville. Les précipitations mensuelles et l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) sont suivis afin de discriminer l'ampleur du volume de terre arraché et de la masse érodée.

II. Milieu, Matériels Et Méthodes

Cette étude porte sur dix-neuf érosions vives de la ville de Kananga en République Démocratique du Congo. Leurs caractéristiques intrinsèques sont suivies de janvier 2004 à décembre 2023 et les données climatiques de janvier 2000 à décembre 2023. La masse de terre érodée est évaluée par la méthode des volumes finis et son évolution soumise aux aléas de changements climatiques.

Milieu d'étude

A₁. Situation géographique et administrative

La ville de Kananga, chef-lieu de la Province du Kasai Central en République Démocratique du Congo, est comprise entre les latitudes 05°45'S - 06°00'S et les longitudes 22°15'E - 22°30' E. Sa superficie (SIG) est de 743 km².

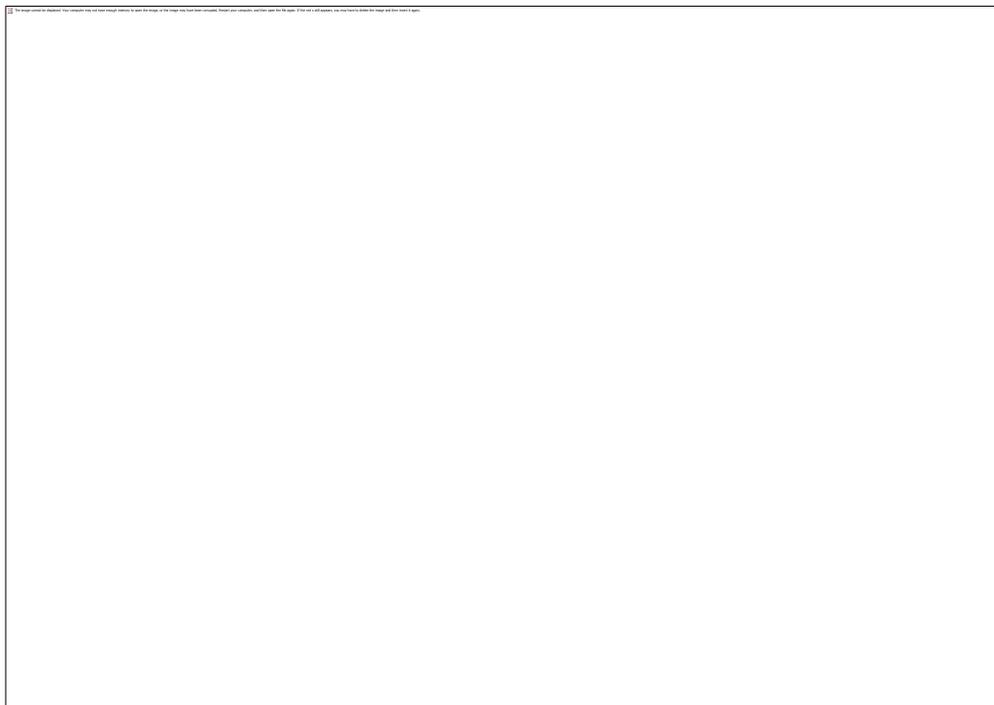


Figure 1. Carte administrative de la ville de Kananga

Elle est bornée par les territoires ci-après : Demba au nord, Dibaya au sud, Dimbelenge à l'Est, Kazumba à l'Ouest et comprend cinq communes : Commune de Kananga (300 km²), Commune de Ndesha (44 km²), Commune de Katoka (24 km²), Commune de Lukonga (153 km²) et la Commune de Nganza (222 km²) (Figure 1).

A₂. Démographie

La population de Kananga s'élevait à 1 735552 habitants en 2024, soit une densité d'environ 2335 habitants au km².

Cette densité élevée peut constituer un des facteurs favorisant de l'érosion (<https://worldpopulationreview.com/cities>)

A₃. Hydrographie

La ville de Kananga est traversée, comme illustré sur la figure 1 ci-dessus :

- au Nord-Est par la rivière Tshibashi, alimentée par les rivières Lunganda, Malole, Kamilobi et Ndesha ;
- au Sud par la rivière Nganza alimentée par les rivières Katoka, Kele-kele, Kamayi et Katuishi ;
- au Sud-Ouest par les rivières Lubi et Nkombua qui se déversent dans Lulua (CGES, 2023).

Les rivières Tshibashi et Nganza forment deux sous bassins versants du bassin versant de la rivière Lulua au niveau de la ville de Kananga.

A₄. Localisation des sites érosifs

Avec les GPS décrits ci-haut, les sites érosifs ont été localisés, tel qu'indiqué sur la figure 3 ci-dessous et décrit dans le tableau 1 ci-dessous. AM, AV et Fd indiquent respectivement amont, aval et fond.



Figure 3. Localisation des sites érosifs de la ville de Kananga

La Commune de Kananga recense le plus grand nombre : huit (8) sur dix-neuf, suivie de la commune de Katoka qui en a quatre (4).

Tableau 1. Localisation des sites érosifs

N°	Sigle	Commune	Latitude-Sud	Longitude-Est	Elévation (m)		
					AM	AV	Fd
1	Kga_1	Kananga	5,90141°	22,48258°	660	640	642
2	Kga_2	Kananga	5,90139°	22,48254°	655	642	648
3	Kga_3	Kananga	5,90392°	22,42597°	621	608	613
4	Kga_4	Kananga	5,88391°	22,44682°	631	592	594
5	Kga_5	Kananga	5,88373°	22,44727°	622	609	602
6	Kga_6	Kananga	5,89690°	22,42151°	640	582	637
7	Kga_7	Kananga	5,89464°	22,40400°	620	582	609
8	Kga_8	Kananga	5,89295°	22,40492°	630	591	604
9	Nds_1	Ndesha	5,89232°	22,38572°	625	620	621
10	Nds_2	Ndesha	5,89144°	22,38572°	622	598	600
11	Nds_3	Ndesha	5,89238°	22,38476°	628	612	615
12	Ktk_1	Katoka	5,91270°	22,39303°	625	588	607
13	Ktk_2	Katoka	5,91061°	22,38384°	598	586	589
14	Ktk_3	Katoka	5,89362°	22,38425°	618	607	610
15	Ktk_4	Katoka	5,89348°	22,38409°	624	608	612
16	Lkg_1	Lukonga	5,86111°	22,38323°	594	586	588
17	Lkg_2	Lukonga	5,86161°	22,38314°	592	596	582
18	Ngz_1	Nganza	5,92844°	22,40802°	636	626	627
19	Ngz_2	Nganza	5,92803°	22,40743°	640	623	626

Evolution spatio-temporelle des variables climatiques

B₁. Température maximum de l'air



Figure 4. Evolution annuelle de la température maximum

La tendance générale est à la hausse depuis 2015 (Pinker, 2014).

B₂. Température minimum de l'air

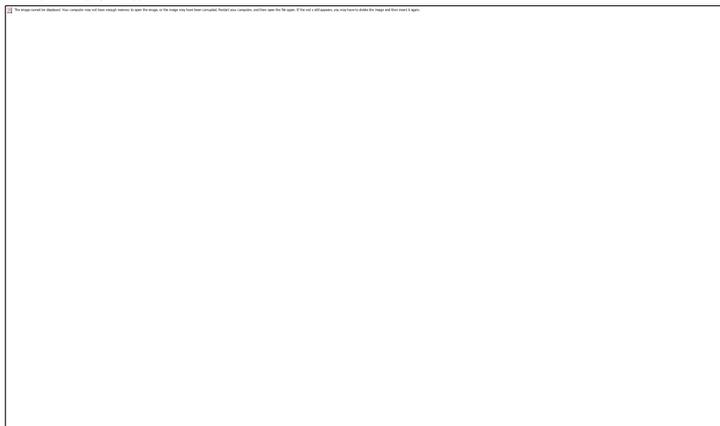


Figure 5. Evolution annuelle de la température minimum

Depuis 2015, la température minimum de la ville est en hausse comme illustré sur les figures 4 et 5. Ce qui conforte les prédictions de Pinker et al. (2005).

B₃. Irradiances

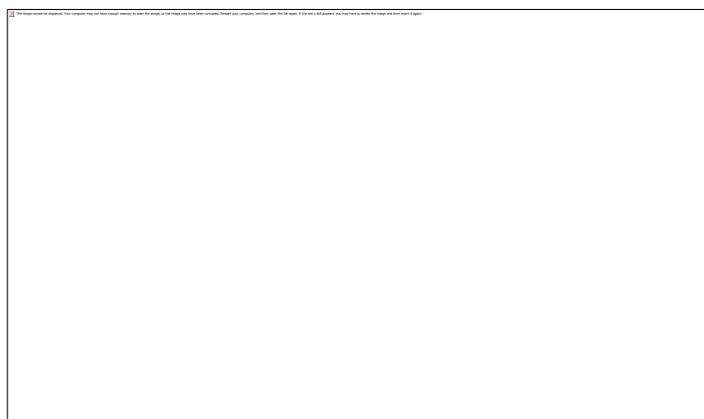


Figure 6. Evolution annuelle des irradiances

Comme les températures, en évolution annuelle, les irradiances sont aussi en hausse et atteignent $197,00 \text{ W.m}^{-2}$.

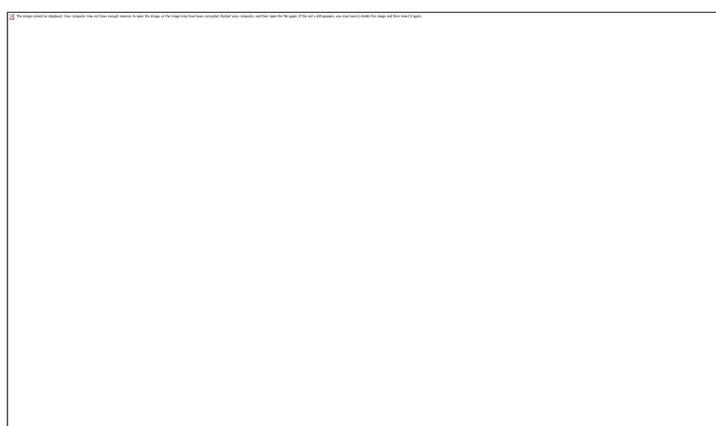


Figure 7. Evolution mensuelle des irradiances

En évolution mensuelle, les irradiances sur la ville oscillent entre 175 W.m^{-2} en juillet et 210 W.m^{-2} en octobre.

B₄. Précipitations mensuelles

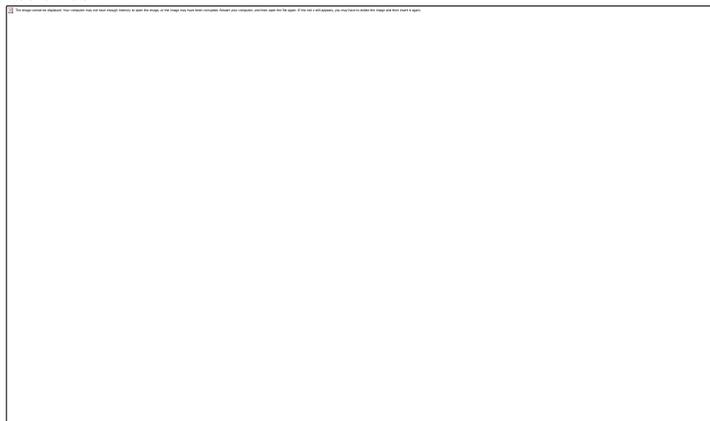


Figure 8. Evolution mensuelle des précipitations

La ville de Kananga, de par sa position géographique, connaît des fortes précipitations en avril avec 160 mm et très fortes en novembre avec 210 mm. Elles sont quasi nulles en juillet.



Figure 9. Evolution annuelle des précipitations

La tendance générale des précipitations est à la baisse depuis 2010.

B₅. Ruissellement

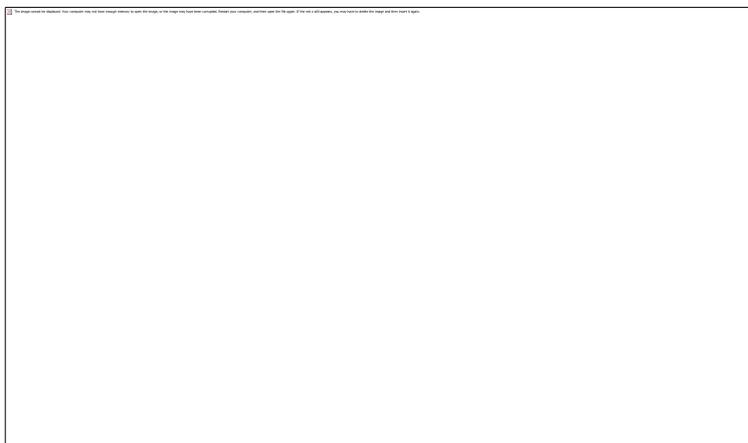


Figure 10. Evolution annuelle du ruissellement

En évolution annuelle, le ruissellement sur le sol de la ville est en baisse depuis 2006. Baisse qui s'est accélérée à partir de 2013.

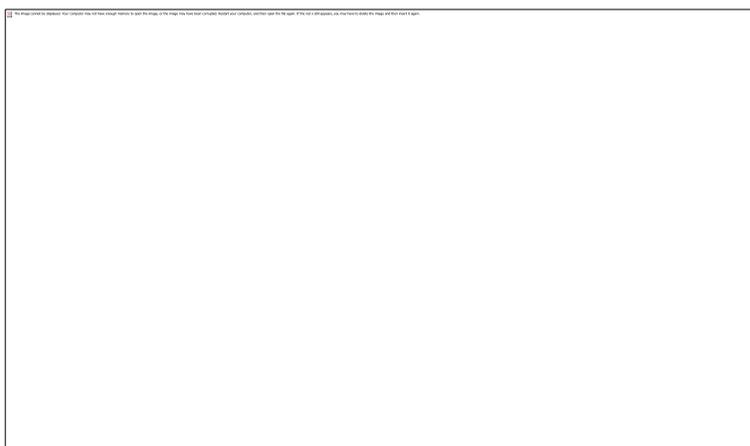


Figure 11. Evolution mensuelle du ruissellement

Le ruissellement affiche les pics en avril et en novembre, respectivement de 38 mm et 58 mm. A priori, il est proportionnel aux précipitations mensuelles.

B₆. Humidité relative

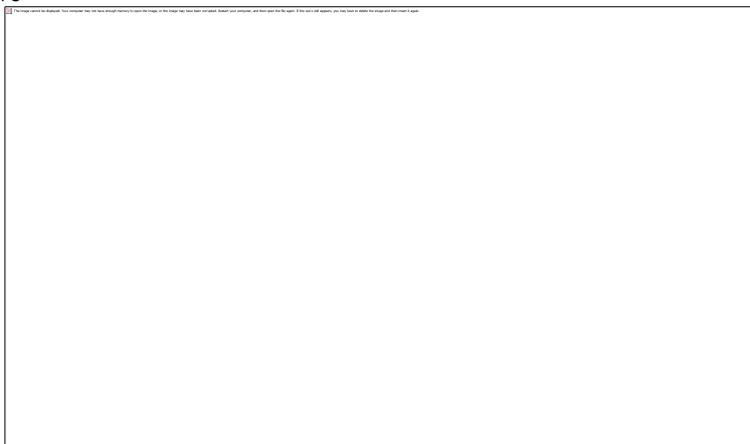


Figure 12. Evolution mensuelle de l'humidité relative

L'humidité relative reste basse en juillet affichant un taux de 33 %.

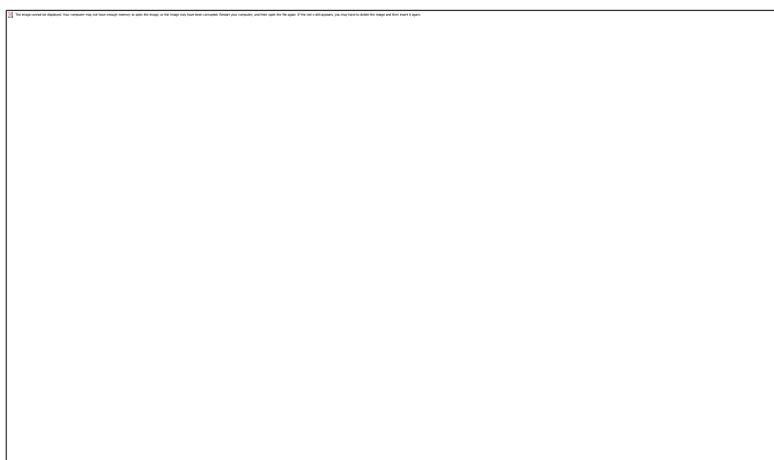


Figure 13. Evolution annuelle de l'humidité relative

En évolution mensuelle, l'humidité relative est en baisse constante depuis 2013 sur la ville de Kananga.

B7. Evapotranspiration



Figure 14. Evolution annuelle de l'évapotranspiration

Le sol de Kananga n'évapotranspire pas assez.

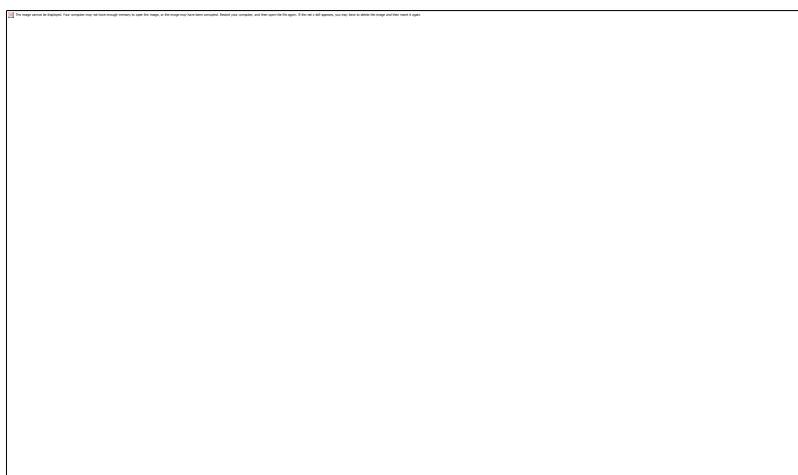


Figure 15. Evolution mensuelle de l'évapotranspiration

En évolution mensuelle, l'évapotranspiration sur la ville atteint le minimum de 23 mm en juillet et les maxima de 117 mm en avril et octobre.

B8. Végétation



Figure 16. Evolution mensuelle du NDVI

La biomasse végétale de la ville qui n'affiche une bonne vigueur, atteint le minimum en août pendant la saison sèche.

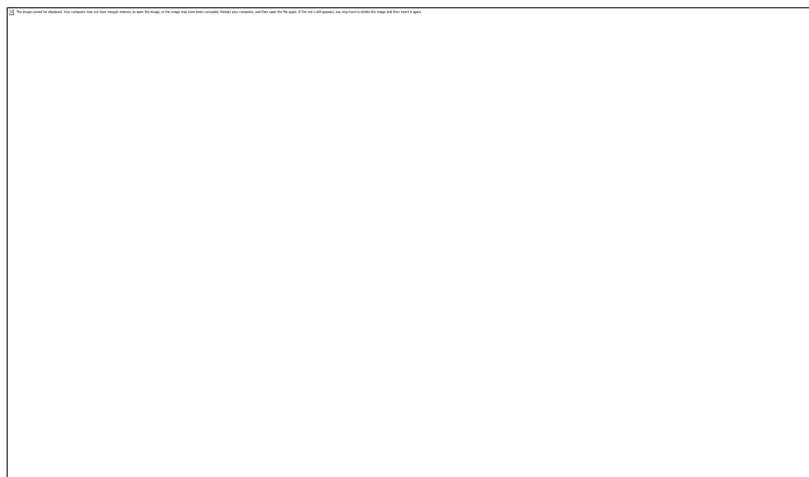


Figure 17. Evolution annuelle du NDVI

La végétation de la ville affiche les indices très bas ne dépassant pas 0,62. Toutefois, depuis 2018, il y a amélioration de la biomasse végétale.

Modélisation

Récapitulatif du modèle

Tableau 5. Récapitulatif du modèle PP – Hum(sol)

Récapitulatif des modèles				
Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
	Sites_érosifs = Kanangal (sélectionné)			
1	,715 ^a	,511	,509	30,88177
a. Prédicteurs : (Constante), PP_mm				

Tableau 6. Modèle PP – Hum (sol)

Coefficients ^{a,b}						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	41,203	3,157		13,052	,000
	PP_mm	,405	,023	,715	17,280	,000
a. Variable dépendante : Hum_sol_%						
b. Sélection exclusive des observations pour lesquelles Sites_érosifs = Kanangal						

Les tableaux 5 et 6 ci-dessus reprennent respectivement le récapitulatif du modèle ANOVA des précipitations mensuelles. En effet, la signification du modèle est très bonne (p-value <0,000) et le résidu très important, soit 41,203, confirmant l'influence positive des précipitations mensuelles sur l'humidité du sol.

Krigeage des sites érosifs

Afin de mieux comprendre et anticiper l'évolution de ce phénomène, cette étude mobilise la méthode du krigeage, une technique géostatistique d'interpolation spatiale permettant de modéliser la distribution de l'érosion à partir de données mesurées sur le terrain. L'objectif principal est de produire une carte prédictive des zones à risque, en vue de soutenir la prise de décision en matière d'aménagement urbain et de gestion environnementale.

Matériels et Données

E1. Matériels

Les matériels suivants ont été utilisés dans cette étude : un décimètre, une équerre, un rapporteur, un niveau d'eau de maçon, deux GPS : l'un de marque Garmin GPS map 62 et l'autre de marque Garmin etrex 10.

Les logiciels suivants sont utilisés :

- QGIS 10.8 pour la spatialisation des résultats (cartographie numérique) ;
- IBM SPSS26 pour la constitution de la base de données et la modélisation.

E₂. Données

L'étude a nécessité:

- des données prélevées in situ avec les matériels ci-haut décrits pour la période 2004 à 2023. La longueur, la largeur et la profondeur des érosions exprimées en mètres (m), sont consignées dans le tableau 2 ci-dessous.
- des données météorologiques livrées par la METTELSAT : de janvier 2000 à décembre 2023 ;
- des données satellitaires fournies par « Terra climat (<http://www.climatologylab.org>) » au pas mensuel : de janvier 2000 à décembre 2023.

Méthodes

Le krigeage est une méthode d'interpolation qui permet d'estimer la valeur d'une variable en des points non mesurés, en tenant compte de la spatialisation des données connues. Les étapes sont les suivantes :

- Construction du variogramme expérimental, représentant la variabilité spatiale des données.
- Ajustement d'un modèle théorique (sphérique dans cette étude).
- Application du krigeage ordinaire pour interpoler la surface d'érosion.
- Validation croisée (cross-validation) pour mesurer la précision du modèle.

III. Résultats

L'application du krigeage a permis de générer une carte prédictive des zones vulnérables à l'érosion hydrique. Les résultats montrent une forte concentration des zones à haut risque dans les secteurs à fortes pentes et à occupation non planifiée.

Les quartiers de Katoka et de Nganza présentent les indices d'érosion les plus élevés, avec des ravins atteignant plus de 10 mètres de profondeur et plusieurs dizaines de mètres de large. Les zones avec un couvert végétal dense présentent une érosion moins intense.

La modélisation a mis en évidence une corrélation claire entre l'intensité du ruissellement et l'absence de dispositifs antiérosifs (rigoles, caniveaux, plantations). Les valeurs interpolées sont accompagnées d'un indice de confiance, ce qui permet une meilleure lecture des incertitudes spatiales.

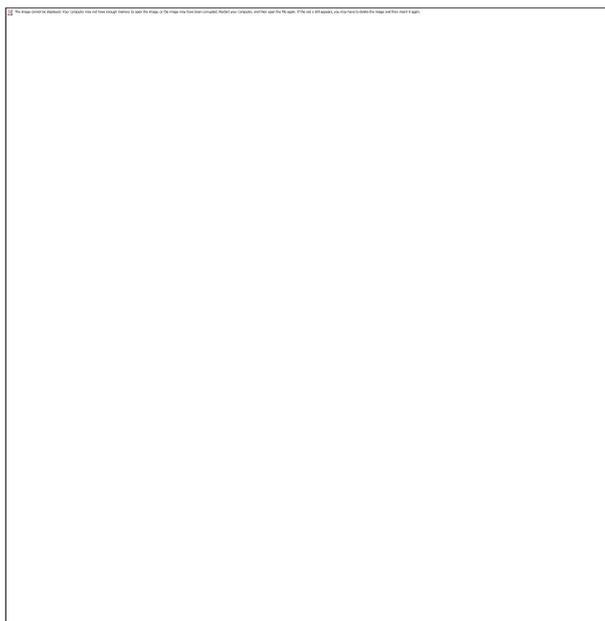


Figure 18. Prédiction des zones vulnérables à l'érosion hydrique

On observe de la figure 18 ci-dessus deux zones dans la ville de Kananga avec des taux de vulnérabilité différents. En effet, le sud-ouest de la ville est moins vulnérable que le reste. Les profondeurs pouvant varier entre 10,43132 m – 12,83744 m pour la première zone et 16,21722 m – 37 m pour la seconde.

IV. Discussion

Les résultats confirment que l'érosion hydrique à Kananga est fortement liée à des facteurs anthropiques, notamment la mauvaise gestion de l'urbanisation. Le krigeage s'est révélé être un outil efficace

pour détecter les zones critiques, avec une précision satisfaisante. Cependant, la qualité des résultats dépend de la densité et de la distribution spatiale des points d'observation.

Des données complémentaires (type de sol, infiltration, usage du sol) pourraient améliorer la précision des estimations. L'intégration future de modèles hydrologiques (type RUSLE ou WEPP) renforcerait l'analyse en tenant compte des processus dynamiques. Les résultats sont comparables à d'autres études menées à Mbuji-Mayi ou dans le sud du Tchad, où l'urbanisation incontrôlée favorise l'érosion.

V. Conclusion

En résumé, le résultat du krigeage montre que le sud-ouest de la ville est moins vulnérable que le reste. Ses profondeurs pouvant varier entre 10,43132 m – 12,83744 m pour la première zone et 16,21722 m – 37 m pour la seconde.

Références

- [1]. Ali Arif (2003). Méthodes Des Volumes Finis. Chapitre 3. Université Mohamed Khider Biskra.
- [2]. Amar Kassoul (2009). Physique 4. Mécanique Rationnelle. Cours Et Exercice. Université Hassiba Benbouadi De Chlef.
- [3]. Aurore Degré (2009). Hydrologie Générale. Notes De Cours Provisoires ; Année Académique 2009-2010. Gembloux.
- [4]. Beauchamp, J. (2005). Cours De Sédimentation Chapitre 3. Transport Des Matériaux. Université De Cergy Pontoise.
- [5]. Beaufils M.F. (2004). Gérer Les Inondations Par Ruissellement Pluvial. Guide De Sensibilisation. CEP.
- [6]. Ben Hadj Salem A. (2015). Cours D'initiation Au GPS. Volume 3. GVC.
- [7]. Ben Sahah Chafik (1984). Les Caractéristiques De L'érosion En Relation Avec Les Pratiques Agricoles. Mémoire DEA, Ressource En Eau. Université Paris Sud. Paris.
- [8]. Bonnet S., Toromanoff F., Bauwens S. Et Michez Andrien. (2013). Principes De Base De La Télédétection Et Ses Potentialités Comme Outil De Caractérisation De La Ressource Forestière. Partie 2. Le Lidar Aérien In Géoscience, Lidar. Liège.
- [9]. Bruno A. (1999). La Dynamique Du Cycle De L'eau Dans Un Bassin Versant. Processus, Facteurs, Modèles. 2^{ème} Edition HGA, Strasbourg.
- [10]. Bushabu Mbengele-Ming Et Al. (2002). Les Besoins Energétiques Des Ménages De Kananga (RDC). In Bulletin De La Société Géographique De Liège, 42, 2002-56-60.
- [11]. Bushabu Ngolo H. (2021). Modélisation Spatiotemporelle Du Ruissellement Des Eaux Sur Le Sol Du Bassin Versant De La Rivière De Lukunga (RDC). Mémoire DEA, Physique Spatiale De Télédétection. UPN/Kinshasa.
- [12]. Cairol R. (1987). Algèbre Linéaire 1. Presses Polytechniques Romandes. Lausanne (Suisse). ISBN : 2-88074—1106-6.
- [13]. Cagnac, G. Et Thiberge, L. (1957). Géométrie. Masson Et Cie. Paris.
- [14]. Campy, M. Et Macaire J.J (2003). Géologie De La Surface. Dunod. Paris.
- [15]. Carine Lucas (2016). Modélisation Des Problèmes De Mécanique Des Fluides : Approches Théoriques Et Numériques. Equations Aux Dérivées Partielles [Math. AP]. Thèse De Doctorat Université d'Orléans. Tel-01420101.
- [16]. Cecil C. A. (2015). Agents Et Causes De La Déforestation Et Dégradation Dans Les Sites Pilotes Du Projet FFEM (Fonds Français Pour L'environnement Mondial).
- [17]. CGES (2020). Projet D'urgence Et De Résilience De Kananga (PURUK). Rapport Final, Mai 2023. Ministère De L'urbanisme Et D'habitat.
- [18]. Cohen Marianne (2009). Dynamique Des Paysages, Erosion Et Développement Durable Dans Les Montagnes Méditerranéennes. Rapport Final D'activité. Avril 2009. UMR Ladyss. Université Paris 7. Denis Diderot.
- [19]. Dautreband S. Et Sohier C. (2006). L'érosion Hydrique Et Les Pertes En Sol En Région Wallonie. Faculté Universitaire Des Sciences Agronomiques De Gembloux.
- [20]. Delcourte Sarah (2007). Développement De Méthodes De Volumes Finis Pour La Mécanique Des Fluides. Cea. Thèse De Doctorat. Université De Toulouse.
- [21]. Echo (2014). Guide Pratique D'utilisation Du GPS Sur Le Terrain Et Cartographie Des Données. Coopi.
- [22]. FAO (1976). Aménagement Des Bassins Versants. Cahier FAO. Conservation Des Sols N°1.
- [23]. Foster G.R. (1990). Process- Based Modelling Of Soil Erosion By Water On Agricultural Land. In Soil Erosion On Agricultural Land (J. Bourdan. IDL. Foster, JA. Dearing, Éd.) John Willey And Sons Ltd. Chichester (UK). 229-245.
- [24]. Foster G.R. (1990). Process- Based Modelling Of Soil Erosion By Water On Agricultural Land. In Soil Erosion On Agricultural Land (J. Bourdan. IDL. Foster, JA. Dearing, Éd.) John Willey And Sons Ltd. Chichester (UK). 229-245.
- [25]. GEE S2. Modélisation Et Simulation Numérique Des Systèmes Energétiques Par Eléments Et Volumes Finis.
- [26]. Goovaerts, P. (1997). Geostatistics For Natural Resources Evaluation. Oxford University Press. Référence Incontournable Sur Le Krigeage Et Ses Applications.
- [27]. Hecht, E. (2012). Physique. Traduit De L'américain Par T. Becherrawy. De Boeck. Nouveaux Horizons. Paris ISBN 978-2-35745-147-6.
- [28]. Jalal Lakhilili (2016). Modélisation Et Simulation Numériques De L'érosion Par Méthode
- [29]. Jalal Lakhilili (2016). Modélisation Et Simulation Numériques De L'érosion Par Méthode
- [30]. Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). Mining Geostatistics. Academic Press. Ouvrage Fondateur Sur Le Krigeage Et Les Modèles Variographiques.
- [31]. Kemblowski, M. W., & McGarry, M. G. (1997). Spatial Interpolation Using Geostatistics. In Environmental Modeling (Pp. 237–269). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5923-1_9
- [32]. Kayembe Wa Kayembe Mathieu Et Wolf Eleonou (2015). Contribution De L'approche Géographique A L'étude Des Facteurs Humains De L'érosion Ravinante, Intra Urbain A Kinshasa RD Congo In Géo-Eco-Trop. Tome 1. 119-138.
- [33]. Lopian, M. J. Et Al. (2020). Erosions Urbaines A Kinshasa : Causes Conséquences Et Perspectives. Dans European Journal Of Social Sciences Studies. ISSN: 2501 – 8590. ISSN – L: 2501-8590. Online.
- [34]. Makanzu Fils Et Al. (2018). Kinshasa En Proie A L'érosion En Ravine : Inventaire Cartographique Et Impact Socio-Economique. En Ligne : Filmakanzu@Yahoo.Fr.
- [35]. Mbeza, M., Miti, T. Et Alou, K. (1991). L'érosion Ravinante Dans La Ville De Kolwezi Au Shaba. Dans Géo-Eco-Top. Pp. 91-104.
- [36]. Roose E., Et Sarrailh J.M. (1990). Érodibilité De Quelques Sols Tropicaux, Vingt Années De Mesures En Parcelle D'érosion Sous Pluies Naturelles. Cahier De L'orstom. Série Pédologie, Vol.25, N°12. 2up.

- [37]. Yamba, T. K. 2016. Changement Climatique Et Délimitation Spatiale Des Zones Vulnérables A L'aide De La Télédétection : Etude Du Cas De L'espace Urbain De Kananga (Kasaï Central/R.D. Congo).