



Impact de l'érosion ravinante sur la fertilité des sols des zones maraîchères des quartiers Kimwenza et Matadi Mayo dans la Commune de Mont-Ngafula à Kinshasa

Céline Matumona Seya¹, Paulin Lokanda Mpiangeli^{2,3}, Blaise Kamosi Zola³, Thérèse Kilensele Muwele², Fils Makanzu Imwangana^{*3,4}

⁽¹⁾Centre National de Télédétection. Direction Scientifique. Kinshasa (RDC).

⁽²⁾Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention Sciences et Gestion de l'Environnement. BP 190 Kinshasa XI (RDC)

⁽³⁾Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention Géosciences, Unité de Recherche et de Formation en Gestion des Risques Naturels (URF-GRN). BP 190 Kinshasa XI (RDC)

⁽⁴⁾Centre de Recherches Géologiques et Minières. Département de Géologie urbaine et Environnement. Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection. BP 898 Kinshasa I Gombe (RDC). E-mail : filsmakanzu@yahoo.fr

Reçu le 07 octobre 2025, accepté le 19 décembre 2025, publié en ligne le 27 décembre 2025

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v8i4.12>

RESUME

Description du sujet. L'érosion hydrique est une menace environnementale majeure pour la durabilité et la capacité productive de terres agricoles dans le monde en général et dans la ville de Kinshasa en particulier.

Objectif. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de l'érosion sur la fertilité du sol des certains sites maraîchers de la vallée de Kimwenza et Matadi Mayo dans la commune de Mont-Ngafula à Kinshasa.

Méthodes. Des enquêtes ont été réalisées dans ces périmètres maraîchers qui sont touchés par l'érosion des sols, afin de comprendre les facteurs responsables de la dégradation. Des échantillons de sol ont été prélevés et analysés au laboratoire de Géochimie de l'Université de Kinshasa dans le but d'évaluer la qualité physico-chimique du sol.

Résultats. Les résultats obtenus ont montré que les sols de ces sites sont acides avec un pH inférieur à 6 en moyenne, la teneur en argile ne dépasse pas 10 %, la teneur en sable dépasse 80 % (sol sablonneux) et la matière organique varie entre 0 à 1 %. Pour les autres éléments : l'azote, le calcium, le magnésium, le potassium et le phosphore assimilable, leurs teneurs sont très faibles. Tous ces paramètres montrent à suffisance que les sols de la zone d'étude sont moins fertiles et avec une érodibilité élevée.

Conclusion. Le sol sableux est filtrant, favorisant le lessivage de nutriments dans une région où il pleut abondamment. La sévérité des pluies dans la région de Kinshasa et les cultures en pente contribuent à l'érosion hydrique qui affecte défavorablement la fertilité du sol. Il est donc essentiel d'adopter des méthodes durables de gestion des terres maraîchères afin de combattre les effets de l'érosion hydrique et de conserver la fertilité du sol.

Mots clés : Erosion ravinante, ensablement, zones maraîchères, fertilité des sols, Kinshasa

ABSTRACT

Impact of gully erosion on soil fertility in market garden areas of the Kimwenza and Matadi Mayo districts in Commune of Mont-Ngafula in Kinshasa

Description of the subject. Water erosion is a major environmental threat to the sustainability and productive capacity of agricultural land worldwide, and particularly in the town of Kinshasa.

Objective. The objective of this study is to assess the effect of erosion on soil fertility in certain market gardening sites in the Kimwenza and Matadi Mayo valleys in the commune of Mont-Ngafula in Kinshasa.

Methods. Surveys were conducted in these market gardening areas, which are affected by soil erosion, in order to understand the factors responsible for degradation. Soil samples were collected and analyzed at the Geochemistry laboratory of the University of Kinshasa in order to assess the physicochemical quality of the soil.

Results. The results obtained showed that the soils of these sites are acidic, with an average pH below 6, clay content does not exceed 10%, sand content exceeds 80% (sandy soil), and organic matter varies between 0 and 1 %. The levels of other elements (nitrogen, calcium, magnesium, potassium, and available phosphorus) are very low. All these parameters clearly indicate that the soils in the study area are less fertile and highly erodible.

Conclusion. Sandy soil is permeable, promoting nutrient leaching in a region with abundant rainfall. The intensity of rainfall in the Kinshasa region and the hillside cultivation contribute to water erosion, which negatively impacts soil fertility. Therefore, it is essential to adopt sustainable land management practices.

Keywords: Gully erosion, silting, market gardening areas, soil fertility, Kinshasa

1. INTRODUCTION

Dans le monde, l'érosion hydrique est une menace environnementale majeure pour la durabilité et la capacité productive de terres agricoles. Elle constitue le processus de dégradation des terres le plus actif et dégrade également la ressource la plus importante pour la survie de l'humanité : l'eau. L'érosion par ruissellement provoque, en particulier, une perte des surfaces cultivables. Les fortes pluies sont également à l'origine d'événements chroniques, parfois catastrophiques (Bultot, 1971 ; Crabbe, 1975).

L'érosion des sols qui entraîne la dégradation des terres, est un processus par lequel la couche supérieure du sol, dont les plantes tirent la plupart de leurs nutriments et de leur eau, est détruite (Tarakanov, 2024). La perte de cette couche fertile, appelée couche arable, affecte la productivité de la terre et prive les agriculteurs d'une ressource importante pour la culture de plantes alimentaires (Tarakanov, 2024). Depuis des siècles, les sols évoluent suite au phénomène d'érosion qui détruit presque constamment la surface de la terre en transportant des particules d'humus. L'érosion du sol est une forme de dégradation qui entraîne la réduction des taux en matière organique et la détérioration de la structure et la nature du sol. Ce phénomène lessive les terres arables et nuit à la fertilité des sols agricoles (Hladký *et al.*, 2016). Car, l'érosion élimine la couche supérieure du sol, riche en matière organique et nutriments essentiels, ce qui diminue la capacité du sol à soutenir la croissance des cultures.

La dégradation des sols serait un phénomène mondial affectant plus de deux milliards d'hectares des terres cultivables (El Hadraoui, 2013). Selon Sanchez *et al.* (1997), elle est la principale cause de la baisse de la production alimentaire par habitant en Afrique. En République Démocratique du Congo (RDC), le phénomène d'érosion de sol est observé dans presque toutes les villes des plateaux et collines (Makanzu Imwangana *et al.*, 2020 ; Mutungu Kuleta *et al.*, 2024 ; Mubanga Nzo-Ayum *et al.*, 2024 ; Ilombe Mawe *et al.*, 2024 ; Ilombe Mawe, 2024). Un phénomène qui devient de plus en plus inquiétant suite aux dégâts causés sur l'environnement (Lelo Nzuzi, 2008 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2012a ; Kayembe wa Kayembe, 2013 ; Ilombe Mawe *et al.*, 2022 ; Vanmaercke *et al.*, 2023). La région de Kinshasa ne reste pas à l'abri de l'érosion hydrique qui affecte même les zones maraîchères. Le maraîchage constitue une

source de revenus pour de nombreuses familles dans la ville de Kinshasa en chômage. Au fait, le maraîchage dans la ville de Kinshasa se réalise souvent dans les lits majeurs des cours d'eau qui reçoivent tous les sédiments arrachés par l'érosion en amont et transportés par le ruissellement. Alors, il arrive souvent que ces sédiments ensevelissent à leur tour les plates-bandes et dérangent la composition de sol cultivés. Cette situation oblige aux maraîchers de recourir aux engrais pour amender le sol, alors que ceux-ci impactent directement tout comme indirectement sur l'environnement immédiat. Les sites maraîchers de Kimwenza et Matadi Mayo qui font l'objet de cette étude ne sont pas épargnés de cette réalité.

Face à cette situation, quelques questions méritent d'être posées : (i) l'érosion des sols rencontrée dans les périmètres maraîchers, est-elle responsable de la dégradation de la fertilité de sol de ces sites ? (ii) Quelles seraient les mesures adaptées pour améliorer la fertilité des sols affectés par l'érosion ? (iii) Quel est l'impact des pratiques d'amélioration du sol sur l'environnement immédiat ? En effet, les pertes en terres suite à l'érosion pluviale réduisent la fertilité des sols constituant ainsi une menace majeure pour la durabilité de l'agriculture et par conséquent, pour la lutte contre l'insécurité alimentaire. L'usage des amendements organiques serait un atout écologique comparativement aux engrais chimiques (Urée, NPK) utilisés comme fertilisants. L'usage intensif des engrais chimiques cause de contamination des cours d'eau et pollue l'environnement avec des effets aigus sur la santé humaine.

L'objectif poursuivi par cette étude est d'évaluer l'impact de l'érosion du sol sur la fertilité des zones maraîchères dans les quartiers Kimwenza et Matadi Mayo dans la commune de Mont-Ngafula à Kinshasa. Spécifiquement, l'étude vise : (i) cartographier des ravins en amont des périmètres maraîchers, (ii) analyser les pluies extrêmes de la zone d'étude, (iii) analyser quelques paramètres du sol de ces périmètres, (iv) caractériser la fertilité du sol sur le plan physico-chimique, et (v) évaluer les impacts sur l'environnement.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Brève description de la zone d'étude

L'étude s'est déroulée dans la ville province de Kinshasa en République Démocratique du Congo.

La ville de Kinshasa répond à trois vocations : ville province, capitale administrative, politique et économique du pays, et une ville cosmopolite. La subdivision administrative de la ville de Kinshasa répond aux prescrits du décret-loi numéro 081 du

22 juillet 1998. Elle est subdivisée en 24 communes et environs 400 quartiers. Le site d'étude correspond à trois quartiers : Matadi Mayo, Kimbuta et Kimwenza Gare, tous situés dans la commune de Mont-Ngafula (Figure 1).

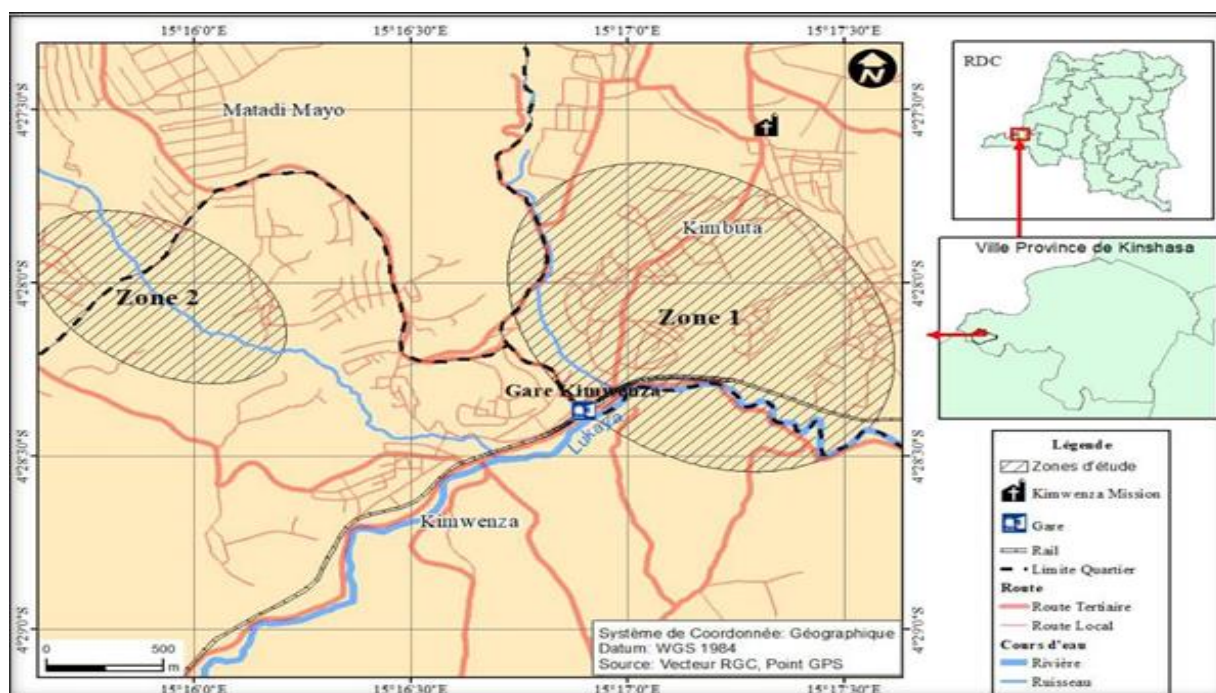


Figure 1. Localisation de la zone et milieu d'étude

Selon les critères de Koppen revus par Guetter et Kutzbach (1990) et Peel *et al.* (2007), la région de Kinshasa est dans la zone intertropicale et connaît un climat de type Aw et la saison sèche y dure quatre mois, soit de juin à septembre (Aw_4). Il s'agit de la saison sèche établie en fonction de la pluviométrie et qui débute en moyenne le 28 mai et se termine en moyenne le 21 septembre, soit 117 jours ou près de 4 mois (Crabbe, 1975). Dans le système de KÖPPEN, un climat de classe A, définit les climats tropicaux humides où la température moyenne du mois le plus froid est supérieur à 18°C et où, la hauteur annuelle des pluies, exprimées en cm est supérieure à deux fois cette température moyenne augmentée de 14 (Makanzu Imwangana, 2010). D'autre part, la classe A comprend la subdivision du type Aw qui nous intéresse et à laquelle appartiennent les zones dont la cote hydrométrique mensuelle du mois le plus sec est en dessous de 60 mm. L'indice w signifie que la saison sèche se produit pendant l'hiver. La saison des pluies débute vers fin septembre et se termine vers fin mai, elle est entrecoupée par une petite saison sèche fluctuant entre fin décembre et fin février. D'après Bultot (1971), le régime pluvial de la région de Kinshasa jouit d'une double périodicité : le mois de novembre, le plus pluvieux, et enregistre plus de 200 mm, ainsi que le mois d'avril.

Dans sa partie sud, Kinshasa est dominée par une ceinture de collines allant de Kinshasa Ouest à la

rivière N'sele à l'Est en bas desquelles se trouve une plaine, comme le décrit Egoroff (1955) cité par Makanzu Imwangana (2010), légèrement ondulée et sillonnée par des rivières, se raccordant aux collines par des cônes de déjection ou par des coulées de sables plus ou moins décolorés. Cette plaine est subdivisée en deux unités séparées : La plaine de Kinshasa ou de Lemba, s'étendant depuis la baie de Ngaliema à l'ouest jusqu'à la rivière N'djili à l'est et la plaine d'entre N'djili-N'sele. Lelo Nzuzi (2008) décrit l'espace urbain de Kinshasa comme étant un site topographique contrasté, c'est-à-dire à la fois confortable (la plaine représentant la ville basse) et contraignant (les collines où s'est érigée la ville haute). C'est dans les vallées comprises dans cette dernière partie, qui constitue la zone de cette étude où se pratique souvent le maraîchage. L'hydrographie de la région de Kinshasa est dominée par un réseau des rivières coulant généralement vers le nord et se jetant dans le Pool Malebo (le fleuve Congo). Ce réseau, de type dendritique, est bien développé avec les principaux axes de drainage orientés S.O.-N.E. Au sud, dans les zones des collines, il s'est formé un réseau hydrographique des vallées profondément encaissées dans une surface ancienne des collines dont l'altitude s'abaisse à 350 m environ près du fond des collines. C'est évidemment dans deux de ces vallées que l'étude a été menée. L'hydrographie de la ville de Kinshasa est drainée par deux types de

rivières : (i) il y a trois rivières allochtones dont la N'djili et la N'sele qui suivent un parcours Sud - Nord et le pool Malebo ayant son exutoire sur les rapides qui délimitent la ville dans la partie sud-ouest ; (ii) les rivières locales ou autochtones dont la Funa (appelée abusivement Kalamu, ce qui signifie cours d'eau en dialecte Teke-Humbu, population autochtone de Kinshasa).

2.2. Matériel

Les matériels utilisés pour l'échantillonnage jusqu'à l'obtention des données sont le petit râteau pour dégager la litière, la pioche pour décaper le sol, la bêche pour décaper et enlever le sol, le cylindre métallique pour prélever l'échantillon avec le volume connu, la tarière pour prélever l'échantillon, les sachets pour emballer les échantillons, la mallette (boite) pour le transport des matériels et échantillons, le double mètre pliant (la règle) pour mesurer l'horizon de l'échantillon de sols, le marqueur pour étiquetage, le conductimètre pour mesurer la conductivité électrique, le pH-mètre, le GPS Garmin 62s pour prélever les coordonnées géographiques, la balance pour mesurer le poids de l'échantillon, l'étuve pour sécher les échantillons. Les images satellitaires utilisées pour extraire les données avec ArcMap 10.8 sont l'image SRTM 40-13 tif de 30 mètres de résolution spatiale, contenant le Modèle numérique de terrain (MNT) de la zone sud-ouest (Kimwenza) et l'image Landsat 8 de 2020 de la ville-province de Kinshasa.

2.3. Méthodes

Cartographie des ravins dans les sites

La photo-interprétation (Télédétection) et les systèmes d'information géographique ont permis dans le cadre cette étude de cartographier les périmètres maraîchers ainsi que géo-localiser les différents ravins qui affectent la zone de culture. Cette étape a consisté notamment à la numérisation des contours des ravins sur les images Google Earth, fournies en libre accès dont l'exploitation a permis de détecter les zones affectées par le phénomène de ravinement et enfin de cartographier les ravins.

Analyses statistiques des données

Pour une meilleure gestion des risques hydro-géomorphologique et climatique (l'érosion des sols et les inondations) dans des zones maraîchères, l'analyse fréquentielle des pluies extrêmes occupe une place de choix. Elle permet d'orienter des activités agricoles et protéger le site maraîcher contre le phénomène d'ensablement et d'inondation ; surtout dans le contexte de changement climatique actuel. A l'ère où le problème du dérèglement climatique fait couler beaucoup d'encre à travers le monde, il s'est important de vérifier si ses averses

seraient liées au changement climatique. L'idée est d'estimer les quantiles des précipitations extrêmes, leur période de retour ainsi que leurs impacts sur les espaces maraîchers.

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus afin d'en définir les probabilités d'apparition future (Meylan et Musy, 1999). Les données pluviométriques exploitées dans cette analyse ont été fournies par l'Agence Nationale de Météorologie et de Télédétection par Satellite (METTELSAT en sigle). Elles concernent des pluies journalières maximales annuelles de 1982 à 2022. Considérant que les précipitations dans la zone intertropicale suivent une distribution normale (Donald *et al.*, 1992), les chroniques pluviométriques utilisées ont été préalablement soumises aux tests de Student et de Fischer pour vérifier leur homogénéité comme le propose Claudie Beaulieu (2009). L'application de ces deux tests a consisté à découper la série des données en deux sous-séries afin de vérifier si ces sous-séries ont la même moyenne et la même variance. Il a donc été formulé des hypothèses pour chaque test à savoir, l'hypothèse nulle (H_0) à vérifier et l'hypothèse alternative (H_1) à admettre au cas où l'hypothèse nulle est rejetée. Le test de t de Student a consisté à vérifier si les sous-séries ont la même moyenne. Les hypothèses formulées pour ce test sont donc : H_0 : les moyennes de deux sous-échantillons sont égales ; H_1 : les moyennes de deux sous-échantillons ne sont pas égales. Le test F de Fisher a permis de tester dans les deux sous-séries, l'égalité des variances. Les hypothèses pour ce test sont les suivantes : H_0 : les variances des deux sous-échantillons sont égales ; H_1 : les variances des deux sous-échantillons ne sont pas égales.

Meylan et Musy (1999) estiment que la validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Selon Kisangala (2014), diverses pistes peuvent contribuer à faciliter ce choix, mais il n'existe malheureusement pas de méthodes universelles et infaillibles. Dans le cadre de cette étude, la loi de Gumbel (1958) a été utilisée. Le choix porté sur cette loi se justifie par le fait qu'elle a montré une meilleure distribution et un bon ajustement dans plusieurs études similaires réalisées en RD-Congo (Kisangala et Yina, 2011 ; Muhindo Sahani, 2011 ; Makanzu Imwangana, 2014 ; Kisangala Muke, 2014). La loi de Gumbel est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs. Nombreux auteurs affirment que la distribution de Gumbel ajuste mieux les séries de pluies (Goula *et al.*, 2007 ; Soro *et al.*, 2011). C'est ce qui justifie son application pour la description du comportement statistique ou l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes (Benhattab, 2017). Sa fonction de

répartition est donnée par :

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left[-\frac{x-a}{b} \right] \right] \text{ où } a \text{ et } b$$

sont des paramètres du modèle de Gumbel. L'ajustement des paramètres a et b est réalisé en utilisant la méthode graphique. La probabilité d'occurrence T d'une pluie extrême a été définie en

$$\text{utilisant la formule ci-après : } T = \frac{1}{1-F(x_i)}$$

Il sied de noter que les précipitations utilisées ont d'abord été triées par ordre croissant. Par la suite, on a attribué à chaque valeur un rang, en utilisant la fréquence empirique de Hazen. L'ajustement par la loi de Gumbel s'est fait par la méthode graphique. L'ajustement par la méthode graphique a consisté à porter dans un système d'axes cartésien, les valeurs x_i de l'échantillon et les variables réduites de

Gumbel, puis de faire passer une droite qui passe le mieux par ces points afin d'en déduire les deux paramètres a et b de la loi. Cela a été automatiquement fait sur le logiciel Microsoft Excel. Les quantiles ont été estimés grâce à la formule : $X_q = a + b \cdot \mu_q$

Vérification des tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle

Les résultats d'application des tests d'hypothèses sont présentés au Tableau 1. Etant donné que les valeurs des p -value sont supérieures au seuil de signification α , il y a lieu d'affirmer avec la lecture de ces résultats que les données utilisées sont homogènes et indépendantes à un seuil de signification de 5 %. Ceci vérifie les conditions d'application de l'analyse fréquentielle.

Tableau 1. Résultats de test d'hypothèse préalables à l'analyse fréquentielle

Test d'hypothèse	Seuil de signification α	P-value
Test t de Student	0,05	0,462043276
Test F de Fisher	0,05	0,051134996

Collecte des données sur le terrain

Une descente d'une semaine dans la zone d'étude a été effectuée pour prélever les échantillons de sols afin de connaître : le pH, la granulométrie, la structure, la perméabilité ainsi que les caractéristiques de fertilité des sols dans les sites maraîchers de Kimwenza et Matadi Mayo. Les échantillons ont été prélevés à partir d'une profondeur allant de 25 cm jusqu'à 1 m par la tarière (Figure 2), puis stockés dans des sachets étiquetés avant de les transmettre au Laboratoire de Géochimie de l'Université de Kinshasa.



Figure 2. Quelques images illustrant les moments d'échantillonnage sur le terrain

Par ailleurs, lors de ces descentes sur le terrain, les enquêtes par questionnaire ont été réalisées dans la commune de Mont-Ngafula précisément dans les quartiers Kimwenza et Matadi Mayo auprès des maraîchères pour évaluer leur connaissance sur les différents impacts de la dégradation des sols maraîchers et leur savoir endogène pour remédier à cette problématique.

Analyses des échantillons au laboratoire des sols

Cette étape a permis de comprendre la structure et la fertilité de sol grâce à quatre (4) paramètres : l'acidité, la texture, la matière organique et l'état minéral de la terre. Une fois les échantillons prélevés sur le terrain, au bon

endroit et au bon moment, il s'agit de les faire analyser dans un laboratoire (Figure 3). Les résultats de cette analyse ont permis de piloter la fertilisation des sites maraîchers et de vérifier la dégradation de sol due à l'érosion hydrique.



Figure 3. Des échantillons en train d'être pesés au laboratoire

La granulométrie du sol ou texture correspond à la répartition de minéraux par catégorie de grosseur, le diamètre des particules étant supposées sphériques indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux, lorsqu'il s'agit des sols formés sur une roche cristalline. Pour connaître la texture des sols de Kimwenza et Matadi Mayo, la méthode de tamisage a été employée. Elle consiste à sécher une portion de sol à l'air libre et en séparer les particules par vibration sur une série de tamis superposés. Par la suite, le contenu de chaque tamis est pesé et la fraction d'échantillon recueillie par tamis est rapportée sur la quantité de l'échantillon totale (Duchaufour, 1997). A la suite d'une convention internationale de pédologues, les particules sont classées en fonction de leur diamètre par tamis de différentes dimensions.

Le potentiel hydrogène ou pH d'une solution est la quantité d'ions H^+ libres qu'elle contient. Pour connaître le pH de sols de cette d'étude, le pH-mètre a été utilisé. Le pH des échantillons varie dans l'ensemble entre 5,76 et 7,7. Ainsi, on distingue des sols franchement acides ($5,0 < pH < 6,0$), légèrement acides ($6,0 < pH < 6,6$), légèrement neutres ($6,6 < pH < 7,4$) et des sols basiques ($7,4 < pH < 7,8$). La classification du sol selon le pH (Bocoum, 2004).

Le pourcentage de la matière organique totale des sols a été obtenu après calcination des échantillons de sols dans un four porté à $450^\circ C$ pendant 5 heures. La perte de masse observée est attribuée à la matière organique, et le pesage se faisait à chaque étape. Le poids de la matière organique a été obtenu par différence entre le poids total ou initial de l'échantillon et le poids de cendres.

Le dosage du carbone organique et du carbone total s'est fait par combustion sèche, après étalonnage de l'appareil conformément aux recommandations du

fabricant. On a pesé m_1 g de l'échantillon à l'air et placé dans le creuset, tout en sachant que la masse dépend de la teneur en carbone total prévue et de l'appareil utilisé : $COT = CT - CIT$ où COT signifie carbone organique total ; CT : carbone total et CIT : carbone inorganique total.

$W_{c,t} = (1000 * (m_2/m_1) * 0,2727 * (100 + W_{H_2O}/100))$ avec $W_{c,t}$ est la teneur (g/kg) en carbone total rapportée à l'échantillon séché en étuve ; m_1 est la masse (g) de la prise d'essai ; m_2 est la masse (g) du gaz carbonique produit par l'échantillon ; 0,2727 est le facteur de conversion du CO_2 en C ; W_{H_2O} est la teneur en eau, exprimée en pourcentage en masse de masse sèche.

$$W_{c,o} = W_{c,t} - 0,12 * W_{caco_3}$$

avec $W_{c,o}$ est la teneur (g/kg) en carbone organique rapportée à l'échantillon séché en étuve ; $W_{c,t}$ est la teneur (g/kg) en carbone total rapportée à l'échantillon séché en étuve ; 0,12 est le facteur de conversion ; W_{caco_3} est la teneur (g/kg) en carbonate de l'échantillon, exprimée en quantité équivalente de carbonate de calcium, sur la base d'un échantillon séché à l'étuve.

Le dosage de l'azote s'est fait par distillation et titrage. On a titré avec une solution de H_2SO_4 ($c(H^+) = 0,01 \text{ mol.L}^{-1}$) jusqu'au point final de l'indicateur. Lorsqu'on utilise le titrage potentiométrique, le point final du titrage se situe à environ $pH = 5$. Dans ce cas, le point final du tirage correspond au pH du virage de l'indicateur. Cette procédure de distillation est répétée au moins à trois reprises avant de distiller les blancs de réactifs, les MRI et les échantillons.

$N(g/Kg) = ((V_1 - V_0) \times (H^+) \times MN) / m$ où V_1 est le volume de la solution H_2SO_4 utilisée pour le titrage de l'échantillon ; V_0 est la valeur moyenne de l'essai à blanc ; MN = la masse molaire de N (elle est de 14,0067) ; m est la masse de la prise d'essai ;

N est la concentration d'azote dans le sol, en milligrammes de N par gramme de sol (ou en grammes de N par kilogrammes de sol) ; N (%), on divise par 10 (Cfr. : GLOSOLAN Training session 2022).

Le dosage du phosphore s'est fait par spectrophotométrie, avec des tests en cuvette. Tandis que le dosage de minéraux et métaux lourds s'est fait par fluorescence X. L'analyse par fluorescence x (XRF) est une technique non destructive utilisée pour déterminer la composition

élémentaire d'un échantillon, y compris les éléments minéraux et les métaux lourds. Cette méthode identifie et quantifie les éléments en excitant les atomes de l'échantillon avec un faisceau de rayons x provoquant l'émission de rayons x secondaires caractéristiques de chaque élément. Elle est largement employée dans les laboratoires pour caractériser et préciser des matériaux variés et les données élémentaires quantitatives et qualitatives minéralogiques des sols et eaux.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Inventaire cartographique des ravins et impact de la topographie dans la zone d'étude

Six ravins (Figures 4A & B) ont été cartographiés en amont des périmètres maraîchers de la zone d'étude, faisant une longueur totale d'environ 1.453,3 mètres, de largeur moyenne d'environ 47,0 mètres, avec une profondeur moyenne d'environ 23,5 mètres et 1.086.098,1 mètres cubes de sols arrachés.

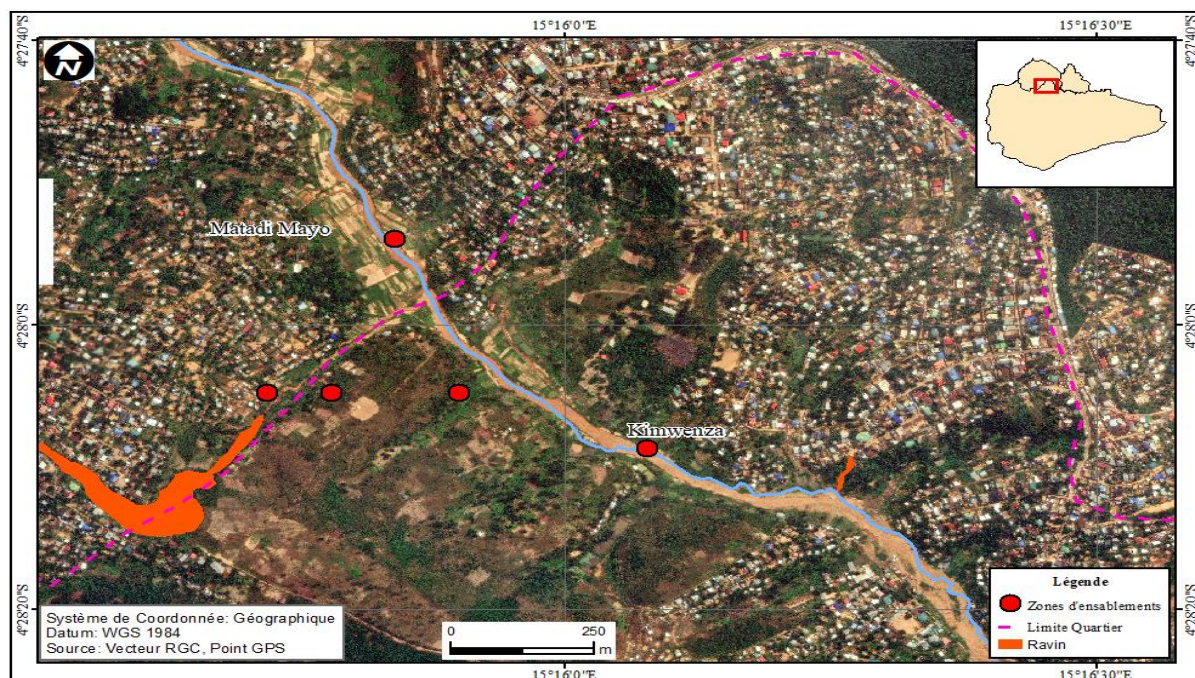


Figure 4a. Localisation de différents ravins et zones ensablées à Matadi Mayo et Kimwenza

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) qui lui sont généralement associés, constituent des outils modernes permettant l'étude complexe des phénomènes environnementaux à l'échelle spatiale et temporelle. Ce sont des techniques très efficaces utilisées de plus en plus pour aider à la gestion des différents problèmes liés à l'environnement comme celui sous étude. La maîtrise de la complexité croissante des problèmes sur le Territoire nécessite de disposer d'un ensemble de méthodes et d'outils scientifiques puissants et adéquats. Ces moyens doivent non seulement traiter rapidement les données spatiales, mais aussi les analyser afin d'obtenir une information pertinente, permettant d'éclairer les décideurs de leurs prises de décisions et d'accroître le temps d'anticipation de ces phénomènes.

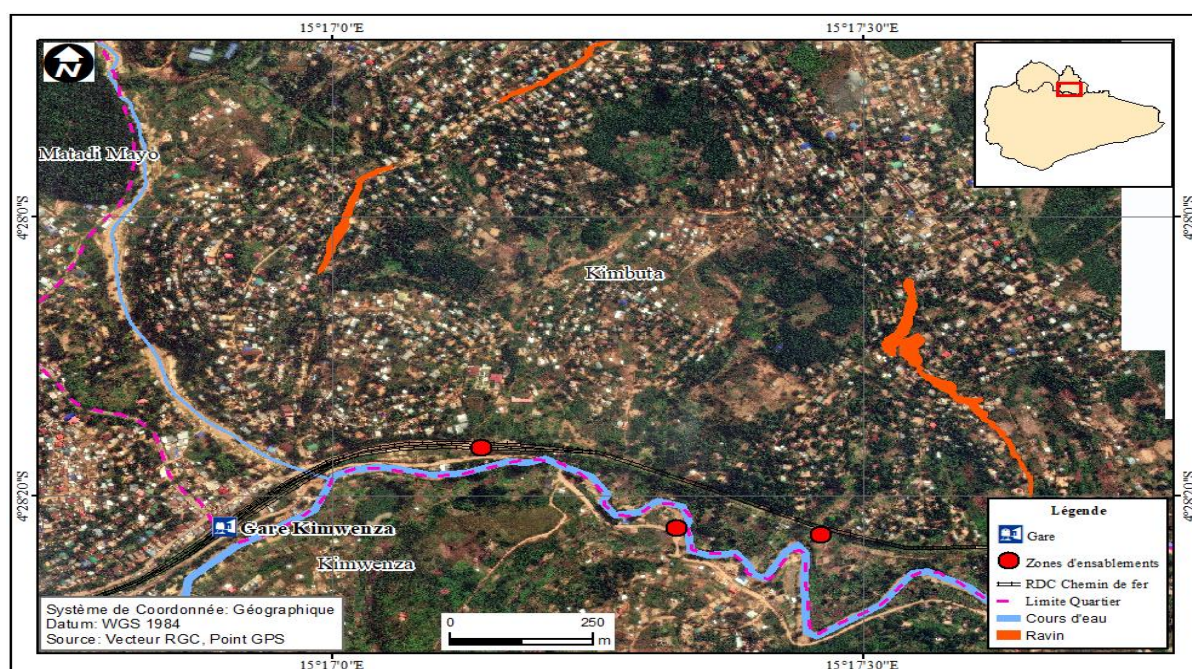


Figure 4b. Localisation de différents ravins et zones ensablées dans le quartier Kimwenza Gare

Les caractéristiques topographiques constituent un indicateur important de la vulnérabilité du milieu face aux risques d'érosion hydrique. La présence des pentes notamment la longueur, la forme et surtout la valeur de l'inclinaison des versants sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols (Roose, 1994). Notre zone d'étude est constituée donc d'un ensemble disséqué par un réseau assez dense de vallées encaissées, à certains endroits, des collines massives aux flancs très inclinés et allongés. En effet, les vallées ont plusieurs dizaines de mètres de profondeur avec des versants très inclinés pouvant atteindre voire dépasser 25 % de pente (Figure 5).

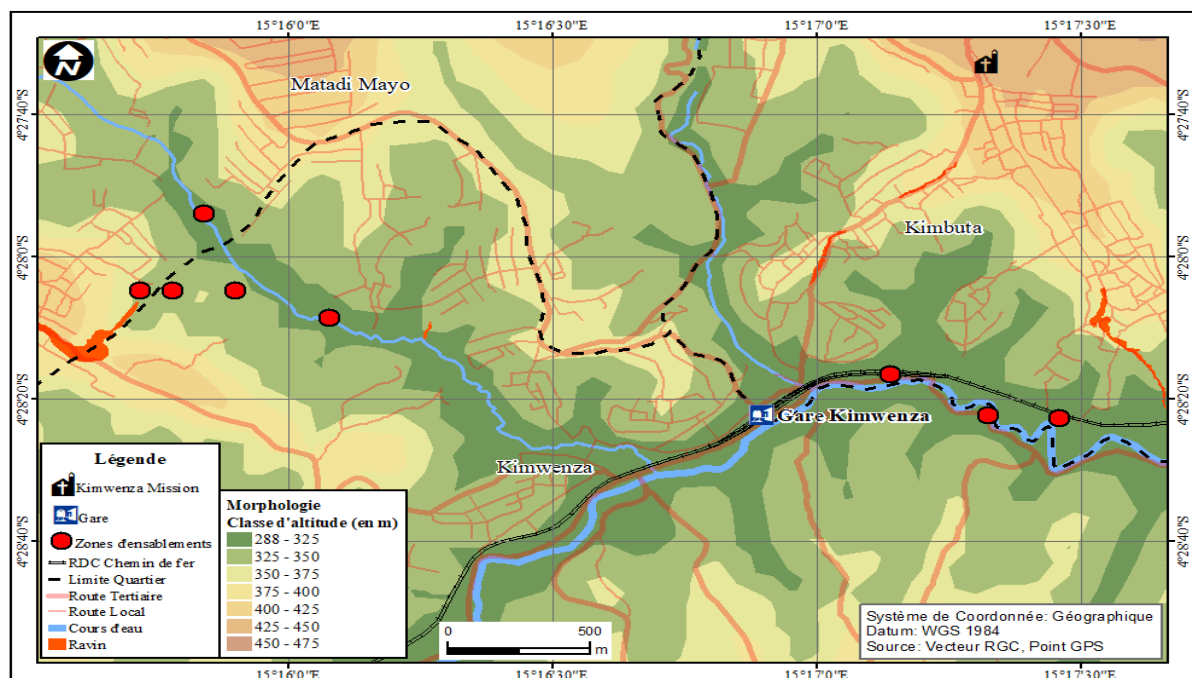


Figure 5. Situation morphologique de la zone d'étude et environs

La pluie est sans aucun doute un des principaux facteurs de l'érosion dans le monde en général et en particulier à Kinshasa, qui est alors fonction de la durée et de l'intensité. Même de très faibles pentes permettent à l'eau de se mettre en mouvement. Plus la pente est forte, plus les risques d'érosion sont importants. La connaissance des différentes pentes qui entourent la zone, permet d'évaluer le risque d'érosion dans son milieu car plus elles sont grandes plus le risque d'érosion est visible. Van Caillie (1983), dans ses recherches sur l'érosion des sols à

Kinshasa, affirme que la grande majorité des ravins se situe sur des pentes estimées à 10, 15, voire 20 %. D'après l'Association Régionale d'Etude pour l'Amélioration des Sols en Seine Normandie, les risques d'érosion des sols en fonction de la pente sont évalués de la façon suivante : (i) entre 0 et 1 %, il y a ruissellement des eaux mais sans érosion ; (ii) entre 1 et 3 %, il y a érosion diffuse et formation de rigoles, (iii) entre 3 et 5 %, il y a érosion forte avec ravinement, et (iv) plus de 5 %, il y a érosion très forte avec ravinement profond. Ces chiffres sont bien relativisés en fonction du type de sol.

Makanzu Imwangana *et al.* (2022) disent que sur le plan topographique, Van Caillie (1983) regroupe les pentes en cinq zones : (i) 0 à 4 %, sites aisément urbanisables ou zone de bonne constructibilité ; (ii) 4 à 8 %, sites urbanisables à faible coût mais fragiles dans les zones d'auto-construction ; (iii) 8 à 12 %, sites urbanisables à coût élevé, nécessitant d'énormes travaux de soutènement et d'évacuation des eaux pluviales ; (iv) 12 à 20 %, sites urbanisables à coût très élevé puisque difficilement constructibles et (v) au-delà de 20 %, sites *non aedificandi* (inconstructibles). A Kinshasa, l'administration coloniale avait classé les zones collinaires comme *non aedificandi* et où la végétation était protégée et le développement urbain interdit (Stevens, 2006). Cependant, sur le plan urbanistique, toutes les zones délimitées par des pentes allant de 0 à 15 % sont propres à la construction et appelées zones constructibles tandis que les zones de pente supérieure à 15 % sont des zones susceptibles d'être érodées en cas d'absence d'équipement de drainage. Ainsi, on note que techniquement, toute zone est constructible dans le tissu urbain, à condition qu'il y ait le déploiement de techniques appropriées et de moyens conséquents pour la sauvegarde de l'environnement et pour la préservation des populations riveraines contre des catastrophes. D'ailleurs, Makanzu Imwangana (2010) fait une cartographie des ravins sur des pentes d'au moins 5 % dans la haute ville de Kinshasa contrairement à Van Caillie (1987) qui les prévoit à partir de 12,5 %. Ce qui signifierait un changement dans les conditions de genèse de l'érosion hydrique dans ce milieu. Plutard, Makanzu Imwangana (2014) et Moeyersons *et al.* (2015) vont montrer que c'est l'imperméabilisation des sols qui augmentent le ruissellement, responsable de l'érosion ravinante sur les versants sableux de Kinshasa.

3.2. Impacts de l'agressivité climatique

Ajustement des pluies journalières extrêmes avec la loi de Gumbel (Méthode quantitative)

L'ajustement des maxima pluviométriques journaliers annuels, suivant la méthode graphique de la loi de Gumbel, est illustré par la Figure 6 après que le tri des données ait été fait au Tableau 2. De l'analyse de ce graphique, il ressort que l'ajustement des pluies maximales selon la loi de Gumbel est dans son ensemble satisfaisant ; puisque la droite d'équation passe le maximum des points expérimentaux, avec un coefficient de corrélation de 0,96.

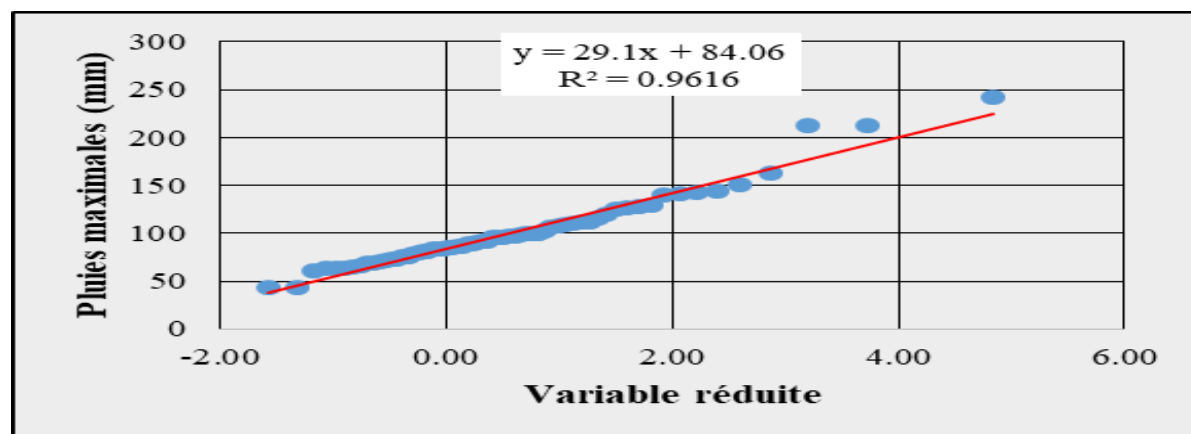


Figure 6. Ajustement graphique des pluies journalières annuelles avec la loi de Gumbel à Kinshasa Binza

Tableau 2. Tri des pluies maximales selon l'ordre croissant, calcul de fréquence empirique et variable réduite

Années	Pluies maximales	Rang	Fréquence empirique d'Hazen	Variable réduite
1984	43,5	1	0,007936508	-1,576146224
2012	44,0	2	0,023809524	-1,318462321
2009	60,6	3	0,03968254	-1,171504568
1983	63,1	4	0,055555556	-1,06138513
2021	63,55	5	0,071428571	-0,970421781
1995	64,2	6	0,087301587	-0,891336605

1991	64,9	7	0,103174603	-0,820366685
1996	66,2	8	0,119047619	-0,75529145
1960	69,5	9	0,134920635	-0,694680286
1968	69,5	10	0,150793651	-0,637551448
2019	69,7	11	0,166666667	-0,583198081
1972	71,0	12	0,182539683	-0,531091491
2004	72,6	13	0,198412698	-0,480823682
1999	72,9	14	0,214285714	-0,432071362
1979	75,6	15	0,23015873	-0,384572419
2005	75,6	16	0,246031746	-0,338109968
1964	78,1	17	0,261904762	-0,292501201
1992	79,4	18	0,277777778	-0,247589379
1971	80,9	19	0,293650794	-0,203237938
1966	81,2	20	0,309523810	-0,159326059
1977	83,3	21	0,325396825	-0,115745263
2003	83,4	22	0,341269841	-0,072396744
1982	84,2	23	0,357142857	-0,029189236
1988	85,2	24	0,373015873	0,013962721
1978	85,6	25	0,388888889	0,057140240
2017	86,8	26	0,404761905	0,100421318
1969	87,0	27	0,420634921	0,143881925
1974	88,8	28	0,436507937	0,187596981
1970	89,4	29	0,452380952	0,231641256
1975	90,0	30	0,468253968	0,276090234
2008	91,2	31	0,484126984	0,321020965
1963	92,0	32	0,500000000	0,366512921
2000	95,4	33	0,515873016	0,412648894
1987	96,0	34	0,531746032	0,459515958
1997	96,2	35	0,547619048	0,507206510
1976	97,0	36	0,563492063	0,555819451
1993	97,0	37	0,579365079	0,605461510
2014	99,0	38	0,595238095	0,656248790
2007	99,2	39	0,611111111	0,708308566
2006	99,4	40	0,626984127	0,761781428
2002	99,6	41	0,642857143	0,816823857
1980	102,4	42	0,658730159	0,873611345
1985	106,0	43	0,674603175	0,932342245
1986	107,8	44	0,69047619	0,993242545
1994	108,8	45	0,706349206	1,056571890
2015	111,0	46	0,722222222	1,122631247
1967	112,0	47	0,738095238	1,191772815
2018	112,0	48	0,753968254	1,264413014
2020	116,1	49	0,769841270	1,341049795
1998	119,9	50	0,785714286	1,422286137
1962	125,5	51	0,801587302	1,508862572
1989	126,4	52	0,817460317	1,601703308
1973	128,2	53	0,833333333	1,701983355
2011	129,2	54	0,849206349	1,811229348
1981	140,7	55	0,865079365	1,931476642
2010	141,6	56	0,880952381	2,06552518
1990	142,3	57	0,896825397	2,217379537
2016	143,6	58	0,912698413	2,39305942
1965	150,2	59	0,928571429	2,602232166
1961	163,3	60	0,944444444	2,861928676
2001	212,0	61	0,96031746	3,206666628
2013	212,°	62	0,976190476	3,725645038
2022	242,6	63	0,992063492	4,832300468

Source : Données récoltées à la station météorologique de Kinshasa/Binza (2023)

Estimation des quantiles pour différentes périodes

Les paramètres a et b peuvent être facilement déduits : $a = 84,06$ et $b = 29,10$. A partir de ces deux coefficients, les quantiles des précipitations extrêmes ont été calculés pour différentes périodes de retour (Tableau 3). La classification de différentes périodes de retour a été faite suivant le modèle de l'Institut Royal de la Météorologie de Belgique (Sene & Ozer, 2002). D'après cette classification, les pluies sont qualifiées d'anormales, très anormales, exceptionnelles et très exceptionnelles si elles ont respectivement une période de retour de 6, 10, 30 et 100 ans.

Tableau 3. Estimation de périodes de retour des pluies extrêmes journalières par la méthode graphique de Gumbel

Périodes de retour (ans)	100	30	10	6
Probabilité de non dépassement	0,99	0,97	0,90	0,83
Variable réduite de Gumbel	4,60	3,38	2,25	1,70
Pluies maximales (mm)	218,60	183,00	149,70	133,70

Les résultats exposés au Tableau 3 peuvent être interprétés comme suit : (i) la récurrence centennale a été dépassée une fois avec une lame d'eau de 246 mm en 2022 ; (ii) la récurrence tridécennale a été dépassée à deux reprises avec une lame d'eau de 212 mm en 2001 et 2013 ; (iii) la récurrence décennale a été au moins dépassée à 5 reprises avec 150 mm en 1965, 163,3 mm en 1961, 212 mm en 2001 et 2013, et 242,6 en 2022. Il en ressort de cette analyse qu'environ 86 % des précipitations tombées dans cette zone entre 1961 et 2022 représentent les seuils caractérisant les événements normaux, avec une période de retour inférieure à 6 ans (Tableau 4). Ces résultats viennent confirmer ce que Makanzu Imwangana *et al.* (2023) disent dans ce sens que les pluies qui causent des dégâts dans la ville de Kinshasa ne sont pas anormales ni encore exceptionnelles. Mais elles tombent sur un environnement dégradé, ce qui laisse le sol sans défense face au ruissellement.

Tableau 4. Caractérisation des événements pluvieux journaliers à Kinshasa entre 1982 et 2022 par la méthode de Gumbel

Type d'événement	Période de retour	Fréquence d'apparition	Pourcentage (%)
Normal	< 6 ans	43	76,8
Anormal	6 ans	6	10,7
Très anormal	10 ans	4	7,1
Exceptionnel	30 ans	1	1,8
Très exceptionnel	100 ans	2	3,6

Au regard du Tableau 4, on remarque que les précipitations dites « normales » occupent la part du lion dans la distribution des pluies dans la zone d'étude. Ce sont des précipitations qui s'observent fréquemment dans la ville de Kinshasa et ses environs. Par contre, les précipitations d'ampleur exceptionnelle et très exceptionnelle arrachent à peine les 5 % dans la distribution pluviométrique. Cela veut simplement dire que ces pluies sont relativement rares à Kinshasa. Dans ce cas précis notamment, il s'avère que l'importance des risques d'érosion n'est pas forcément proportionnelle au volume pluviométrique. Ce qui corrobore avec Makanzu Imwangana *et al.* (2023) qui concluent que même les pluies faibles peuvent créer des catastrophes à Kinshasa. Cela est d'autant plus vrai que la pluie du 20 mai 1990 qui a causé des dégâts importants à l'origine d'un nouveau lotissement (Mpasa I et II) pour reloger les sinistrés de la vallée de la rivière Makelele, n'avait atteint qu'une lame 96,7 mm d'eau (Makanzu Imwangana, 2014). Les mêmes observations ont été faites au Sénégal (Sene et Ozer, 2002), à Ouagadougou (Hangnon *et al.*, 2015), et au Tchad (Zeineddine Nouaceur, 2020). Les auteurs affirment que les pluies qui créent de dégâts sont relativement normales, au regard de leur période de retour.

Au regard des résultats obtenus dans cette analyse, il s'observe que la pluviométrie peut avoir de conséquences extrêmes sur le périmètre maraîcher et ainsi perturber les rendements potentiels des cultures. Il faut donc envisager que les vraies causes des risques catastrophes d'origine naturelle (inondation et érosion) à Kinshasa sont à rechercher ailleurs ; par exemple, dans le plan d'aménagement du territoire et la dégradation de l'environnement physique. L'agriculture pluviale doit donc s'adapter, afin de faire face à ces défis liés à la pluviométrie. C'est dans le cadre de cette adaptation que les producteurs locaux doivent développer, des mesures d'adaptation axées sur des variétés adaptées, les techniques de conservation des sols et eaux, l'agroforesterie pour la stabilité des périmètres maraîchers contre l'érosion de sols.

3.3. Paramètres des sols de Kimwenza et Matadi Mayo

Caractérisation de la fertilité physique et chimique du sol

Le sol de Kimwenza est de type sableux tandis que celui de Matadi Mayo est de type sablo-argileux (Tableau 5). La porosité de sol est supérieure à 40 % et la rétention d'eau est inférieure 44 %.

Tableau 5. Classification de la texture des sols

Particules	Diamètres	Kimwenza	Matadi Mayo
Cailloux et gravier	>2mm		
Sable	2 mm à 50 μ m	90 %	88 %
Limon	50 à 2 μ m	6 %	2 %
Argile	< à 2 μ m	4 %	10 %

Les Tableaux 6 à 8 présentent les résultats du pH des échantillons de sols collectés sur le terrain. Pour la plupart, ce sont des sols acides, ce qui prouve davantage que ce sont des sols sableux, sols à fertilité moindre s'ils ne sont pas amendés. C'est dans les 25 premiers centimètres du sol qu'on retrouve un peu de sols neutres ou peu acides. Evidemment, c'est la partie qui intéresse le maraîcher.

Tableau 6. Résultats du pH de sols du quartier Kimbuta à Kimwenza

Echantillon	Profondeur	pH	Acidité de sols
MSC 01	25 cm	6,2	Sol peu acide
MSC 02	50 cm	5,8	Sol acide
MSC 03	1 m	5,1	Sol acide

Tableau 7. Résultats du PH de sols du quartier Kimwenza Gare

Echantillon	Profondeur	pH	Acidité de sols
MSC 01	25 cm	7,1	Sol neutre
MSC 02	50 Cm	5,3	Sol acide
MSC 03	1m	4,5	Sol acide

Tableau 8. Résultats du pH de sols du quartier Matadi Mayo

Echantillon	Profondeur	pH	Acidité de sols
MSC 01	25 cm	7,1	Sol neutre
MSC 02	50 Cm	5,3	Sol acide
MSC 03	1 m	4,5	Sol acide

Carbone total et Azote total

Les sols étudiés sont pauvres en carbone organique total (Ctot), en azote total (Ntot) et en phosphore total. Ces faibles teneurs en matières organiques se répercutent négativement sur la fertilité des sols et génèrent des effets physiques, chimique et biologique. Cette situation expose les sols de Kimwenza et Matadi Mayo à la dégradation par l'érosion hydrique lors de fortes précipitations surtout lorsque les pentes deviennent fortes. Les rapports carbones azote (C/N), azote à azote N/N et phosphore (P) donnent les résultats présentés aux Tableaux 9 et 10.

Tableau 9. Résultat des analyses physico-chimiques de quelques éléments chimiques

Site	Kimwenza	Matadi Mayo
Carbone (C)	13 à 15	12 à 15
Azote (N)	0,1 à 0,3 %	0,1 à 0,2 %
Phosphore (P)	< à 15 ppm	< à 15 ppm

Le phosphore est un élément essentiel à la croissance des plantes (Parent, 1998). Le Tableau 10 montre que le taux de phosphore de sol de Kimwenza et Mata Mayo est faible car la teneur en ce dernier est inférieure à 30 ppm.

Tableau 10. Norme d'interprétation du phosphore

Classes	Teneur en phosphore total	Taux de phosphore
1	< 30ppm	Très faible
2	30-50 ppm	Pauvre
3	50-100 ppm	Moyen
4	100-200 ppm	Riche

Éléments minéraux (métaux lourds)

D'un point de vue physique, le terme « métaux » désigne les éléments métalliques naturels, dans cette recherche, nous avons distingué deux types métaux en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels (Cu, Fe, Zn) et métaux toxiques (Pb), (Tableaux 11 & 12).

Tableau 11. Les éléments minéraux en %

Éléments minéraux	%
Cuivre(Cu)	1,1
Fer (Fe)	4,2
Zinc (Zn)	1,3
Manganese (Mn)	2,5
Plomb (Pb)	3,4

Tableau 12. Type de sol et valeurs des paramètres de sols de la zone d'étude

Code (FAO)	Symbol e	Classification des sols	% Sable	% Limon	% Argile	% Composé Organique	% Matière organique
31410	Ach	Appli acrisol	57	25	18	0.38	0.654
31417	ARo	Ferralic Arenosol	54	25	21	0.6	1.032

L'érodibilité étant la capacité naturelle d'un sol à résister à l'érosion, son estimation est donnée par l'équation ci-dessous et les résultats sont exposés au Tableau 13.

$$k = [2,1*10^{-4}*(12 - MO) M^{1.14} + 3.25*(b-2) + 2,5*(c-3)]/100$$

K : le facteur d'érodabilité

M : (% sable fin + % limon) (100 - % argiles)

MO : le pourcentage de matière organique

b : le code de structure

c : la classe des perméabilités

Tableau 13. Type de sol et valeurs d'érodibilité

Code (FAO)	Symbole	Classification des sols	% Sable	% Limon	% Argile	% Composé Organique	% Matière organique	Erodibilité K
31410	Ach	Appli acrisol	57	25	18	0.38	0.654	0.14
31417	ARo	Ferralic Arenosol	54	25	21	0.6	1.032	0.16

4. CONCLUSION

L'érosion ravinante surplombant les périmètres maraîchers constitue une menace majeure pour la fertilité de sol et par conséquent, pour résoudre le problème de l'insécurité alimentaire. L'impact de l'érosion du sol sur les périmètres maraîchers de Kinshasa particulièrement dans les quartiers Kimwenza et Matadi Mayo a été évalué. L'objectif de cette recherche était de mener une analyse de

l'érodibilité de sol, déterminer les caractéristiques de la fertilité des sols et d'évaluer les impacts de l'érosion ravinante sur l'environnement. L'analyse physico-chimique de ces sols ont donné des résultats ci-après : les sols sont acides avec un pH inférieur à 6 en moyenne, la teneur en argile ne dépasse pas 10 %, la teneur en sable dépasse 80 % (sol sablonneux) et la matière organique varie entre

0 à 1%. Pour les autres éléments : l'azote, le calcium, le magnésium, le potassium et le phosphore assimilable, les teneurs sont très faibles. Tous ces paramètres montrent à suffisance que les sols de la zone d'étude sont moins fertiles et avec une érodibilité élevée.

L'Analyse granulométrique des périmètres maraîchers correspondent à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur et diamètre des particules étant supposées sphériques indépendamment de la nature et de la composition des minéraux en fonction de leur diamètre suivant la référence de l'USDA qui montre que le sol de Kimwenza et Matadi Mayo est de nature sableuse, ce qui favorise le lessivage de nutriments. Le phénomène d'érosion modifie la forme et l'hydrologie des milieux, et provoque parfois des mouvements de terrain. Les conséquences sont lourdes pour la biodiversité comme pour la sécurité de tous. L'érosion entraîne également une dégradation de la qualité du sol et de l'eau, provoquée par les matières en suspension. Les faibles teneurs en matières organiques se répercutent négativement sur la fertilité des sols et dégénèrent des effets physiques, chimique et biologique. Cette situation expose les sols de Kimwenza et Matadi Mayo à la dégradation par l'érosion hydrique lors de fortes précipitations surtout dans de fortes pentes. Du fait que les sols de Kimwenza et Matadi Mayo sont pauvres (moins fertiles, matière organique inférieure à 1 %), l'ensablement des plates-bandes due à l'érosion hydrique a amené la population à l'utilisation des engrais chimiques pour fertiliser les zones maraîchères, pourtant, ces derniers polluent le sol, les rivières et cause beaucoup des maladies. La présence des métaux lourds rencontrés dans les sols de Kimwenza et Matadi Mayo ont des effets toxiques à court et/ou long terme, ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques et respiratoires.

Eu égard à tout ce qui précède, on recommande aux maraîchers des sites de Kimwenza et Matadi Mayo, d'appliquer l'agroforesterie pour protéger les périmètres maraîchers contre l'érosion pluviale, la lutte anti-érosive telle qu'augmenter la capacité d'infiltration et la capacité de stockage de sol pour accroître la protection et la résistance des zones maraîchères ; le recours aux engrais verts ou naturels que chimiques pour protéger l'environnement face à la pollution. Par ailleurs, il faudrait penser à l'utilisation des roches phosphatées et carbonatées comme fertilisant étant donné que le sol manifeste la déficience en ces éléments afin de combler les besoins des cultures en ces nutriments sur ces sites.

Les études ultérieures devraient se concentrer sur l'évaluation de l'efficacité des techniques de lutte

contre l'érosion (comme les terrasses, les bassins de rétention et les cultures intercalaires) dans les conditions locales spécifiques de Kimwenza et Matadi Mayo. Il faudrait également étudier l'impact des pratiques agricoles et de l'urbanisation sur la dégradation des sols, et évaluer les risques liés aux glissements de terrain et aux inondations pour la sécurité alimentaire, tout en proposant des solutions durables adaptées à la région.

Références

- Benhattab K., 2017. *Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le bassin hydrographique - Chécliff - Algérie*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Med Boudiaf, 350 p.
- Bocoum M., 2004. *Méthodes d'analyses des sols*. Document de travail. Institut National de Pédologie, Dakar - Sénégal, 55 p.
- Bultot F., 1971. *Statistiques des pluies intensives en un point dans une aire du Congo belge et du Ruanda - Urundi*. B.C.C.V 11, Bruxelles, 136 p.
- Claudie Beaulieu, 2009. *Homogénéisation des séries de précipitations : identification des techniques les plus prometteuses et nouveaux développements*. Thèse de doctorat en sciences de l'eau, Université du Québec (INRS-ETE), 319 p.
- Crabbe M., 1975. *Le climat de Kinshasa : d'après les observations centrées sur la période 1931-1970*. Service météorologique, Dpt. des Transports et Communications, Kinshasa, 120 p.
- Donald H. & Allard F., 1992. *Les statistiques, une approche nouvelle*. 2^e édition. Ed. McGraw-Hill. Montréal/Quebec, 512p.
- Duchaufour, 1997. *Pédologie et classification*. Ed. Masson, Paris, 477 p.
- Goula B.T.A., Konan B., Brou Y.T., Savané I., Fadika V. & Srohourou B., 2007. Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(2), 49-67.
- Guetter P. & Kutzbach J., 1990. A modified Köppen classification applied to model simulations. *Climate change* 16(2), 193-216.
- Gumbel E. J., 1958. *Statistics of Extremes*. New York, Columbia University Press, 375 p.
- Hladký J., Novotná J., Elbl J., Kynický J., Juřička D., Novotná J. & Brtnický M., 2016. Impacts of Water Erosion on Soil Physical Properties. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 64(5), 1523-1527. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201664051523>
- Ilombe Mawe G., 2024. *Urban Gullies in the Democratic Republic of the Congo : Susceptibility, Expansion Rates and Impacts*. Thèse de doctorat en sciences, co-tutelle ULiège-UNIKIN, 181 p.

- Ilombe Mawe G., Lutete Landu E., Makanzu Imwangana F., Hubert A., Dille A., Biolders C., Poesen J., Dewitte O. & Vanmaercke M., 2024. What controls the expansion of urban gullies in tropical environments? Lessons from contrasting cities in D.R. Congo. *Catena*, 241, 108055. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108055>
- Ilombe Mawe G., Lutete Landu E., Makanzu Imwangana F., Nzolang C., Michellier C., Poesen J., Biolders C., Dewitte O., Hubert-Ferrari A. & Vanmaercke M., 2022. Quantifying the direct impacts and risks of large urban gullies in the Democratic Republic of Congo. In *10th International Conference on Geomorphology, Coimbra, Portugal, 12–16 Sep 2022*, ICG2022-145. <https://doi.org/10.5194/icg2022-145>
- Kayembe Wa Kayembe M., De Maeyer M. & Wolff E., 2010. Cartographie de la croissance urbaine de Kinshasa (R.D. Congo) entre 1995 et 2005 par télédétection satellitaire à haute résolution. *Belgeo*, pp. 439-455.
- Kisangala Muke M., 2014. *Impacts du changement climatique sur la navigabilité de la rivière Kasai : approches morphométrique, hydrométrique, climatologique et écologique du bassin du Kasai dans sa partie congolaise*. Thèse de doctorat, Université de Kinshasa, 206 p.
- Kisangala Muke M. & Yina D., 2011. *Rapport de l'étude d'aménagement et de gestion des eaux des précipitations dans les zones menacées par les érosions à Kikwit*. Inédit, 67 p.
- Lelo Nzuzi F., 2008. *Kinshasa : Ville et Environnement*. Ed. L'Harmattan, Paris, 282 p.
- Makanzu Imwangana F., 2010. *Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa entre 1957 et 2007 par télédétection et SIG*. Mémoire de Master complémentaire, GRN/DSGE, Faculté des Sciences, ULg, 76 p.
- Makanzu Imwangana F., 2014. *Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa : Dynamisme Pluvio-Morphogénique et Développement d'un Outil de Prévision*. Thèse de doctorat en Sciences/Géographie, Faculté des Sciences. Université de Kinshasa, 193 p.
- Makanzu Imwangana F., Bambi Tshitshi M. & Ntombi muen Kabeya M., 2020. Occurrences des catastrophes dues aux aléas naturels en RD.Congo : causes et conséquences. *Bull. du CRGM*, XIII N°cumulatif, 255-273.
- Makanzu Imwangana F., Kamosi Zola B., Lele Nyami B., Munongo Iyabidila M., Ntombi Muen Kabeya M., Phuati Phuati G. & Ozer P., 2023. Évolution récente et détermination de la saison de pluies dans la région de Kinshasa (RDC) de 1961 à 2010. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture* 6(2), 13-27.
- Makanzu Imwangana F., Kiangebeni C., Ilito P.D. & Matungila Juve J., 2022. Preuve et impact d'un auto-aménagement urbain dans le bassin versant de la Lukunga à Kinshasa. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture* 5(4), 85-96. <https://www.rafeaongo.com/?pages=article&id=196>
- Meylan P. & Muzy A., 1999. Hydrologie fréquentielle, HGA, Bucarest, 413 p. <http://www.cig.ensmp.fr/-hydro>
- Moeyersons J., Makanzu Imwangana F. & Dewitte O., 2015. Site-and rainfall-specific runoff coefficients and mega-gully development in Kinshasa (DR Congo). *Natural Hazards*, 79(1), 203-233. DOI10.1007/s11069-015-1870-z.
- Mubanga Nzo-Ayum Ntub G., Aloni Komanda J. & Makanzu Imwangana F., 2024. Dynamique des risques d'érosion ravinante des terres marginales de la commune rurale d'Idiofa (Kwilu/RD.Congo). *Journal Africain des Sciences*, 1(1), 37-47.
- Muhindo Sahani W., 2011. *Le contexte urbain et climatique des risques hydrologiques de la ville de Butembo (Nord-Kivu /RDC)*. Thèse de doctorat en Sciences/Géographie, Université de Liège, 275 p.
- Mutungu Kuleta Th., Vuni Simbu A., Mubanga Nzo Ayum G., Makanzu Imwangana F., Mpuu Mazembe B., Miti Tsseta F. & Lelo Nzuzi Fr., 2024. Catastrophes naturelles provoquées par l'érosion ravinante dans certains quartiers vulnérables de la ville de Kikwit en République Démocratique du Congo. *European Journal of Social Sciences Studies*, 10(3), 52-72. <https://dx.doi.org/10.46827/ejss.v10i3.1789>
- Parent L. É., 1998. *Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Québec, APAQ, Colloque sur le Phosphore : une gestion éclairée, organisé par l'ordre des ingénieurs agronomes du Québec*, 27 p.
- Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon T.A., 2007. Updated World map of the Köppen-Geiger climate. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.
- Roose E., 1994. Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique FAO*, no 70, Rome, 420 p.
- Sene S. & Ozer P., 2002. Evolution pluviométrique et relation inondations – événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42, 27-33.
- Soro T. D., Soro N., Oga Y. M. S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K. E. & Biémi, J., 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Géographie Physique et Environnement*, 5, 55-73.
- Stevens C., 2006. *Offre de coopération internationale en matière de lutte anti-érosive à Kinshasa*. Mémoire de D.E.S, EGSS/ULg, inédit, 70 p.
- Tarakanov V., 2024. *Qu'est-ce que l'érosion des sols ? Comment les techniques nucléaires aident-elles à l'identifier et à l'atténuer ?* Bureau de l'information et de la communication de l'AIEA, <https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/techniques-nucleaires-contre-erosion-des-sols-comment>, consulté le 23 Juillet 2025.
- Van Caillie X., 1983. *Hydrologie et érosion dans la région de Kinshasa : Analyse des interactions entre les conditions du milieu, les érosions et le bilan hydrologique*. Thèse de doctorat, Dpt de Geografie Geologie, KUL, 554 p.
- Van Caillie X., 1987. *L'érosion pluviale – cas du domaine tropical sableux (Exposé)*. Réseau Erosion-ORSTOM, pp. 6-10.

Vanmaercke M., Dujardin E., Ilombe Mawe G., Lutete Landu E., Makanzu Imwangana F., Biolders C., Poesen J., Hubert A. & Dewitte O., 2023. Predicting and preventing the impacts of urban gully erosion in tropical environments: recent advancements based on fieldwork and modelling. *The 9th International Symposium on Gully Erosion, Chengdu, China, 03-09/11/2023*, 7 p.

Zeineddine N., 2020. La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne. *Physio-Géo.*, 15(1), 89-109. <http://journals.openedition.org/physio-geo/10966>; DOI: <https://doi.org/10.4000/physio-geo.10966>