

Influence de l'infiltration aux différents horizons pédologiques sur le processus du déclenchement de l'érosion ravinante du site du Mont-Amba à Kinshasa, R.D. Congo.

Makanzu F. I.*^{1,2}, Kazadi A.¹, Ntombi M.^{1,2}, Aloni J. K.¹

ABSTRACT

Paper History

Received:
January 25, 2018

Revised:
June 15, 2018

Accepted:
September 10, 2018

Published:
November 27, 2018

Keywords:

Kinshasa, splash, sandy soil, porosity of soil, hortonian flux, anthropogenic environment, gully erosion

Infiltration at different pedological horizons on the process triggering gully erosion in the Mont-Amba area in Kinshasa, D.R. Congo

Study of infiltration capacities of the gully profiles at Mont Amba (Kinshasa) was carried out in order to explain the generalized production of runoff from the beginning of the rainy season and even the appearance of gullies in its hinterland. The experiment *in situ*, was done using a ring infiltrometer (7.8 cm in diameter or a 48 cm² section) at the different horizons of the profile (A₁, B_{w1}, B_{w2}). We aim to determine the roles of the incriminated factors: the porosity (A, B), the humus layer (A₁) and possibly at what level the triggering of the gully erosion originated. We found that nearly 70 % of surface horizons pose infiltration problem from the A₁ horizon, which stores a high water content which varies inversely with depth. This development seems to be contrary to the porosity especially considering that nearly 90 % of these soils have a sandy texture (diameter 250 to 500 μm) implying a good infiltration. Thus, there are two causes that trigger rainfall erosion in the anthropogenic environment of Mont-Amba. The first is due to the resistance to infiltration by the dry state of the A₁ horizon, by glazing and in the presence of a thin layer of humus. The second is due to the fact that this crust developed by these sandy soils generate, as long as it is not well moistened the hortonian flux even during low intensity rains.

¹Unité de Recherche et de Formation en Gestion des Risques Naturels (URF-GRN), Département des Géosciences, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, B.P.190 Kinshasa XI, RD. Congo

²Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Centre de Recherches Géologiques et Minières, Kinshasa, RD. Congo

* To whom correspondence should be addressed : filmsakanzu@yahoo.fr

INTRODUCTION

L'étude des sols est un des éléments essentiels de la compréhension d'un territoire pour son aménagement [MANDAL *et* SHARDA, 2013 ; NIGUSSIE *et* al., 2017]. Son occupation, son utilisation pour l'agriculture (cultures et élevage) et divers autres usages en dépendent. Sa dégradation complique et rend onéreux la mise en valeur du territoire. En effet, tel est le problème que pose l'érosion ravinante à l'urbanisation de la ville de Kinshasa.

Comme d'autres villes congolaises telles que Kasenga, Kolwezi, Mbuji Mayi, Kananga, Tshikapa, Kikwit, Kenge, ... bâties sur le substrat sableux du groupe de sables ocre de Kalahari, Kinshasa est le théâtre d'une érosion ravinante spectaculaire d'origine anthropique [MAKANZU *et* al., 2013 ; MAKANZU, 2014 ; MAKANZU *et* al., 2015 ; VANMAERCKE *et* al., 2016].

Comme on le sait, l'utilisation des sols due à une extension urbaine entraîne des changements dans la dynamique des processus hydrologiques [FERREIRA *et* al., 2012]. Le changement dans la couverture du sol est l'un des facteurs aggravants dans le déclenchement du ravinement [GARCIA- RUIZ, 2010 ; NADAL-ROMERO *et* al., 2013 ; MOEYERSONS *et* al., 2015]. Cependant, l'étude faite par MOEYERSONS *et* al. [2015] dans la haute ville de Kinshasa a montré que le coefficient de ruissellement n'est pas seulement fonction de l'utilisation et de la compaction du sol ; de la pente du terrain et de la hauteur de la pluie mais aussi et surtout

de l'intensité de celle-ci. L'urbanisation avec ses nombreuses surfaces imperméabilisées comme les routes asphaltées ou en terre battue avec la concentration du ruissellement érosif qu'elle occasionne sont parmi ses changements [MAKANZU *et* al., 2014 ; MOEYERSONS *et* al., 2015].

Par ailleurs, nous savons que DE PLOEY *et* SAVAT [1968] conclurent dès lors que les convexités sommitales des collines de la région de Kinshasa, aux pentes faibles, ont été essentiellement modelées par l'action de l'érosion par une ablation accentuée, due aux effets du splash. Ceci corrobore les conclusions des expériences effectuées sur le terrain par DE PLOEY *et* ROELS [1965] *et* DE PLOEY [1966] à l'aide des sables traceurs selon lesquelles, les sols à pente douce ne sont que peu sensibles à l'action du ruissellement. De telles conclusions ont aussi été consacrées par MOEYERSONS [1989 *et* 1991] qui constate qu'il ne se produit pas de ravinement naturel sur le relief convexe au Rwanda. Et que dans une forme de relief de ce genre, l'érosion ravinante n'apparaît qu'à la suite d'une modification du paysage favorisant la concentration des eaux entre autres par les routes [NYSSSEN *et* al., 2002 ; MAKANZU *et* al., 2014].

Cependant, un aspect important continue à poser problème ; à savoir : comment expliquer la production généralisée du ruissellement concentré dès le début de la saison des pluies et même l'apparition des ravins en milieu péri-urbain alors qu'on devait s'attendre théoriquement, à la prédominance de l'infiltration ? Si l'on peut comprendre plus facilement la même observation faite par ALEXANDRE [1967] sur sol argileux de savane parcouru annuellement par le feu de brousse, la question reste

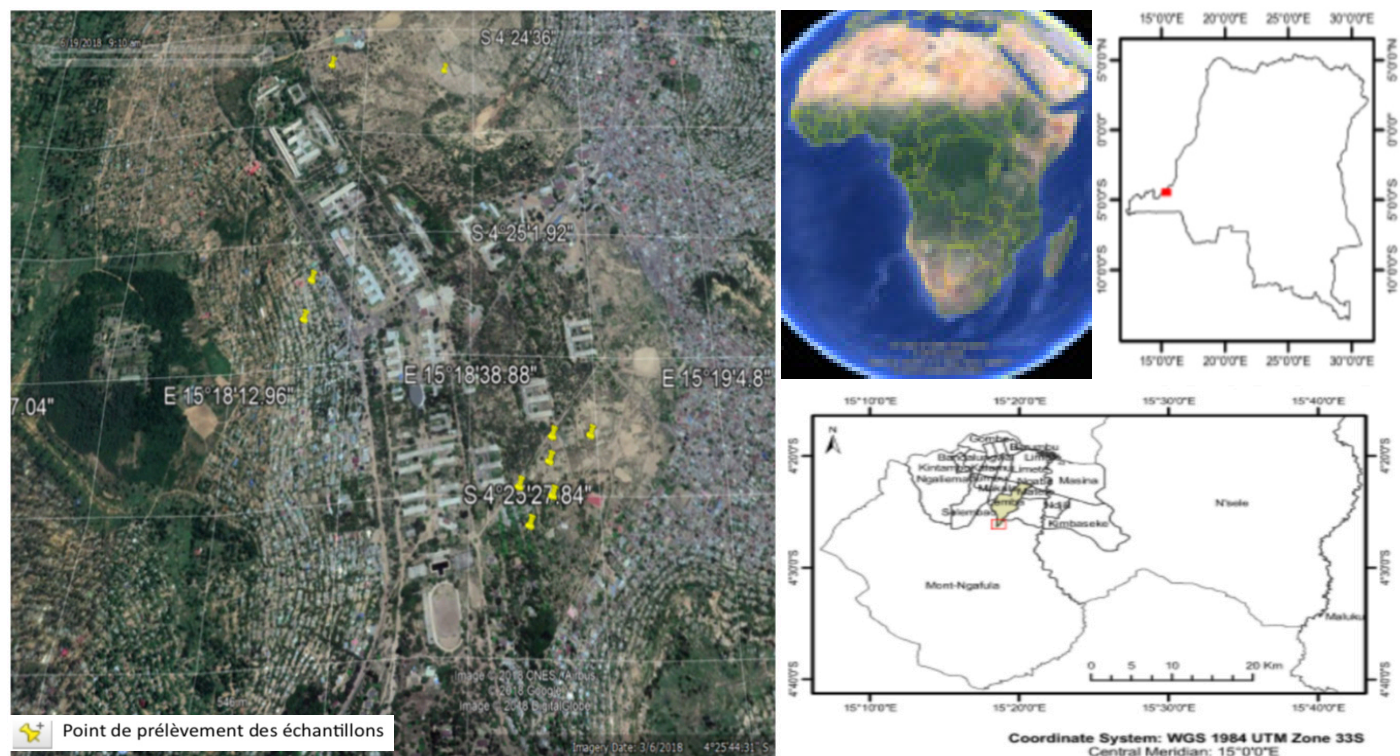


Figure 1 | Localisation de la zone d'étude : la moitié droite est occupée par le site du Mont-Amba ; les points jaunes représentent les sites où ont été prises les mesures.

posée dans le cas des sols sableux des collines de zones péri-urbaines de Kinshasa. En effet, les horizons superficiels des sols sableux fins de Kinshasa, qui sont séchés pendant la longue saison sèche (4 mois) auraient dû d'abord s'imbiber, se saturer en eau [HORTON, 1945] avant d'organiser un écoulement concentré. Tel est "l'énigme" que nous cherchons à comprendre. Cette étude fait suite à la recherche précédente de MOEYERSONS et al. [2015] qui cherchaient à identifier et comprendre le moment et les facteurs du déclenchement de l'écoulement précoce responsable de l'érosion ravinante sur les versants sableux à pente convexe des collines périphériques de Kinshasa.

L'objectif poursuivi est rendu quelque peu complexe par la multiplicité des hypothèses. Il s'agit concrètement de tester expérimentalement in situ l'infiltration aux différents horizons du profil (A_1 , B_{w1} , B_{w2}). Ce test est mené afin d'essayer de déterminer les rôles des facteurs incriminés ; à savoir : la porosité (A, B), la couche humifère (A_1) et éventuellement à quel niveau le déclenchement de l'érosion ravinante prenait naissance.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Breve description du site du Mont-Amba

Le site du Mont-Amba (Figure 1) est situé à une altitude moyenne de 390 mètres. Les altitudes de points de prélèvement des échantillons varient entre 378 à 436 mètres. Ce site est bordé des versants à pentes moyennement fortes considérés comme non constructibles sans des travaux préalables coûteux de maîtrise des eaux. Il est entouré par cinq sous-versants ; à savoir : le bassin versant de la Funa à l'ouest, de la Kemi (tributaire de la Funa) au nord, de la Matete (tributaire de la N'djili) au nord-est, de la Kwambila (tributaire de la Lukaya) à l'est et de la Bimuka (tributaire de la Lukaya) au sud-est. Les travaux de construction de l'Université de Kinshasa qu'il abrite, ont débuté en 1954 en adoptant le principe américain du campus.

Le site du Mont-Amba fait partie de la haute ville de Kinshasa, qui connaît un climat tropical chaud et humide [PEEL et al., 2007]. La saison de pluies s'étend de septembre (ou octobre) jusqu'à mai [BULTOT, 1971]. A Kinshasa Ouest, la hauteur moyenne annuelle des pluies est d'environ 1400 mm [MAKANZU, 2010]. Dans la région, NTOMBI et al. [2004 ; 2009] indiquent que le changement

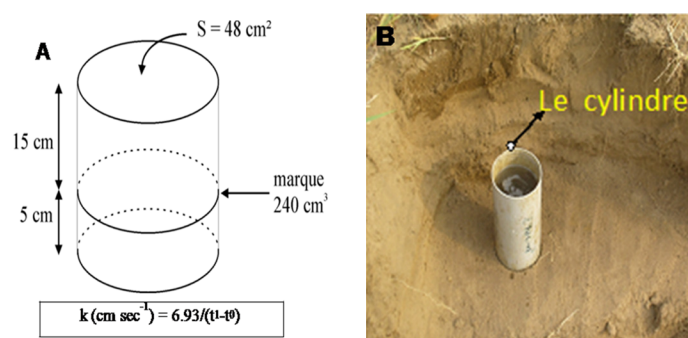


Figure 2 | (A) : Dimensions du perméamètre annulaire en PVC de Moeyersons (1989). (B) : Le matériel de terrain : l'infiltromètre utilisé. Ce tube doit être inséré dans le sol jusqu'à 5 cm de profondeur sans perturbation du sol. L'échantillon de sol de 240 cm³ est prélevé en tournant légèrement le tube tout en le soulevant doucement.

climatique va se manifester par une augmentation des pluies en termes de leur hauteur et intensité. A l'origine et longtemps encore après l'édification du campus, les versants étaient restés couverts d'une végétation de savane arbustive mais suffisante pour stabiliser les versants. Elle est devenue depuis progressivement steppique [TSHIBANGU et al., 1997]. On n'y observait pratiquement pas d'érosion ravinante. Les rares encoches en cirque dans les amphithéâtres de sources d'érosion étaient rapidement colonisées par une végétation forestière favorisée par l'humidité créée et entretenue par le suintement à la base. Leur développement se trouvait ainsi bloqué [MITI et al., 2004]. La colline du Mont-Amba fut épargnée de l'invasion des sites collinaires jusque vers les années 1970 [PAIN, 1973]. Ce n'est que tout récemment en 2000 que les chefs coutumiers Teke-Umbu, dont certains œuvrent à l'université, se sont permis, de distribuer anarchiquement des parcelles d'abord sur le versant baptisé Cogelos, ensuite sur le versant Est de la rivière Funa supérieure.

Matériels

Pour mesurer la capacité d'infiltration sur le terrain et prélever les échantillons de sol, on a utilisé un perméamètre annulaire en tube PVC décrit par MOEYERSONS [1989] ; de diamètre égal à 7,8 cm soit une section de 48 cm² (Figure 2A-B). Un anneau d'un tel

Tableau I | Caractéristiques de différents points de prélèvement

N°Point de prélèvement (PP)	Profondeur de profil (m)	Couleurs des horizons (Monsell)	Horizons du profil	Observations
1	2.10	2.5Y 3/3	A ₁	Présence des tâches jaunes et noires ainsi que des fourmis, de nombreuses racines de graminées dans A ₁ , rares à partir de B _{w1} .
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
2	4.00	2.5Y 3/3	A ₁	Présence des petites racines, de graminées, des petits trous dans A ₁ et tâches noires dans B _{w1} .
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
3	2.00	2.5Y 3/3	A ₁	Des petites racines très fines dans A ₁ , présence des racines avec l'intrusion d'une partie noire très remarquable.
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
4	2.00	2.5Y 3/3	A ₁	-
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
5	3.00	2.5Y 3/3	A ₁	Présence des petites racines A ₁ .
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
6	4.00	2.5Y 3/3	A ₁	Présence de très fines racines.
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
7	6.10	2.5Y 3/3	A ₁	Petites racines dans A ₁ et plusieurs petits trous
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
8	4.00	2.5Y 3/3	A ₁	Même observation avec 7.
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
9	2.15	2.5Y 3/3	A ₁	Des fines racines à l'horizon A ₁ .
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	
10	2.00	2.5Y 3/3	A ₁	Mêmes observations que 9
		2.5Y 6/8	B _{w1}	
		10YR 8/8	B _{w2.1}	
		2.5Y 8/8	B _{w2.2}	

diamètre permet de prélever les échantillons de sol non perturbés. Ce tube est enfoncé jusqu'à 5 cm de profondeur, ce qui permet de prélever un volume de 240 cm³ en tournant légèrement le tube tout en le soulevant doucement. Si une partie du sol reste quand même dans le fond du trou après le prélèvement, la convexité de la partie inférieure de l'échantillonnage sera récupérée manuellement à l'aide d'une truelle ou d'une spatule. Cet échantillon est conservé dans un sachet en plastique pour le laboratoire. Ce mode opératoire exige que les mesures dans les endroits où les racines sont nombreuses soient exclues.

Les autres instruments qui ont servi à la recherche sur le terrain sont GPS de marque GARMIN pour positionner tous les points de prélèvements d'échantillons sur une carte (Figure 1), un appareil photographique numérique pour les prises de vues des profils et

horizons où ont été prélevés les échantillons et un décimètre qui a servi aux mesures des épaisseurs et profondeurs de différents ravins et horizons dans lesquels devaient être effectuées les mesures d'infiltration.

La couverture pédologique a été subdivisée en volume homogène. Les profondeurs ont varié de 38 à 150 cm. Elles s'expriment explicitement dans le détail par des agrégats distincts, des différents constituants formant le fond matriciel et les traits pédologiques. Par leur dimension verticale, centimétrique à métrique, les horizons sont (directement) identifiables à l'œil nu dans le profil. Chaque horizon est un volume. Le Tableau 1 présente les caractéristiques moyennes observées sur les différents sites de prélèvement qui ont par ailleurs déjà été bien décrits par WOUTERS [2008] et BAERT et al. [2009]. La coupe pédologique caractéristique

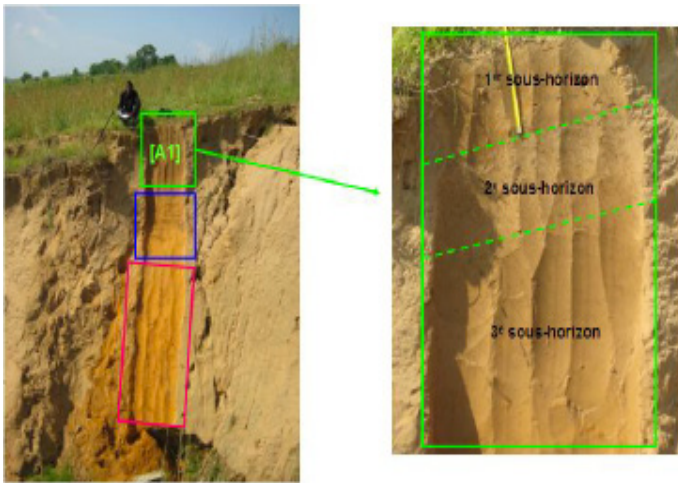


Figure 3 | Profils de sol réalisés au niveau d'un ravin actif au site du Mont-Amba à Kinshasa (Wouters, 2008). L'horizon A_1 est en vert, l'horizon B_{w1} en bleu et l'horizon B_{w2} en rose.

de ce milieu est décrite macroscopiquement à l'état sec (**Figure 3**) ; il faut savoir que les couleurs apparaissent très nettement après une pluie. Il s'agit de :

- l'horizon A avec une épaisseur de 10-30 cm ; il s'agit du sable fin (grisâtre). Il est riche en radicelles de graminées mais diminuant avec la profondeur ;
- l'horizon B_{w1} avec une épaisseur de 30-80 cm, il est constitué d'une texture sableuse plus cohérente que l'horizon précédent ; certainement avec la profondeur, il y a un peu plus de sable fin. De couleur gris jaunâtre, il contient quelques rares radicelles et est friable à l'état sec ;
- l'horizon $B_{w2.1}$ avec une épaisseur de plus d'un mètre, il est de couleur jaune, humide même à cette période (07/07/2018), c'est du sable fin, avec un peu de limons, des tâches noirâtres qui seraient la preuve des passages de la pédofaune (vers de terre, ...).

Méthodes

La technique consiste à mesurer *in situ* la dynamique de l'infiltration de l'eau dans le sol en mesurant la perméabilité de chaque horizon de quelques profils pédologiques des versants des ravins qui entaillent le Mont-Amba aux fins d'en déduire les comportements. Dans ce but, les parois des ravins ont été nettoyées à l'aide d'une bêche de haut vers le bas du profil pour rafraîchir et visualiser les horizons qui se différencient par leur coloration. Ce choix a été arbitraire pour tous les points d'observation.

La capacité d'infiltration est donnée par la loi de DARCY [1856] en chronométrant la chute du niveau d'eau dans le tube selon l'équation de LAMBE et WHITMAN [1979] suivante :

$$k = \frac{2.3 * a * L * \log_{10}(h_0)}{A(t_1 - t_0) * h_1} \quad (Eq1)$$

Où, k = la perméabilité en cm s^{-1} ; a = la section du tube (48 cm^2 ici) ; L = l'épaisseur de l'échantillon testé (5 cm ici), la profondeur à laquelle l'infiltromètre est enfoncé dans le sol ; A = la section de l'échantillon testé qui est de 48 cm^2 ; $t_1 - t_0$ = le temps en secondes entre les niveaux d'eau, h_1 ($=20 \text{ cm}$) et h_0 ($=5 \text{ cm}$) dans le tube. Pour ce tube en PVC qui a servi d'infiltromètre annulaire, la capacité d'infiltration k devient :

$$k = \frac{6.93}{(t_1 - t_0)} \quad (Eq2)$$

Dans chaque profil, la dynamique de l'infiltration a été mesurée dans son état initial à partir de la teneur en eau du sol. Connaissant son volume, la procédure veut que l'on mesure le temps qui s'écoule

à partir du remplissage complet de la partie du tuyau au-dessus de la surface du sol jusqu'à ce que toute l'eau ait disparu dans le sol ($t_1 - t_0$).

Cette opération est répétée pour tous les horizons concernés de chaque profil ; à savoir : A_1 , B_{w1} et B_{w2} . Pour passer d'un horizon à l'autre, on a dégagé l'horizon sur lequel un échantillon a été prélevé jusqu'à la limite supérieure de l'horizon sous-jacent et ainsi de suite. La profondeur de cette limite varie, évidemment d'un endroit à l'autre en fonction de la position topographique du profil sur le terrain.

Au laboratoire, à l'aide d'un bécet d'une capacité de 1000 ml, les échantillons sont séchés à une étuve de marque Memmert à une température de 105°C pendant 48 heures [ANDERSON et INGRAM, 1996 ; SOLTNER, 2011]. Avant comme après séchage, les échantillons sont pesés sur une balance de précision (0.001 g) de marque Ranger. Dès que les échantillons sont retirés de l'étuve, chacun est repesé de nouveau après un refroidissement d' $\frac{1}{2}$ minute à la température ambiante, le poids sec obtenu est noté P_s . La teneur en eau initiale du sol est obtenue en soustrayant le poids sec total du poids du bécet. La détermination de la porosité est donnée par la formule de BURGER [1922] cité par DUCHAUFOR [1960] :

$$\text{Porosité} = \frac{D - D'}{D} \times 100 \quad (Eq3)$$

Où D' est la densité apparente du sol sec et D est la densité réelle solide qui est constante, de l'ordre de 2.6 pour les sols minéraux habituels (2.5 pour un sol riche en carbonate).

Où P_s est le poids sec, V est le volume (de valeur connue) de 240 cm^3 . La teneur en eau en pourcentage est calculée par la formule suivante :

$$\omega p = \left[\left(\frac{\text{Mech}}{M \text{ sec}} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (Eq5)$$

Où ωp est la teneur en eau en pour cent ; Mech est la masse de l'échantillon humide et $M \text{ sec}$ est la masse de l'échantillon sec.

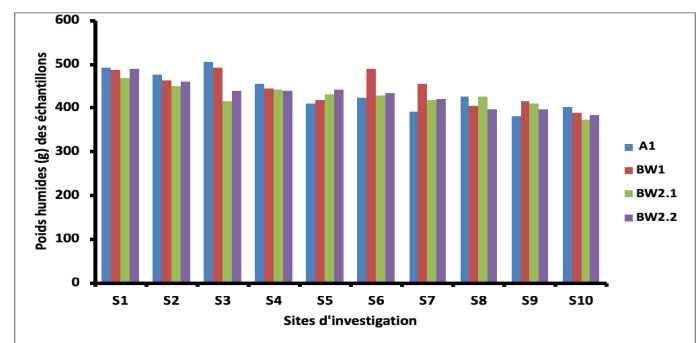


Figure 4 | Poids humides des échantillons. L'allure générale est telle que le poids décroît au fur et à mesure que la campagne évolue dans le temps. Cette décroissance est très visible avec la courbe de tendance.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Caractéristiques hydrodynamiques du site

Les données présentées aux **Figures 4** et **5** ont servi de base pour calculer la densité, la teneur en eau initiale (**Tableau 2**) et la porosité (**Tableau 3**) de chaque horizon du profil. Les poids humides des échantillons (**Figure 4**) diffèrent d'un horizon à l'autre en raison de la structure, de la texture et des éléments qui entrent dans la composition. Ces éléments déterminent la capacité de rétention d'eau. Ces échantillons ont un poids maximum de

Tableau 2| Teneur en eau initiale (%) des horizons caractéristiques des sables ocres du Mont-Amba

	N° Profil									
	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8	PP9	PP10
Horizon A ₁	21,2 ⁻	18 ⁻	18,7 ⁻	15,4 ⁻	19,4 ⁻	20,6 ⁻	16,7 ⁻	17 ⁻	12,2 ⁻	4,4 ⁻
Horizon B _{w1}	19,2 ⁻	21 ⁺	18 ⁻	12,2 ⁻	17,5 ⁻	14,7 ⁻	17,1 ⁺	16,4 ⁻	10,2 ⁻	10 ⁺
Horizon B _{w2.1}	17,6 ⁻	14,33 ⁻	14,7 ⁻	15 ⁺	19,4 ⁺	12,6 ⁻	17,5 ⁺	15 ⁻	13,2 ⁺	4,3 ⁻
Horizon B _{w2.2}	18,3 ⁺	17,3 ⁺	21,5 ⁺	11 ⁻	16,7 ⁻	14,5 ⁺	21 ⁻	15,6 ⁺	16 ⁺	12 ⁺

Les signes (+) et (-) indiquent le sens de l'évolution de la teneur initiale en eau (%) dans chaque horizon du sol. The (+) and (-) signs indicate evolution of initial water content (%) horizon by horizon.

Tableau 3| Porosité (%) des horizons caractéristiques des sables ocres du Mont-Amba

	Epaisseur en (cm)	N°profil									
		PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8	PP9	PP10
Horizon A ₁	38 - 80	53	53	47	57.5	83	78.1	85.7	72.2	84.4	62.5
Horizon B _{w1}	45 - 130	53	57.5	50.2	57.5	74.4	78.1	60.5	79.3	73.3	77
Horizon B _{w2.1}	45 - 150	57	62.5	62.5	62.5	73.3	73.3	73.3	69	72.2	73.3
Horizon B _{w2.2}	150	51.1	59	62.5	58	62.5	73.3	82	82	83	83

Tableau 4| Types de conductivité hydraulique des profils d'après Soltner (2011)

Points de prélèvement	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8	PP9	PP10
Type de conductivité hydraulique	Perméable					Très perméable				

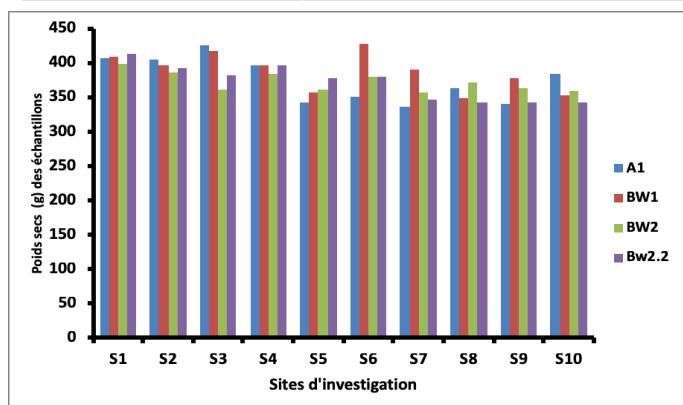
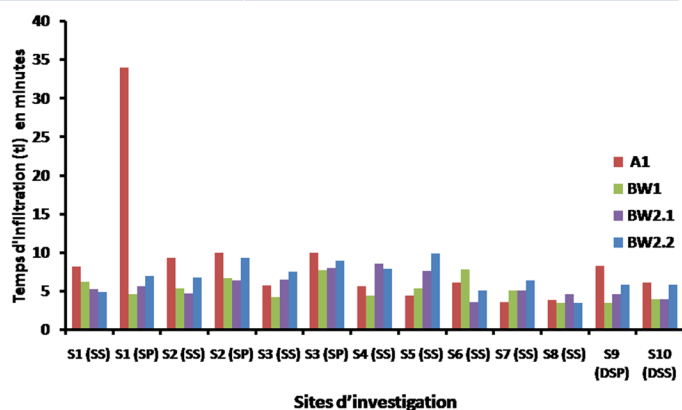


Figure 5| Poids secs des échantillons. La tendance décroissante du poids des échantillons est confortée même après séchage.

505 g et minimum de 381 g. Leur poids humide moyen est de 436, 444, 422, 431 g respectivement pour A₁, B_{w1}, B_{w2.1} et B_{w2.2}. Après séchage (Figure 5), la décroissance pondérale de PP1 à PP10 va d'un maximum de 425,5 g à un minimum de 335,7 g. Le coefficient de corrélation entre les horizons est de 80 % tandis qu'il était de moins de 50 % pour les échantillons humides (Figure 4). Ainsi, après séchage, leur poids moyen devient 373, 381, 369 et 365 respectivement pour A₁, B_{w1}, B_{w2.1} et B_{w2.2}.

Comportements de l'infiltration dans le site

Le temps d'infiltration diffère d'un horizon à l'autre (Figure 6). Il est plus significatif dans l'horizon A₁ avec des grands écarts entre la saison sèche et la saison des pluies pendant lesquelles nous avons observé une augmentation importante de temps d'infiltration en PP1 de 8,2 à 34 minutes soit $\cong 415\%$, en PP2 de 9,3 à 10 minutes soit $\cong 107,5\%$ et en PP3 de 5,7 à 10 minutes soit $\cong 175\%$. Dans l'horizon A₁, l'écart serait dû au glaçage causé par l'impact des gouttes des pluies antérieures qui ont détruit la structure très fragile de ces sols, colmaté les pores et les ont déstabilisés. Le temps

Figure 6| Temps d'infiltration (en minutes) des horizons caractéristiques du Mont-Amba. SS signifie que la mesure a été faite en saison sèche et SP signifie que la mesure a eu lieu en saison des pluies. L'horizon A₁ du PP en SP est exceptionnellement plus perméable que les autres.

d'infiltration diminue avec la profondeur suite à l'augmentation de la macroporosité. En B_{w2.2} il augmente de nouveau à cause de l'humidité préexistante, de microporosité, du tassement et du lessivage des particules fines (limons, argiles, sables fins) qui ont obstrué les pores. En effet, les analyses granulométriques réalisées par WOUTERS [2008] sur les profils du même sol indiquent une augmentation progressive de ces fractions granulométriques qui pouvaient atteindre 2,5 % de limons et 6,5 % d'argile. De plus, les modalités de l'humectation dépendent du comportement des interfaces porosité-matrice qui peuvent, suivant le type de sol, assumer des valeurs diverses [IRIS, 1984].

La vitesse de l'infiltration que met chaque horizon exprime sa perméabilité qui est exprimée par la vitesse de l'eau de gravité [BAVER, 1959]. Selon le temps que l'eau a mis pour s'infiltrer dans un horizon donné, à chaque point de prélèvement, il apparaît que

dans 9 cas sur 10 les vitesses minimums ont varié de 3,5 à 3,6 minutes, et les maximums de 7,8 à 9,9 minutes. En nous référant à la **Figure 4**, selon la classification de SOLTNER [2011] qui distingue les sols en deux groupes de conductivité hydraulique : les sols étudiés sont perméables à très perméables (**Tableau 4**) dont la plus forte perméabilité est située au PP8 avec 3,9 minutes, suivie de PP10 et PP7 avec respectivement 5,0 et 5,1 minutes (**Figure 6**).

Teneur en eau, porosité et durée de l'infiltration dans les horizons

Il est normal que la teneur en eau soit en relation avec la porosité puisque cette dernière a été déduite de la première. La contradiction que peut faire apparaître l'augmentation de la porosité à certaines profondeurs après une diminution progressive de celles-ci (**Tableaux 2-3**) ne peut étonner. Elle relève, à notre avis, de l'hétérogénéité qui caractérise le système des sols où la redistribution des substances lessivées n'est pas uniforme. Il arrive que par endroits les éléments fins migrant en profondeur bouchent certains pores pour augmenter la microporosité au détriment de la macroporosité.

Par ailleurs, le lessivage des fines particules dans les horizons supérieurs peut se traduire par leur accumulation en profondeur. A ce niveau, une partie de pores peut être colmatée par exemple en créant un horizon B mais sans affecter la porosité des horizons sous-jacents.

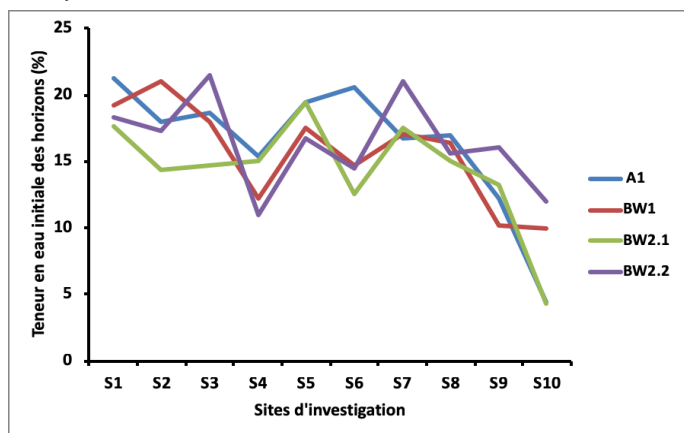


Figure 7 | Évolution de la teneur en eau des horizons.

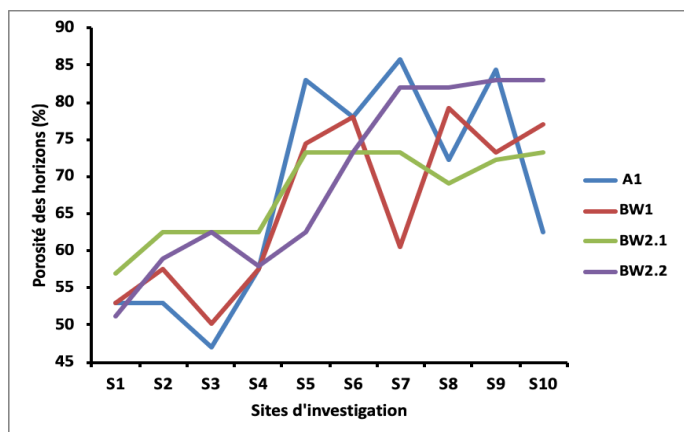


Figure 8 | Évolution de la porosité des horizons.

La teneur en eau (**Tableau 2**) par contre évolue dans le sens contraire ; à 70 % de cas (PP1, PP3, PP4, PP5, PP6, PP8 et PP9), elle baisse avec la profondeur jusqu'en $B_{w2.1}$ (**Figure 7**). Cette baisse est normale et signifie que le front d'humectation est resté suspendu dans les horizons superficiels, notamment A_1 et progresse lentement et différemment selon le profil. En effet, à partir de B_{w1} , on observe une variabilité de comportement de la teneur en eau remarquable qui indique précisément que le front d'humectation n'est ni atteint partout en même temps, ni à la même profondeur sauf dans deux cas où l'augmentation apparaît en $B_{w2.1}$. Dans ces cas, la saturation

est rapide, l'excédent produisant du ruissellement. Il faut atteindre l'horizon $B_{w2.2}$ profond de plus d'1,5 m pour que le taux d'humidité s'homogénéise. Ce phénomène s'explique par la plus ou moins permanence à ces profondeurs, suite à leur non exposition aux évapotranspirations, des re-humectations répétées parce qu'il y a une rupture du phénomène capillaire, sans doute aussi à l'augmentation de la microporosité due à la proportion plus élevée des limons et des argiles (**Tableau 3 ; Figure 8**). Evidemment, c'est connu que la teneur en eau est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol [COULOMB, 1992].

Les faits contraires sont observés par rapport à chaque profil. On constate que la porosité augmente en général avec la profondeur (**Tableau 3 et Figure 8**) de PP2, PP3, PP4, PP8 et PP10 soient cinq cas sur dix ; dans trois cas restant soient PP5, PP6, PP9, la porosité diminue avec la profondeur. Cette augmentation est à attribuer à la cimentation des sables fins et des limons par les oxydes de fer créant ainsi une porosité totale plus grande. Deux cas soient PP1 et PP7 pour lesquels les horizons diffèrent les uns des autres dans leur comportement.

La capacité de rétention n'est pas la même dans tous les horizons du fait des éléments fins qui augmentent la microporosité. Le temps d'infiltration diminue de manière significative avec la profondeur et est en relation avec la teneur en eau (**Figure 7**). Une résistance à l'infiltration est observée dans l'horizon A_1 dans 7 cas sur 10 à cause de son état plus sec qui nécessite son imbibition préalable, au glaçage et à une mince couche d'humus. Ce n'est qu'une fois humectée que le passage devient normal. Cet état serait à l'origine du déclenchement précoce du ruissellement observé dès le début des pluies et qui évolue en une érosion hydrique ravinante tôt ou tard.

Par ailleurs, on observe une augmentation spécifique de la teneur en eau dans l'horizon $B_{w2.2}$ due à une augmentation de la microporosité consécutive à l'accumulation des argiles ainsi qu'à son humidité préexistante car, après la saison sèche les horizons de profondeur dépourvus de racines sont moins sujets à l'évapotranspiration. Ainsi, il est proportionnel à ωP .

Plusieurs hypothèses ont été envisagées. Il s'agirait de l'existence d'une porosité en surface remplie d'air pendant la période de la saison sèche. Ce matelas d'air empêcherait l'eau de pluie de se propager rapidement en profondeur avant d'avoir d'abord évacué l'air, avant de voir le front d'humectation progresser dans le profil (i). Il y aurait une mince couche de matière organique [DE PLOEY, 1977 ; YAIR, 2006], d'environ 1 à 2 mm, généralement visible sur la plupart des profils pédologiques des versants du Mont-Amba et située à plus ou moins 5 cm dans l'horizon A_1 . Elle serait le résultat des microalgues qui se développeraient (ou qui se seraient développées) pendant les saisons humides, puis déshydratée pendant les saisons sèches. Cette couche organique offrirait au début une résistance à l'humectation, caractérise l'hydrophobie bien connue des matières organiques sèches [SOLTNER, 2011]. Ce n'est donc qu'une fois hydrosolubilisée qu'elle laisserait infiltrer l'eau en profondeur (ii). On pense encore à une augmentation de la microporosité avec la profondeur suite au tassement et au colmatage des éléments fins (Argile, oxyhydroxyde, limon, sable très fin) lessivés depuis la surface réduisant ainsi la perméabilité à partir d'une certaine profondeur. La conséquence d'une telle situation est bien connue en dynamique des versants. Les horizons sus-jacents plus perméables que les horizons inférieurs se saturant d'eau deviennent plus fluides, se décolent au contact des zones à micropores, un peu comme dans le glissement des flancs des termitières géantes décrites par ALONI [1975] au Katanga et fluent en masse dès que la pente devient suffisante (iii).

CONCLUSION

L'objectif poursuivi dans cette recherche était de voir à quel niveau du profil pédologique le phénomène « érosion hydrique »

pouvait se déclencher, en suivant le comportement de différents horizons dans les profils des ravins au Mont-Amba. Le critère de choix était basé sur la profondeur, allant de deux mètres à plus, dans lequel le profil est rafraîchi pour rendre visibles les différents horizons qui se distinguent par leur couleur particulièrement. Le mécanisme de déclenchement de l'érosion hydrique est effectivement complexe. Nos observations et mesures indiquent qu'il se passe de manière différente dans chaque profil. Ce différent comportement est dû à plusieurs facteurs notamment : la texture qui contrôle la vitesse d'infiltration, la porosité, la capacité de rétention ou la capacité au champ ; le couvert végétal qui intercepte les pluies, structure les horizons de surface.

Les observations *in situ*, ont montré que près de 70 % des horizons de surface posent le problème d'infiltration dès l'horizon A₁ qui emmagasine une forte teneur en eau qui évolue inversement proportionnel à la profondeur. Cette évolution paraît contraire par rapport à la porosité surtout si l'on tient compte du fait que près de 90 % de ces sols ont une texture sableuse dont le diamètre varie entre 250 à 500 µm. Une telle texture présume une bonne infiltration. Tout est en parfaite relation avec la porosité totale. Cette porosité augmente en majorité avec la profondeur au profit de la macroporosité. Alors qu'en comparant l'allure de chaque profil, on a constaté qu'il y a une grande complexité des paramètres mesurés. De ce fait, la porosité, la teneur en eau et le temps d'infiltration bien que variant spécifiquement dans chaque profil, restent néanmoins interdépendant à des rares exceptions près dans l'horizon A₁. Il en résulte que l'érosion se déclenche à ce niveau du fait du glaçage qui favoriserait le ruissellement hortonien [HORTON, 1945]. Et l'horizon A₁ frappé par le splash est le premier à être emporté par le ruissellement créant ainsi un effet domino sur les autres. Le côté spectaculaire de cette érosion ravinante provient de la grande épaisseur des altérites sableuses qui sont entaillées par le ruissellement concentré [MITI et ALONI, 2005].

Partant de ce qui précède, nous pouvons avancer deux causes du déclenchement de l'érosion pluviale dans l'environnement anthropisé du Mont-Amba. La première est due à la résistance à l'infiltration opposée par l'état sec de l'horizon A₁, par le glaçage et en présence d'une mince couche d'humus. La seconde est due au fait que cette croûte développée par ces sols sableux génère, tant qu'elle n'est pas bien humectée et délayée, des flux hortonien même lors de pluies de faible intensité [POESEN et al., 2003 ; MOEYERSONS et al., 2015]. ESTEVES et al. [2003] ont observé le rôle majeur joué par l'encroûtement sur l'infiltration et la genèse du ruissellement au Sénégal.

RÉSUMÉ

Dans cette étude, il s'agit concrètement de tester expérimentalement *in situ*, à l'aide d'un perméamètre annulaire en tube PVC, de diamètre égal à 7,8 cm soit une section de 48 cm², l'infiltration aux différents horizons du profil (A, B_{w1}, B_{w2}). Ce test devrait aider à comprendre la production généralisée du ruissellement concentré dès le début de la saison des pluies et l'apparition des ravins en milieu péri-urbain ; à l'instar du site du Mont-Amba à Kinshasa. Le test est mené afin d'essayer de déterminer les rôles des facteurs incriminés ; à savoir : la porosité (A, B), la couche humifère (A) et éventuellement à quel niveau le déclenchement de l'érosion ravinante prenait naissance. Le mécanisme de déclenchement de l'érosion hydrique est effectivement complexe. Nos mesures indiquent qu'il se passe de manière différente dans chaque profil. Les observations *in situ*, ont montré que près de 70 % des horizons de surface posent le problème d'infiltration dès l'horizon A₁ qui emmagasine une forte teneur en eau qui évolue inversement proportionnel à la profondeur. Cette évolution paraît contraire par rapport à la porosité surtout si l'on tient compte du fait que près de 90 % de ces sols ont une texture sableuse dont le diamètre varie entre 250 à 500 µm. Une telle texture présume une bonne infiltration. Ainsi, il existe deux causes du déclenchement de l'érosion pluviale dans l'environnement anthropisé du Mont-Amba.

La première est due à la résistance à l'infiltration opposée par l'état sec de l'horizon A₁, par le glaçage et en présence d'une mince couche d'humus. La seconde est due au fait que cette croûte développée par ces sols sableux génère, tant qu'elle n'est pas bien humectée des flux hortonien même lors de pluies de faible intensité.

Mots clés

Kinshasa, splash, sol sableux, porosité du sol, ruissellement hortonien, environnement anthropisé, érosion ravinante

REFERENCES

- ALEXANDRE-PYRE S., [1967]. *Les processus d'aplanissement de piémont dans les régions marginales du plateau des Biano*. Publ. Univ. Officielle du Congo à Elisabethville 16, 3-50.
- ALONI J., [1975]. *Le sol et l'évolution morphologique des termitières géantes du Haut-Katanga*. *Pédologie* 25, 25-39.
- ANDERSON J.M., INGRAM J.S.I., [1996]. *Tropical Soil Biology and Fertility. A handbook of methods. Second edition*. CAB International, 221 p.
- BAERT G., VAN RANST E., NGONGO M.L., KASONGO E.L., VERDODT A., MUJINYA B.B., MUKALAY J.M., [2009]. *Guide des sols en République Démocratique du Congo. Description et données physico-chimiques de profils types*. Gent, Belgique : Université Gent.
- BAVER L.D., [1959]. *Soil physics*. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- BULTOT F., [1971]. *Statistiques des pluies intensives en un point dans une aire du Congo belge et du Ruanda-Urundi*. Bruxelles, B.C.C.V 11, 136p.
- COULOMB C., [1992]. *Étude de la circulation de l'eau dans un sol argileux drainé*. Thèse de doctorat. Paris Sud, 245p.
- DARCY H., [1856]. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris, 647p.
- DE PLOEY J., [1966]. *Application d'un traceur radioactif à l'étude de l'érosion pluviale de terrains sablonneux du Bas-Congo*. *Acta Geographica Lovaniensia* 4, 1-10.
- DE PLOEY J., [1977]. *Some experimental data on slopewash and wind action with reference to quaternary morphogenesis in Belgium*. *Earth Surface Processes and Landforms* 2 (2-3), 101-115.
- DE PLOEY J., ROELS J.F., [1965]. *Étude de l'érosion pluviale de sols sablonneux du Congo occidental au moyen d'un traceur radioactif*. *Centre Trio, Univ. Lovanium, Rapport de rech.* 12, 9-27.
- DE PLOEY J., SAVAT J., [1968]. *Contribution à l'étude de l'érosion par le splash*. *Zeitschrift für Geomorphologie* 12, N.F., 174-193.
- DUCHAUFOUR PH., [1960]. *Précis de Pédologie*. Masson et Cie, Paris, 438p.
- ESTEVES M., LAPETITE J.M., [2003]. *A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger*. *Catena* 50, 255-271.
- FERREIRA C.S.S., FERREIRA A.J.D., PATO R.L., DO CARMO MAGALHAES M., DE OLIVERA COELHO C., SANTOS C., [2012]. *Rainfall-runoff-erosion relationships study for different land uses, in a sub-urban area*. *Zeitschrift für Geomorphologie* 56 (3), 005-020.
- GARCIA-RUIZ J.M., [2010]. *The effects of land uses on soil erosion in Spain. A review*. *Catena* 81(1), 1-11.
- HORTON R.E., [1945]. *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. *Bull. of the Geological Society of America* 56, 275-330.
- IRIS J.M., [1984]. *Modalité de l'infiltration dans un sol à porosité contrastée*. *Adiopodoume, Côte d'Ivoire, Rapport ORSTOM*, 12p.
- LAMBE T.W., WHITMAN, R.V., [1979]. *Soil mechanics, S.I.Version*. John Wiley & Sons, New York, 553p.
- MAKANZU IMWANGANA F., [2010]. *Étude 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., DEWITTE O., NTOMBI M., MOEYERSONS J., [2014]. *Topographic and road control of mega-gullies in Kinshasa (DR. Congo)*. *Geomorphology* 217, 131-139. DOI 10.1016/j.geomorph.2014.04.021

- MAKANZU IMWANGANA F., MOEYERSONS J., VANDECASTEELE I., TREFOIS PH., NTOMBI M., OZER P., [2013]. *Les villes d'Afrique Centrale balafrées par l'érosion ravinante : inventaire cartographique et impact socio-économique à Kinshasa (RDC). Colloque international - Territoires périurbains : développement, enjeux et perspectives dans les pays du Sud. Gembloux - 19 décembre 2013, volume des résumés.*
- MAKANZU IMWANGANA F., OZER P., MOEYERSONS J., [2014]. *Caractéristiques de Pluies et Ravinement dans la ville de Kinshasa de 1961 à 2010.* In OZER A., OZER P. (Eds.) : *La Géographie physique et les Risques naturels.* Université de Liège, 29-30 juin 2014. Livre des résumés, p.23.
- MAKANZU IMWANGANA F., VANDECASTEELE I., OZER P., TREFOIS P., MOEYERSONS J., [2015]. *The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo).* *Catena* 125, 38-49. DOI 10.1016/j.catena.2014.09.019
- MANDAL D., SHARDA V.N., [2013]. *Appraisal of soil erosion risk in the eastern Himalayan region of India for soil conservation planning.* *Land Degrad. Develop.* 24 (5), 430-437. DOI: 10.1002/ldr.1139
- MITI TS.F., ALONI K.J., [2005]. *Les incidences de l'érosion sur le développement socio-économique et l'urbanisation future de Kinshasa.* *Kinshasa, M.E.S* 27, 1-31.
- MITI TS.F., ALONI K.J., KISANGALA M.M., [2004]. *Crise morphogénique d'origine anthropique dans le modelé du relief de Kinshasa.* *Bull. du CRGM* 5 (1), NS, 1-12.
- MOEYERSONS J., [1989]. *La nature de l'érosion des versants au Rwanda.* *Annales des Sciences économiques Musée royal de l'Afrique centrale* 19, 379 p.
- MOEYERSONS J., [1991]. *La recherche géomorphologique au Rwanda.* *Bulletin de la Société géographique de Liège* 27, 49-68.
- 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.
- NADAL-ROMERO E., LANSANTA T., GARCIA-RUIZ J.M., [2013]. *Runoff and sediment yield from land under various uses in a Mediterranean mountain area: long-term results from an experimental station.* *Earth Surface Processes and Landforms* 38 (4), 346-355.
- NIGUSSIE H., ATSUSHI T., POESEN J., MITSURU Tsubo, TSEGAYE M. D., ALMAW FENTA A., NYSSSEN, J., ENYEW A., [2017]. *Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River.* *Science of The Total Environment* 574 (1), 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.019>
- NTOMBI M.K., YINA N., KISANGALA M., MAKANZU IMWANGANA F., [2004]. *Evolution des précipitations supérieures ou égales à 15mm durant la période 1972-2002 à Kinshasa.* *Rev. Congolaise des Sc. Nucl.* 20, 30-40.
- OMBI M.K., PANGU S., MUKUNAYI N., KISANGALA M., NTOMBI M.M., MAKANZU IMWANGANA F., [2009]. *Les ressources en eau et les changements climatiques en cours en République Démocratique du Congo. In Endundo José : Seconde communication nationale à la Convention Cadre sur le Changement Climatique. Ministre de l'Environnement, Conservation de la Nature et Tourisme de la RD.Congo. Kinshasa, novembre 2009. Présentée à la Communauté internationale en réponse au Protocole de KYOTO.*
- NYSSSEN J., POESEN J., MOEYERSONS J., LUYTEN E., VEYRET-PICOT M., DECKERS J., MITIKU HAILE, GOVERS G., [2002]. *Impact of road building on gully erosion risk : a case study from the northern Ethiopian Highlands.* *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 1267-1283.
- PAIN M., [1973]. *Les pentes de Kinshasa.* In *Atlas de Kinshasa : Planche 5.* B.E.A.U/T.P.A.T, IGN-Paris.
- 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.
- POESEN J., NACHTERGAELE J., VERSTRAETEN G., VALENTIN C., [2003]. *Gully erosion and environmental change: importance and research needs.* *Catena* 50, 91-133.
- SOLTNER D., (2011). *Les bases de la production végétale. Le sol et son évolution.* *Collection Sciences et Techniques Agricoles.* 23e Ed., Tome I, 467p.
- TSHIBANGU K.W.T., ENGELS P., MALAISSE F., [1997]. *Evolution du couvert végétal dans la région de Kinshasa (1960-1987) selon une approche cartographique.* *Geo-Eco-Trop.* 21, 95-103.
- VANMAERCKE M., POESEN J., VAN MELE B., DEMUZERE M., BRUYNSEELS A., GOLOSOV V., RODRIGUES B. J., BOLYSOV S., DVINSKI A., FRANKL A., FUSEINA Y., TEIXEIRA G. A.J., HAREGEWEYN N., IONITA I., MAKANZU IMWANGANA F., MOEYERSONS J., MOSHE I., NAZARI SAMANI A., NIACSU L., NYSSSEN J., OTSUKI Y., RADOANE M., RYSIN I., RYZHOV Y.V., YERMOLAEV O., [2016]. *How fast do gully headcuts retreat?* *Earth-Science Reviews* 154, 336-355. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.01.009
- WOUTERS T., [2008]. *Contribution à l'analyse de l'érosion intra-urbaine au sein du bassin versant de la rivière Funa, Kinshasa, République Démocratique du Congo. Mémoire de master, Département de Géographie, Université Libre de Bruxelles,* 98p.
- YAIR A., [2006]. *Runoff generation in a sandy area-the nizzana sands, Western Negev, Israel.* *Earth Surface Processes and Landforms* 15 (7), 597-609.



This work is in open access, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>