

Analyse de l'érosion des sols saturés d'eau à Kinshasa

Muntumosi S. M.^{1*} et J.-P. Mbungu T. J.-P.¹

Paper History

Received:

January 14, 2017

Revised:

March 29, 2017

Accepted:

July 08, 2017

Published:

September 2017

ABSTRACT

Erosion analysis of water-saturated soils in Kinshasa

The present work is a contribution to the study of erosions in urban areas, and more particularly in Kinshasa. We studied the erosion of three types of soil of Kinshasa by analyzing sand deposition fluxes falling from a soil sample completely immersed in a distilled water bath. Suitable sample holders have been designed to contain a certain amount of soil. The bottom of the sample holder consisted of a sieve with square meshes of about 700 μm . The amount of sand collected in the water bath fell from the sample holder by gravity through the sieve meshes. The measurement results obtained for each soil sample include the immersion time in the distilled water bath and the corresponding sand loss defined by the ratio of the mass of the amount of sand deposited during soil immersion in water and the mass of the amount of soil before immersion in water. The results show sand deposition steps when the soil is completely immersed in a distilled water bath. These results are in agreement with the literature on constraints thresholds on soil aggregates to initiate erosion and also on the dispersion and flocculation phenomena in water-saturated soils. This work suggests that erosions control in Kinshasa could either prevent aggregates from water-saturated soils to lose their sand, or prevent them from being saturated with water.

Keywords:

Erosions, soils, dispersion, flocculation, sand deposition fluxes, water-saturated

¹Département de Physique, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, B.P.190 Kinshasa XI, R.D. Congo

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

INTRODUCTION

Nombreuses sont les publications qui traitent des érosions en milieu urbain, plus particulièrement à Kinshasa. Wouters et Wolff [2010] ont utilisé des méthodes de télédétection satellitaire à très haute résolution et de localisation par le GPS différentiel et ont étudié le mécanisme des érosions à Kinshasa. Selon les observations de ces auteurs, les érosions à Kinshasa se manifestent par le mécanisme de ravinement avec une évolution spectaculaire dans l'espace et dans le temps. Le ravinement consiste en une perte progressive des éléments de sol suite aux différents agents bioclimatiques qui constituent l'eau, le vent ou encore certains organismes vivants [WOUTERS et WOLFF, 2010]. En 1970, quelques auteurs dénombrèrent déjà 140 ravins érosifs à Kinshasa [MITI, 2005 ; MITI et ALONI, 2005 ; WOUTERS et WOLFF, 2010 ; KAYEMBE WA KAYEMBE et WOLFF, 2015]. Près de 400 ravins érosifs auraient été comptabilisés en 2007 [KAYEMBE WA KAYEMBE et WOLFF, 2015]. Makanzu et al. [2014], cité par Kayembe wa Kayembe et Wolff [2015], ont dénombré 334 ravins de plus de cinq mètres de largeur sur l'image de WorldView de 2010 de la ville de Kinshasa. Le ravin de Mataba localisé dans la commune de Ngaliema mesurait 1 km de long, 10 mètres de profondeur et 300 m de large [WOUTERS et WOLFF, 2010]. Les auteurs citent quatre causes principales du ravinement à Kinshasa, à savoir le débordement des bassins de rétention, la rupture de collecteurs, les sentiers créés dans le sens de la pente et la rupture de puits perdus. Presque tous les auteurs qui traitent du phénomène des érosions à Kinshasa sont unanimes que la mauvaise gestion de l'espace urbain est le facteur principal du développement des érosions.

Parmi les techniques de lutte contre les érosions à Kinshasa, des auteurs proposent une bonne urbanisation, la construction et l'entretien des collecteurs et de bassins de rétention, l'entretien des puits perdus, l'intervention rapide du pouvoir public pour stopper les ravins actifs, le reboisement utilisant une végétation appropriée, l'utilisation des sacs de sable et des pneus usés pour stopper les

érosions et stabiliser les terrains menacés, la sensibilisation de la population à l'appropriation des espaces publics [MITI, 2005 ; MITI et ALONI, 2005 ; KAYEMBE WA KAYEMBE et WOLFF, 2015].

Selon la littérature citée par Wouters et Wolff [2010], le point de départ du mécanisme de ravinement est l'impact de gouttes de pluies sur un sol nu (splash). Le transfert d'énergie cinétique accumulée par les gouttes de pluie lors de leur chute, peut être suffisant pour former un petit cratère et projeter de petites gouttelettes (mélange d'eau et de particules fines) à des distances pouvant atteindre quelques centimètres. On observe alors des pertes d'éléments de sol par érosion lorsque les gouttelettes projetées sont prises en charge par un écoulement dit de surface. Cet écoulement apparaît lorsque l'eau ne peut s'infiltrer dans le substrat. Les ravins apparaissent ainsi pendant et/ou immédiatement après de fortes pluies.

Les études antérieures réalisées ont permis de comprendre les mécanismes des érosions à Kinshasa. Des moyens considérables sont continuellement engagés pour combattre les érosions spécialement en périodes pluvieuses grâce aux techniques proposées par les auteurs [MITI, 2005 ; MITI et ALONI, 2005 ; KAYEMBE WA KAYEMBE et WOLFF, 2015]. Cependant, les connaissances des érosions à Kinshasa peuvent encore progresser. En effet, des bâtiments se sont écroulés en 2015 et en 2016 dans la ville de Kinshasa alors qu'ils ont été construits en matériaux durables sur des terrains plats. On observe aussi de grandes crevasses sur des terrains plats à travers la ville de Kinshasa. Nous supposons que les grandes crevasses et l'écroulement des bâtiments construits sur des terrains plats pourraient résulter des érosions internes. Les érosions internes ne se font pas en surface, mais dans les profondeurs du sol. Les publications sont nombreuses qui traitent des érosions internes [BENDAHDANE, 2005 ; YAKHLEF et al., 2009 ; HAGHIGHI et al., 2011 ; ZIANI, 2013 ; TRAN et PRIME, 2015 ; DESODT et HORSIN, 2016].

Yakhlef et al. [2009] par exemple se sont intéressés aux conditions d'amorce d'une érosion interne dans un ouvrage réel tel que le barrage en béton armé. Dans leur démarche, les auteurs ont considéré le sol comme un milieu continu composé de trois phases: le squelette, le fluide interstitiel et le solide fluidifié produit par l'érosion. Ils ont considéré l'érosion interne du sol comme un endommagement progressif qui se produit dans les sols non cohésifs sous l'action de l'écoulement d'un fluide. Ils expliquent l'origine des érosions internes par les phénomènes de suffusion et de renard hydraulique. Le phénomène de suffusion résulte d'une redistribution interne des particules fines contenues initialement dans le sol massif. Tandis que le phénomène de renard hydraulique intervient en stade avancé de l'érosion interne. Les auteurs affirment que ce phénomène est associé à un écoulement régressif de départ des particules qui commence à l'aval et se propage à l'amont en provoquant la formation d'une cavité dans le sol.

Nous voudrions étudier les mécanismes des érosions internes à Kinshasa. La méthodologie consiste à déterminer la déperdition des éléments des sols par gravité à travers les espaces poreux inter-particulaires puis à travers les mailles d'un tamis pendant l'immersion d'un échantillon de sol dans l'eau distillée. La volonté de caractériser les érosions est une préoccupation ancienne suscitée par le besoin de maîtriser les cours des voies navigables. Déjà au seizième siècle, Léonard de Vinci proposait des expériences pour décrire les déplacements des particules de sol dans l'eau (Codex Leicester, folio 9v). Des nombreux dispositifs ont été développés par la suite pour étudier le phénomène des érosions. En ce qui concerne des érosions internes, deux types de dispositifs expérimentaux retiennent notre attention, il s'agit des expériences d'érosion de trou et des expériences utilisant un dispositif axial d'érosion.

Les expériences d'érosion de trou consistent à faire circuler un écoulement d'eau dans un trou préformé de l'échantillon de sol avec un suivi instrumenté. Grâce aux paramètres mesurés et estimés (débit, gradient hydraulique, l'évolution du diamètre du trou, etc.), la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion peuvent être dérivés. Les expériences utilisant un appareil axial d'érosion consistent à déterminer la contrainte de cisaillement hydraulique sur l'échantillon de sol fixe de forme cylindrique dans un cylindre creux en mouvement de rotation à une vitesse angulaire constante autour de l'axe commun, un fluide étant placé dans le cylindre pour transmettre les sollicitations tangentielles sur l'échantillon [BENDAHDANE, 2005 ; PHAM, 2008].

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Echantillons de sol et porte-échantillon

Nous avons prélevé trois types de sol dans la ville de Kinshasa. Le premier type de sol (T1) est le sol grisâtre le plus commun à Kinshasa. C'est un sol de surface prélevé à environ 30 cm de profondeur sur le site universitaire de Kinshasa à 10 m de la route au niveau du club des étudiants. Le deuxième type de sol (T2) est un sol jaunâtre prélevé à environ 10 m de profondeur dans la carrière du Centre Neuro-Psycho-pathologique de l'Université de Kinshasa (CNPP). Le sol de la carrière du CNPP est souvent sollicité par des entreprises de travaux publics (l'Intendance Générale de l'Université de Kinshasa, l'Agence Congolaise des Grands Travaux, l'Office des routes, l'Office des Voiries et Drainage) pour réparer des routes, renforcer des digues et lutter contre des érosions. Le troisième type de sol (T3) est un sol argileux blanchâtre prélevé à environ 2 m de profondeur dans une carrière à Nd'jili Brasserie au bord de la rivière Nd'jili. Les populations de Nd'jili Brasserie utilisent l'argile de cette carrière pour construire des cases en terre battue. Les femmes l'utilisent aussi pour fabriquer des bâtons d'argile à croquer. Les coordonnées géographiques des sites de prélèvement sont présentées dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1| Coordonnées géographiques des sites de prélèvement des sols étudiés

Type de sol	Site de prélèvement	Coordonnées géographiques
T1	Université de Kinshasa	S 04° 25.10' 9" E 015° 10.40' 0"
T2	Carrière du CNPP	S 04° 24.33' 8" E 15° 18.27' 7"
T3	Carrière de Nd'jili Brasserie	S 04° 06.45' 9" E 015° 11.01' 23"

Des échantillons de sol T1, T2 et T3, préalablement séchés à la température de 50 °C pendant plus de 24 heures dans un four Régulateur Programmeur N6400, ont été broyés manuellement de manière à ce que les particules passent par gravité à travers les mailles d'un tamis de 700 µm de côté.

Des porte-échantillons cylindriques en verre ont été conçus pour contenir une certaine quantité de sol. La base du porte-échantillon consistait en un tamis métallique avec des mailles carrées d'environ 700 µm de côté (Figure 1).

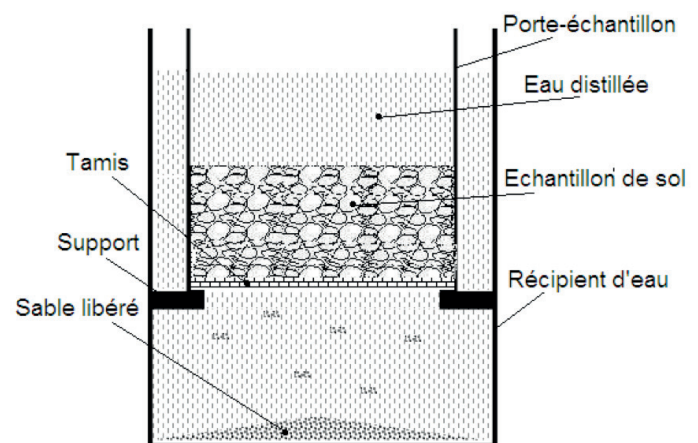


Figure 1| L'échantillon de sol immergé dans un bain d'eau distillée.

Méthode

Après avoir humidifié les mailles du tamis avec de l'eau distillée, nous avons placé un échantillon de 50 g de sol broyé dans le porte-échantillon. Le porte-échantillon a ensuite été introduit lentement dans un bain d'eau distillée jusqu'à ce que l'échantillon de sol soit complètement immergé. L'échantillon de sol est resté complètement immergé dans l'eau pendant un certain temps d'immersion fixé allant de 2 minutes jusqu'à 360 minutes pour l'échantillon de sol T1, et allant de 2 minutes jusqu'à 300 minutes pour les échantillons de sol T2 et T3. A la fin de chaque processus d'immersion de sol dans l'eau, nous avons constaté une quantité de sable recueillie dans le bain d'eau.

Nous avons placé le porte-échantillon dans un four Régulateur Programmeur N6400 à la température de 50°C pendant 24 heures pour sécher la quantité résiduelle de sol. La quantité résiduelle de sol séchée dans le porte-échantillon a alors été pesée afin de déterminer la quantité de sable libérée pendant l'immersion du sol dans l'eau. L'expérience a été répétée pour chaque type de sol à de différents temps d'immersion dans le bain d'eau distillée.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de mesure obtenus pour chaque échantillon de sol comprennent (1) le temps d'immersion dans le bain d'eau distillée

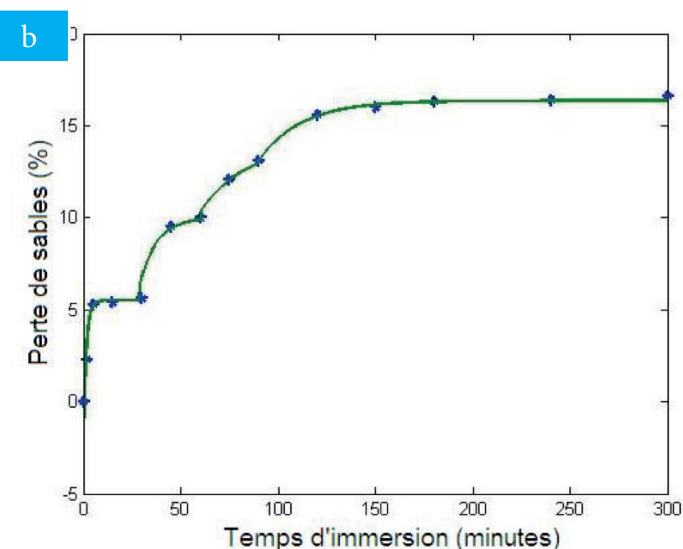
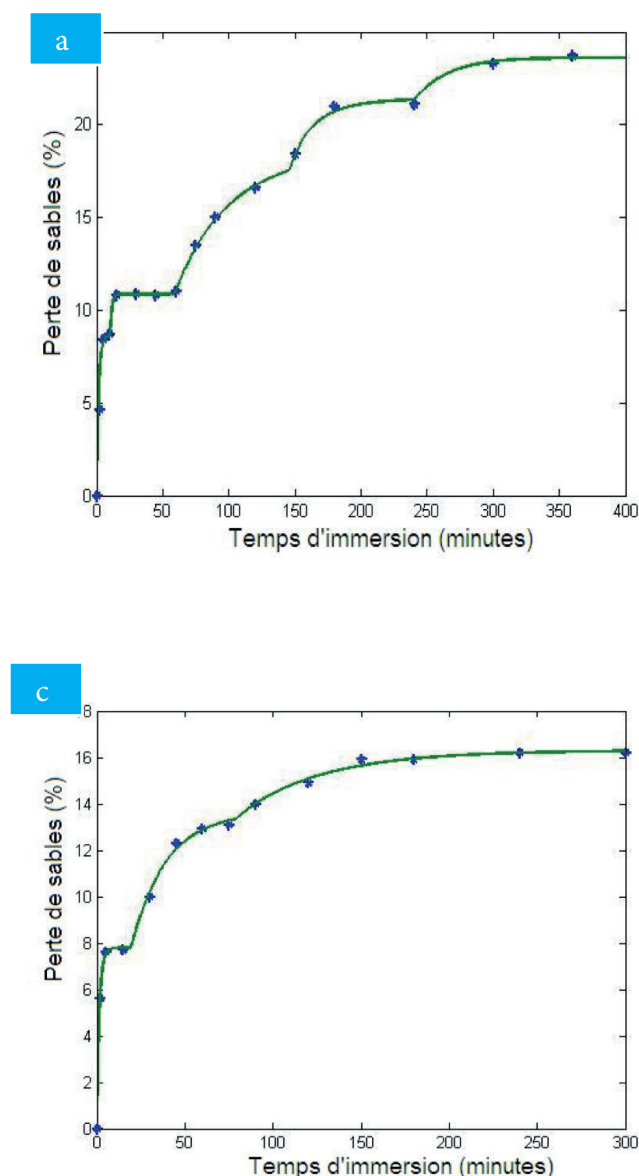
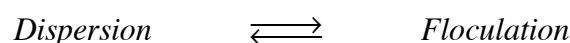
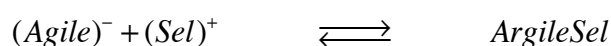


Figure 2 | La perte de sable dans le sol: **(a)** grisâtre T1 en fonction du temps d'immersion dans un bain d'eau distillée; **(b)** rougeâtre T2 en fonction du temps d'immersion dans un bain d'eau distillée; **(c)** blanchâtre T3 en fonction du temps d'immersion dans un bain d'eau distillée.

colloïdes minéraux possèdent sur leur surface une charge négative. Ils se repoussent mutuellement dans l'eau distillée et restent en suspension à l'état dispersé dans tout le liquide. Ce phénomène s'appelle « la dispersion ». Toutefois, en présence des ions positifs d'un acide ou de sels minéraux, les colloïdes sont neutralisés. Ils peuvent alors s'agglutiner et se déposer. Le phénomène s'appelle « la floculation ». La dispersion et la floculation sont deux états réversibles. L'argile floculée peut se disperser à nouveau si elle perd ses ions floculants. Ces propos sont en accord avec les observations de plusieurs auteurs [GOUTTE-LIMA et al., 2006 ; PHAM, 2008 ; HAGHIGHI, 2012 ; EL KORCHI et al., 2015].

Ainsi, la quantité de sable recueillie dans le bain d'eau est une mesure du phénomène de la dispersion dans l'eau distillée. L'équation suivante montre la réversibilité des phénomènes de la dispersion et de la floculation de l'argile naturelle dans l'eau.



Le modèle, en accord avec les résultats, suppose que l'échantillon du sol immergé dans l'eau est composé de différents agrégats d'éléments sableux lesquels agrégats commencent à perdre du sable après un certain temps (temps seuil) d'immersion dans l'eau selon la quantité de colloïdes dans ces agrégats. Nous appliquons en effet la loi classique de dépôt de Krone [1962] pour décrire le flux de sable déposé sur le fond. Selon cette loi, la quantité de sable perdue pendant l'immersion dans l'eau par un élément sableux et déposé sur le fond par unité de temps est proportionnelle à la quantité de sable dans cet élément sableux. Elle est décrite par l'équation suivante :

$$\frac{dq}{dt} = -\mu_0 q$$

$$q = q_0 e^{-\mu_0 t}$$

Soit la quantité de sable dans N éléments sableux d'un certain type présent dans un échantillon de sol, on a :

et (2) la perte de sable correspondante définie par le rapport entre la masse de la quantité de sable libérée pendant l'immersion du sol dans l'eau et la masse de la quantité du sol avant l'immersion dans l'eau. Les **Figures 2a, 2b et 2c** présentent la perte de sable en fonction du temps d'immersion dans un bain d'eau distillée.

Dans les Figures 2a, 2b et 2c, les points représentent les valeurs mesurées, tandis que la ligne solide a été obtenue en ajustant les valeurs mesurées au modèle que nous proposons. Ces résultats montrent des étapes de dépôt de sable lorsque le sol est complètement immergé dans un bain d'eau distillée.

Nous supposons que la quantité de sable recueillie dans le bain d'eau a été libérée pendant l'immersion du sol dans l'eau et qu'elle est tombée du porte-échantillon par gravité à travers les mailles du tamis. Les autres particules du sol se sont probablement agglutinées et ne pouvaient pas passer à travers les mailles du tamis. En effet, Ziani [2011] reporte que les éléments sableux du sol sont enrobés d'une sorte de pâte, sorte de colle, qui les réunit en petits agrégats. Les éléments du sol qui constituent cette pâte sont des « colloïdes du sol ». La forme et la solidité de la structure du sol dépendent de la quantité des colloïdes dans le sol. Parmi les colloïdes du sol, il existe des colloïdes organiques et des colloïdes minéraux. Les colloïdes organiques sont issus de la décomposition des déchets organiques par des microorganismes, tandis que les colloïdes minéraux sont des particules d'argile. Les

$$Q = Nq$$

$$\frac{dQ}{dt} = N \frac{dq}{dt} = -\mu_0 Nq$$

La quantité de sable libérée par les éléments sableux de même type pendant l'immersion dans l'eau distillée est donnée par l'expression :

$$Q(t) = \begin{cases} Nq_0 \{1 - \exp[-N\mu_0(t - t_0)]\} & \text{pour } t \geq t_0 \\ 0 & \text{pour } t < t_0 \end{cases}$$

$$Q(t) = \begin{cases} Nq_0 \{1 - \exp[-\mu_0(t - t_0)]\} & \text{pour } t \geq t_0 \\ 0 & \text{pour } t < t_0 \end{cases}$$

Selon l'idée qu'il y a plusieurs types d'éléments sableux dans l'échantillon, soit M types d'éléments, la quantité de sable perdue par l'échantillon en fonction du temps pendant l'immersion dans l'eau est donnée par l'expression :

$$Q(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M N_i q_{i0} \{1 - \exp[-N_i \mu_{i0}(t - t_{i0})]\} & \text{pour } t \geq t_{i0} \\ 0 & \text{pour } t < t_{i0} \end{cases}$$

$$Q(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M Q_{i0} \{1 - \exp[-\mu_{i0}(t - t_{i0})]\} & \text{pour } t \geq t_{i0} \\ 0 & \text{pour } t < t_{i0} \end{cases}$$

Dans ce modèle, les paramètres de la déperdition de sable correspondant à l'ensemble d'éléments sableux d'un même type sont les taux de déperdition de sable $\mu_i = \mu_{i0} N_i$ et les quantités initiales de sable $Q_{i0} = N_i q_{i0}$, tandis que les temps seuils t_{i0} sont les paramètres de la déperdition de sables correspondant à chaque type d'élément sableux.

L'utilisation des méthodes de régression pour ajuster le modèle aux observations [BEVINGTON, 1969] ont permis la détermination des paramètres de la déperdition de sable Q_{i0} , t_{i0} et

$$\tau_i = 1/\mu_i.$$

Tableau 2| Paramètres de la déperdition de sables relatifs au sol grisâtre le plus commun à Kinshasa

Type d'agrégats	Q_{i0} (%)	τ_{i0}	t_{i0}
Agrégat11	8.6 ± 0.4	1.6 ± 0.08	0
Agrégat12	2.2 ± 0.1	1.13 ± 0.06	10.5 ± 0.5
Agrégat13	7.6 ± 0.4	42 ± 2	59 ± 3
Agrégat14	3.0 ± 0.1	15.5 ± 0.8	146 ± 7
Agrégat15	2.2 ± 0.1	25 ± 1	241 ± 12
% total du sable perdu	24 ± 1		

Tableau 3| Paramètres de la déperdition de sables relatifs au sol jaunâtre de la carrière du CNPP

Types d'agrégats	Q_{i0} (%)	τ_{i0}	t_{i0}
Agrégat21	5.8 ± 0.3	3.6 ± 0.2	0
Agrégat22	4.3 ± 0.2	7.2 ± 0.4	30 ± 2
Agrégat23	3.7 ± 0.2	18.4 ± 0.9	60 ± 3
Agrégat24	2.6 ± 0.1	26 ± 1	89 ± 5
% total du sable perdu	16.4 ± 0.8		

Le programme d'analyse conçu est principalement itératif et

s'appuie sur le modèle mathématique à plusieurs étapes de déperdition de sable. Ce programme commence par donner des valeurs initiales aux paramètres à ajuster (Q_{i0} , τ_i , t_{i0}) et aux pas des incréments associés, et calcule le qui-carré à partir des valeurs mesurées et des valeurs calculées. Il ajuste ensuite tour à tour, par incrémentation positive ou négative, les valeurs des temps seuils t_{i0} à travers cinq itérations successives, et ajuste enfin tour à tour les valeurs des paramètres τ_i à travers une dizaine d'itérations successives. Les valeurs des paramètres linéaires (Q_{i0}) sont déterminées par régression linéaire à chaque étape d'itération. L'exécution du programme est répétée plusieurs fois en réajustant chaque fois les valeurs initiales jusqu'à l'appréciation de la façon dont la courbe calculée approche les points expérimentaux.

Tableau 4| Paramètres de la déperdition de sables relatifs au sol argileux de la carrière de Nd'jili Brasserie

Types d'agrégats	Q_{i0} (%)	τ_{i0}	t_{i0}
Agrégat31	7.8 ± 0.4	1.55 ± 0.08	0
Agrégat32	5.8 ± 0.3	20 ± 1	19 ± 1
Agrégat33	2.7 ± 0.1	50 ± 3	79 ± 4
% total du sable perdu	16.3 ± 0.8		

Les **Tableaux 2, 3 et 4** présentent les valeurs obtenues pour les paramètres de la déperdition de sables correspondant à chaque type de sol. Le seul paramètre caractéristique de déperdition de sables est le temps seuil t_{i0} qui ne dépend pas du nombre d'éléments sableux N_i mais uniquement du type d'élément sableux. Les paramètres τ_i sont des constantes de temps.

En accord avec la description des phénomènes de dispersion et de floculation faite par de nombreux auteurs [ZIANI, 2011 ; PHAM, 2008], nous relierons la perte de sable observée dans les échantillons de sol à un processus d'effondrement hydrique des différents agrégats d'éléments sableux des sols. En effet, les sols de la ville de Kinshasa sont constitués de plusieurs types d'éléments sableux, chacun avec une teneur variable en argile entre 5 et 30 % selon le lieu de prélèvement [VAN CAILLIE, 1989 ; MINISTÈRE DU PLAN, 2004]. Les éléments sableux impliqués dans le phénomène d'effondrement observé, conformément au diagramme du GEPPA (Groupe d'Études des Problèmes de Pédologie Appliquée), sont vraisemblablement des textures de type sableux (sable, sable limoneux, sable argileux), de type limono-sableux (limon léger sableux, limon sableux, limon moyen sableux, limon sablo-argileux, limon argilo-sableux) et de type argilo-sableux (argile sableuse).

L'ordre d'effondrement s'effectue selon l'intensité des forces de cohésion interne dans les agrégats. Les agrégats d'éléments sableux dont les forces de cohésion interne sont les plus faibles s'effondrent les premiers suivis par d'autres agrégats selon l'intensité de leurs forces de cohésion interne. Les temps seuils de la déperdition de sable marquent le début du processus d'effondrement d'un type d'agrégats dans l'échantillon du sol. L'observation des seuils d'érosion est en accord avec Bendahmane [2005] et Pham [2008] qui ont montré que l'érosion se produit si la contrainte exercée sur le sol par un fluide en mouvement dépasse une certaine valeur caractéristique du sol.

Les agrégats qui s'effondrent les premiers (avec t_{i0}) dès l'immersion de l'échantillon du sol dans le bain d'eau distillée sont des agrégats de sable qui contiennent les moins d'argile. Tandis que les éléments sableux qui contiennent les plus d'argile s'effondrent en dernier lieu. Le sol grisâtre T1 de surface à Kinshasa montre 5 types d'éléments sableux. Tandis que le sol argileux de Nd'jili Brasserie et le sol jaunâtre de carrière de CNPP en contiennent respectivement 3 et 4 types d'agrégats d'éléments sableux. Une fois saturé d'eau, le sol grisâtre le plus commun à Kinshasa perd globalement plus de sable (environ 24 % de sa masse) que le sol jaunâtre de la carrière de CNPP ou le sol argileux de Nd'jili Brasserie

qui perdent environ 16 % de sable chacun. Ceci pourrait signifier que le sol de surface est plus érosifs que les sols de carrière T2 et T3.

La présence des plateaux dans les Figures 2a, 2b et 2c s'explique par le fait que les différents agrégats du sol contiennent une quantité limitée de matière qui tombe à travers le tamis pendant le temps d'observation ; elle s'explique également par le fait que la quantité de sol dans l'échantillon étudié est limitée.

CONCLUSION

Les différents auteurs qui ont étudié le phénomène d'érosions à Kinshasa [MITI, 2005 ; MITI et ALONI, 2005 ; WOUTERS et WOLFF, 2010 ; KAYEMBE WA KAYEMBE et WOLFF, 2015] considèrent que ces érosions résultent des pertes et de l'entraînement des éléments de sol par des écoulements d'eau. L'érosion des terrains sableux nus de Kinshasa est très importante même quand la pente est faible [VAN CAILLIE, 1989].

Nous avons observé une perte progressive de sable dans les échantillons de sol prélevés à Kinshasa lorsqu'ils sont saturés d'eau. La perte de sable observée a été reliée à un processus d'effondrement hydrique des différents agrégats d'éléments sableux des sols. Nos observations suggèrent que le sol de Kinshasa est constitué de plusieurs types d'éléments sableux qui, lorsqu'ils sont imbibés d'eau, perdent progressivement du sable à partir d'un certain temps d'imbibition selon la teneur en argile.

Le sable libéré par les sols de terrains en pente saturés d'eau est entraîné par les eaux de ruissellement. On observe en effet une accumulation des sables dans les bas fonds pendant et/ou après les pluies à Kinshasa. Cet écoulement des sables et des eaux de ruissellement emporte d'autres éléments de sol amplifiant ainsi le phénomène de ravinement en surface. Le phénomène de ravinement peut s'effectuer pendant un laps de temps relativement court emportant des grands volumes de matériaux solides pendant et/ou après une forte pluie.

Le sable libéré peut aussi être entraîné par les eaux d'infiltration et créer une érosion interne en emportant des éléments de sol en profondeur. Ainsi les sols de terrains plats saturés d'eau peuvent manifester des crevasses qui résultent d'une érosion interne. Les érosions internes peuvent se manifester aussi sur des terrains en pente. Les infrastructures construites à Kinshasa, et plus particulièrement sur des sols de surface, peuvent progressivement s'enfoncer ou s'écrouler lorsqu'ils sont régulièrement saturés d'eau.

La lutte contre les érosions à Kinshasa pourrait consister soit à empêcher les agrégats des sols saturés d'eau de perdre leur sable, soit à les empêcher d'être saturés d'eau. L'utilisation des sacs de sable dans la lutte antiérosive est en accord avec cette proposition. Les sacs de sable empêchent les agrégats des sols saturés d'eau de perdre leur sable. Une technique innovante de lutte antiérosive à Kinshasa consisterait à empêcher les agrégats des sols d'être saturés d'eau. Ces résultats sur les mécanismes des érosions internes à Kinshasa peuvent servir dans d'autres domaines de l'organisation civile, tels que l'élaboration de nouvelles techniques de lutte contre les érosions, la construction des routes, des digues, des barrages et des bâtiments, etc. [AYADATIÉ et al., 1998 ; AZZOUZ, 2006 ; SZYMKIEWICZ, 2011 ; SEGUIU, 2011].

RÉSUMÉ

Le présent travail est une contribution à l'étude des érosions en milieu urbain, et plus particulièrement à Kinshasa. Nous avons étudié l'érosion de trois types de sol de Kinshasa en analysant le flux de dépôt de sable tombé d'un échantillon de sol complètement immergé dans un bain d'eau distillée. Des porte-échantillons appropriés ont été conçus pour contenir une certaine quantité de sol. La base du porte-échantillon consistait en un tamis avec des mailles carrées d'environ 700 µm. La quantité de sable recueillie dans le bain d'eau est tombée du porte-échantillon par gravité à

travers les mailles du tamis. Les résultats de mesure obtenus pour chaque échantillon de sol comprennent le temps d'immersion dans le bain d'eau distillée, et la perte de sable correspondante définie par le rapport entre la masse de la quantité de sable déposée pendant l'immersion du sol dans l'eau et la masse de la quantité de sol avant l'immersion dans l'eau. Les résultats montrent des étapes de dépôt de sable lorsque le sol est complètement immergé dans un bain d'eau distillée. Ces résultats sont en accord avec la littérature à propos des contraintes nécessaires sur les agrégats de sol pour initier une érosion et aussi à propos des phénomènes de dispersion et de floculation dans des sols saturés d'eau. Le présent travail suggère que la lutte contre les érosions à Kinshasa pourrait consister soit à empêcher les agrégats des sols saturés d'eau de perdre leur sable, soit à les empêcher d'être saturés d'eau.

Mots clés : érosions, sols saturés d'eau, dispersion, floculation, flux de dépôt de sable.

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à la Commission Universitaire pour le développement et la Commission Interuniversitaire de la francophonie (CUD/CIUF) à travers le projet Kin04 sur la relève académique en physique à l'Université de Kinshasa (UNIKIN) pour une bourse d'études et l'amélioration du cadre de travail.

REFERENCE ET NOTES

- AYADATIÉ T., DAHILI M.K., AHMED M.H. [1998]. Traitement d'un sol effondrable par un liant hydrocarboné (bitume). *Revue Française de Géotechnique* N° 85, 4ème Trimestre, Paris
- AZZOUZ F. Z. [2006]. Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflante de la région de Tlemcem. Mémoire de Magister. Université Abou Bekr Belkaid, Algérie
- BENDAHMANE F. [2005]. Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne. Thèse de Doctorat. Sciences de l'ingénieur (Physics). Université de Nantes, France.
- BEVINGTON P.R. [1969]. Data reduction and error analysis for the physical sciences. McGraw-Hill, Inc.,
- DESODT C. et HORSIN M. H. [2016]. Phénomène de boulangerie et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages. CNS CACHAN, Université Paris-Saclay.
- EL KORCHI F.Z., JAMIN F., EL YOUSOUFI M.S. [2015]. Processus d'effondrement d'origine hydrique dans les milieux granulaires. 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai.
- GOUTTE-LIMA M., CAMAPUM DE CARVALHO J., MAREDO SANTOS R.M. [2006]. Méthodologie pour l'étude de l'érosion interne sur les sols tropicaux. *AUGC*, pp1-8.
- HAGHIGHI I., MARTIN T., REIFFSTECK P., DUC M. and CHEVALIER C. [2012]. An "Enhanced Crumb Test" for better characterizing water effect on soils *ICSE6 Paris*, pp. 1049 - 1056
- HAGHIGHI I. [2012]. Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques. Thèse de Doctorat. Autre. Université de Paris-Est, France.
- KAYEMBE WA KAYEMBE M. et WOLFF E. [2015]. Contribution de l'approche géographique à l'étude des facteurs humains de l'érosion ravinante intra-urbaine à Kinshasa. *Geo-Eco-Trop.*, 39(1):119-138
- KRONE R. B. [1962]. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes, Final report. *University of California, Berkeley*, 16, 21.
- LACHOUETTE D., BONELLI S., BRIVOIS O. [2007]. Modélisation de l'érosion par renard hydraulique *AUGC. XXV Rencontres Universitaires de Génie Civil, May, Bordeaux, France*. 8 p.
- MINISTÈRE DU PLAN [2004]. Unité de Pilotage du Processus d'Elaboration et de Mise en œuvre de la Stratégie pour la Réduction de la Pauvreté (UPPE-SRP), Comité Provincial de la Stratégie pour la Réduction de la Pauvreté Ville-Province de Kinshasa (CP-VPK) (n°0001/UPPE-SRP/CP-VPK/COORDO/MML/et./2004). Monographie de la ville de Kinshasa.
- MITI T.F. [2005]. La perception du phénomène « érosion » par la population

du quartier Révolution dans la commune de Kisenso. Mouvement et enjeux sociaux. *Revue de la chaire de dynamique sociale, Kinshasa*, 27 : 40-68

MITI T.F. et ALONI K.J. [2005]. Les incidences de l'érosion sur le développement socio-économiques et l'urbanisation future de Kinshasa. Mouvement et enjeux sociaux. *Revue de la chaire de dynamique sociale, Kinshasa*, 27 : 15-28

PHAM T. L. [2008]. EROSION et DISPERSION DES SOLS ARGILEUX PAR UN FLUIDE. THÈSE DE DOCTORAT. ENGINEERING SCIENCES [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, France.

SEGUIU P. [2011]. Elaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.

SCHOLTES L. [2008]. Modélisation micromécanique des milieux granulaires partiellement saturés. Thèse de Doctorat. Sciences de l'ingénieur (physics). Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008. France.

TRAN D.K., PRIME N., FROHO F., CALLARI C., VINCENS E. [2015]. Modélisation des renards Hydrauliques : vers une approche discrète couplée. 22ème Congrès Français de Mécanique. Lyon, 24 au 28 Août .

VAN CAILLIE X.D. [1989]. Erodabilité des terrains sableux du Zaïre et contrôle de l'érosion. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 25(1-2) : 197-208

WOUTERS T., WOLFF E. [2010]. Contribution à l'analyse de l'érosion intra-urbaine à Kinshasa (R.D.C.). *Belgeo* (En ligne), 3 | 2010, mis en ligne le 15 décembre 2012, consulté le 30 septembre 2016. URL : <http://belgeo.revues.org/6477> ; DOI : 10.4000/belgeo.6477

YAKHLEF F., JABBOURI A., KHAMLICH A., BEZZAZI M., DUBUJET PH., PARRON VERRA M., RUBIO CINTAS M.D., OLEGARIO C.L. [2009]. Modélisation de l'érosion interne et de l'initiation du renard hydraulique dans un barrage. 19ème Congrès Français de Mécanique. Marseille, 24-28 août .

ZIANI H. [2011]. Étude de l'influence du gradient hydraulique sur l'affaissement de la structure des sols à effondrement brusque en utilisant la méthode double consolidation. Mémoire de Magister. Département de Génie Civil, Université Hadj Lakhdar –Batna, Algérie.



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/>