

Faculté des bioingénieurs

Les ouvrages de lutte antiérosive dans l'aire contributive d'un ravin de Kinshasa

Caractérisation et évaluation de l'efficacité

Auteur : Pierre Seeger

Promoteur(s) : Professeur Charles Bielders (UCLouvain/ELI/ELIE)

Doctorant Eric Lutete (UNIKIN)

Lecteur(s) : Matthias Vanmaercke (ULiege)

Mathieu Javaux (UCLouvain/ELIE)

Année académique 2021-2022

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier mon promoteur, le professeur Charles Bielders, pour la patience, la disponibilité et la pédagogie dont il a fait preuve à mon égard. Ensuite j'aimerais remercier les autres membres de la team encadrante : le professeur Fils Makanzu et le professeur Matthias Vanmaercke. Ensuite, je voudrais adresser un remerciement particulier au doctorant Eric Lutete pour son encadrement à Kinshasa et son accompagnement essentiel durant chaque étape du mémoire.

Merci également à l'ensemble des Pères Jésuites de l'Université de la Loyola du Congo pour leur accueil et leurs conseils avisés. Je regrette nos discussions animées autour d'un verre. Si le séjour fut une réussite c'est en grand partie grâce à eux. Je sais que d'un œil discret ils ont veillé sur moi durant toute la durée de mon séjour.

Merci à tous les étudiants qui m'ont accompagné sur place : Marthe, Judith, Patrick et bien sûr Juvénal, sans l'aide de qui aucune expérience n'aurait pu être menée à bien. Je les remercie également de m'avoir accueilli au sein de leur cercle d'amis, de m'avoir fait découvrir la beauté de leur pays et de m'avoir initié à leur culture. Grâce à eux, ce séjour fut une découverte et une expérience personnelle formidables.

Merci à Emmanuel Heuse pour ses précieux conseils d'avant-départ et pour avoir su éveillé ma curiosité. Je le remercie également d'avoir pris des contacts sur place et de m'avoir averti, la veille de mon départ, des troubles qui régnaient dans le quartier où j'allais séjourner.

Merci à l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur (ARES) de m'avoir octroyé une bourse qui m'a permis de financer partiellement mon séjour.

Merci à Ethel Claeysens pour son aide pour la mise en page de ce travail.

Finalement, merci à ma famille pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce projet. Merci à mon papa, Yves Seeger, pour sa relecture attentive et son aide précieuse durant toute la rédaction de ce mémoire.

Table des matières

1. INTRODUCTION	- 1 -
2. ÉTAT DE L'ART	- 3 -
2.1 EROSION ET RAVINEMENT	- 3 -
2.1.1 Définitions	- 3 -
2.1.2 Les différents types de ravins	- 6 -
2.1.3 Répartition mondiale.....	- 10 -
2.2. PROBLEMATIQUE DU RAVINEMENT EN MILIEU URBAIN	- 12 -
2.2.1. Conséquences et enjeux	- 12 -
2.2.2. Causes	- 13 -
2.2.3. Méthodes de lutte	- 16 -
2.3. KINSHASA	- 21 -
2.3.1. Localisation	- 21 -
2.3.2. Climat	- 22 -
2.3.3. Topographie	- 25 -
2.3.4. Géologie et hydrogéologie	- 25 -
2.3.5. Pédologie.....	- 27 -
2.3.6. Situation socio-économique	- 28 -
2.3.7. Ravinement à Kinshasa	- 29 -
3. MATERIEL ET METHODES	- 32 -
3.1. SITE ETUDIE.....	- 32 -
3.2. RECENSEMENT ET CARACTERISATION DES DIFFERENTS OUVRAGES ANTIEROSIFS PRESENTS DANS L' AIRE CONTRIBUTIVE..	- 34 -
3.3. TYPES DE SURFACES PRESENTES SUR LE SITE	- 34 -
3.4. MESURES D'INFILTRATION.....	- 35 -
3.4.1. Infiltromètre double anneau	- 35 -
3.4.2. Méthode	- 35 -
3.4.3. Capacité d'infiltration des surfaces	- 36 -
3.4.4. Capacité d'infiltration des ouvrages.....	- 39 -
3.5. INTERVIEWS « MICRO-TROTTOIR ».....	- 39 -
3.5.1. Modélisation des courants d'eau de surface.....	- 40 -
4. RÉSULTATS	- 43 -
4.1. RECENSEMENT ET CARACTÉRISATION DES OUVRAGES DE LUTTE ANTIÉROSIVE PRÉSENTS DANS L' AIRE CONTRIBUTIVE	- 43 -
4.2. CAPACITÉ DE RÉTENTION TOTALE ACTUELLE ET POTENTIELLE MAXIMUM	- 48 -
4.3. INFILTRATION DES SURFACES.....	- 51 -
4.4. INFILTRATION DES OUVRAGES DE LUTTE ANTIÉROSIVE.....	- 54 -
4.5. MICRO-TROTTOIR.....	- 57 -
4.6. MODÈLE SWMM	- 58 -
5 DISCUSSION	- 60 -
5.1. OUVRAGES.....	- 60 -
5.2. SURFACES.....	- 62 -
5.3. URBANISATION	- 63 -
5.4. INFILTRATION DES OUVRAGES DE LUTTE ANTIÉROSIVE.....	- 64 -
5.5. MICRO-TROTTOIR.....	- 64 -
5.6. CADRE DE TRAVAIL.....	- 65 -
5.6.1. Ravin étudié.....	- 65 -

5.6.2.	Tests d'infiltrométrie	- 65 -
5.7.	REMBLAYAGE	- 67 -
5.8.	MODÈLE SWMM	- 67 -
6.	CONCLUSION	- 70 -
7.	BIBLIOGRAPHIE	- 72 -

Liste des figures

1. Les différents stades de développement d'un ravin à flanc de colline	P.5
2. Progression régressive de la tête du ravin	P.6
3. Classification des ravins selon leur forme	P.7
4. Classification des ravins selon leur positionnement par rapport aux infrastructures urbaines	P.8
5. Classification des ravins selon leur morphologie interne	P.9
6. Carte mondiale de la vulnérabilité à l'érosion hydrique	P.11
7. Localisation des études avec l'érosion comme sujet principal	P.11
8. Relation entre la pente de la surface du sol au niveau de la tête du ravin et l'aire de la zone contributive	P.14
9. Bassin de rétention captant l'eau s'écoulant sur l'allée adjacente	P.17
10. Mur de sac de sable situé dans un canal d'écoulement de l'eau de ruissellement	P.17
11. Cours d'eau rempli de déchets à Kinshasa	P.19
12. Localisation de la province de Kinshasa	P.21
13. Carte du relief de Kinshasa	P.22
14. Diagramme ombrothermique de Kinshasa	P.23
15. Précipitations mensuelles moyennes à Kinshasa	P.24
16. Nombre de jours de pluie mensuel moyen à Kinshasa	P.24
17. Relief de Kinshasa	P.25
18. Carte géologique de Kinshasa	P.26
19. Profondeur des nappes phréatiques par rapport au niveau du sol	P.26
20. Limite géomorphologique pour le ravinement autour du monde, relation entre la pente de la surface du sol au niveau de la tête du ravin et l'aire de la zone contributive	P.30
21. Localisation de la ville de Kinshasa en RDC, du ravin des 7 km à Kinshasa et de la tête du ravin des 7 km, de son aire contributive, de l'Université Loyola du Congo et du lieu de logement	P.32
22. Site du ravin des 7 km en 2002, 2010, 2011, 2013, 2017 et 2021	P.33
23. Infiltromètre à double anneau utilisé	P.35
24. Temps d'infiltration pour 1,5 cm d'infiltration en fonction de la hauteur d'eau cumulée infiltrée pour la surface herbacée peu perturbée n°7	P.37
25. Corrélation entre le taux d'infiltration final à niveau constant et le taux d'infiltration moyen à niveau variable	P.38
26. Taux d'infiltration en fonction du temps cumulé d'infiltration à niveau d'eau constant et variable pour la surface cours n°4	P.38
27. Subdivision de l'aire contributive en sous-unités	P.42
28. Partie ouest de l'aire contributive comme représentée dans SWMM avec présence d'ouvrages de rétention	P.42
29. Bassin de rétention	P.43
30. Proportion des différents volumes de rétention des bassins présents dans	P.44

l'aire contributive du ravin des 7 km	
31. Proportion des bassins de rétention présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km en fonction de leur état	P.44
32. Localisation des ouvrages de lutte antiérosive présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km	P.45
33. Mur de sacs de sable	P.46
34. Proportion des différents états généraux des murs de sacs de sable présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km	P.46
35. Cuve	P.47
36. Mur de terre, revêtement en sacs de sable et barrage	P.48
37. Corrélation entre le rapport surface/profondeur et la surface pour les bassins en excellent état d'entretien	P.49
38. Différence entre le volume réel et potentiel maximum pour les bassins en mauvais état d'entretien	P.50
39. Capacité de stockage réel et potentiel des bassins pour chaque niveau d'état général.	P.50
40. Différents types de surfaces identifiés dans l'aire contributive	P.51
41. Proportion des différents types de surfaces présents dans l'aire contributive	P.52
42. Localisation des mesures d'infiltration des surfaces dans l'aire contributive	P.53
43. Taux d'infiltration à l'échelle logarithmique en fonction du type de surface	P.54
44. Ouvrages dont le taux d'infiltration fut calculé : bassin recouvert de déchets, bassin ensablé, mur de sacs de sable et bassin bien entretenu	P.55
45. Localisation des mesures d'infiltration des ouvrages antiérosifs dans l'aire contributive	P.56
46. Taux d'infiltration à l'échelle logarithmique en fonction du type d'infrastructure	P.57
47. Evolution du débit qui se déverse dans la tête du ravin au cours du temps (pluviométrie 1) avec et sans ouvrage de lutte antiérosive	P.58
48. Evolution du débit qui se déverse dans la tête du ravin au cours du temps (pluviométrie 2) avec et sans ouvrage de lutte antiérosive	P.58
49. Pourcentage du volume d'eau retenue par les ouvrages de rétention par rapport à la quantité d'eau ruisselée durant des pluies de différentes périodes de retour	P.61
50. Volume de rétention minimum au sein de la parcelle pour retenir toute l'eau de ruissellement en fonction de la période de retour de l'évènement pluvieux considéré	P.61
51. Evolution du pourcentage de réduction du volume total d'eau qui ruisselle à la tête du ravin par l'action des ouvrages de rétention	P. 67
52. Evolution du pourcentage de réduction du débit maximal à la tête du ravin par l'action des ouvrages de rétention	P.68

Liste des tableaux

- | | |
|--|------|
| 1. Classification des ravins selon leur profondeur et leur surface de drainage | P.7 |
| 2. Caractéristiques des méga ravins à Kinshasa en 2007 | P.29 |

1. INTRODUCTION

Le ravinement est une forme d'érosion hydrique qui se traduit par de larges dépressions à la surface du sol. Il entraîne de grandes pertes en sol et modifie le paysage. Ce phénomène peut être observé dans des zones rurales ou urbaines. Le ravinement en zone urbaine s'est accru durant les dernières décennies jusqu'à devenir un problème mondial (Imwangana et al., 2015). Les causes sont naturelles (précipitations d'intensité et d'occurrence élevées, propriétés du sol et topographie) mais aussi anthropiques. En effet, certaines activités humaines telles que la déforestation, l'urbanisation ou certaines pratiques agricoles peuvent accentuer voire même constituer des éléments déclencheurs de ce processus (Poesen et al., 2003).

En Afrique, la plupart des cas étudiés proviennent de la ceinture ouest africaine et de la partie sud-africaine. Mais de nombreuses villes telles que Kinshasa sont aussi fortement affectées par le processus de ravinement, faisant du ravinement un problème majeur dans toute la ceinture centre-africaine (Imwangana et al., 2015). A Kinshasa, 308 méga-ravins d'une longueur totale de 94 km furent inventoriés en 2007. Ces méga-ravins emportant tout sur leur passage, ils engendrent d'importants dommages matériels mais surtout de nombreuses pertes en vies humaines. L'ampleur du problème est telle que les dégâts causés aux infrastructures urbaines coûtent chaque année plusieurs millions d'euros (Makanzu Imwangana et al., 2014). Certains méga-ravins peuvent atteindre d'immenses proportions comme par exemple le ravin de Mataba qui s'étend sur 1 km de long avec une profondeur de 10 m et une largeur de 300m (Wouters and Wolff, 2010). Une texture très sableuse du sol, des pluies de forte intensité réparties sur une courte période de l'année ainsi qu'un relief vallonné sont les causes naturelles du ravinement à Kinshasa. En plus de celles-ci, il faut prendre en compte les causes anthropiques telles qu'une urbanisation chaotique, en l'absence d'infrastructures adéquates de contrôle du ruissellement (Geyik, 1986).

Il existe plusieurs méthodes de contrôle de ce phénomène. Elles se divisent en deux catégories : les méthodes de stabilisation et les méthodes d'atténuation (Geyik, 1986). Une des méthodes d'atténuation très répandue à Kinshasa consiste en la mise en place de petits ouvrages de lutte antiérosive dans l'aire contributive du ravin afin d'y limiter le ruissellement. Cependant, certaines études estiment que 50 % des ravins continuent de croître même après l'implantation d'ouvrages de ce type. Actuellement, nous manquons de clarté sur l'efficacité de ces ouvrages (Lutete Landu et al., 2021).

Ce mémoire tente donc d'éclaircir l'impact de ces ouvrages de lutte antiérosive sur la progression d'un ravin. Il s'inscrit dans le cadre du doctorat de Monsieur Eric Lutete qui s'intéresse au phénomène de ravinement à Kinshasa. L'objectif principal de ce mémoire consiste en une évaluation de l'effet antiérosif des infrastructures de lutte présentes au sein

de l'aire contributive d'un ravin caractéristique de Kinshasa. Pour cela, une série de mesures d'infiltration ont été réalisées sur le terrain afin de réaliser une modélisation du ruissellement dans l'aire contributive avec et sans les ouvrages de lutte. Un objectif secondaire vise, via un micro-trottoir, à évaluer l'impact des ravins sur la vie des Kinois ainsi que la perception qu'il ont de ce phénomène.

Ce mémoire est divisé en cinq parties. L'état de l'art qui vise à faire un état des lieux de la connaissance dans le domaine et décrit la situation à Kinshasa. La deuxième partie énonce la méthodologie réalisée et le matériel employé. La troisième partie présente les résultats obtenus. La discussion vise à commenter, interpréter et critiquer les résultats et la méthodologie. La conclusion tente de répondre au mieux aux objectifs posés et propose des perspectives pour d'éventuels projets futurs.

2. ÉTAT DE L'ART

2.1 EROSION ET RAVINEMENT

2.1.1 DEFINITIONS

Erosion

L'érosion se définit comme le processus d'altération de la surface du sol et de modification du relief impliquant successivement le détachement et le transport de particules (Morgan, 2005) sous l'action de l'eau (érosion hydrique), du vent (érosion éolienne), du travail du sol (érosion aratoire), de la gravité (glissement de terrain), ...

Dans le cas de l'érosion hydrique, les particules de sol sont arrachées et puis transportées vers l'aval sous l'action de l'eau. La zone de dépôt de ces particules varie en fonction des conditions et peut parfois être très éloignée du point de départ. Lors de l'érosion diffuse, le détachement des particules est principalement assuré par le rejaillissement (effet « splash »). Ce phénomène décrit l'impact des gouttes d'eau sur le sol. Il est principalement dû à l'énergie cinétique contenue dans la goutte lors de l'impact sur le sol. Lorsque l'écoulement de l'eau est suffisamment concentré, c'est la force de cisaillement exercée par l'eau sur le sol qui peut devenir le principal agent de détachement. Ce processus est à l'origine de la formation de rigoles ou de ravines (érosion concentrée).. Le rejaillissement assure aussi une fonction de déplacement des particules par projection de celles-ci sur de courtes distances lors de l'impact. Le déplacement sur de plus longues distances est assuré par l'eau de ruissellement. Lorsque l'eau ne possède plus assez d'énergie pour transporter les particules, une troisième phase, appelée déposition, se produit (Morgan, 2005). L'érosion hydrique peut prendre plusieurs formes. Elle peut être diffuse, concentrée ou en galerie. L'érosion diffuse est définie comme un décapage uniforme du sol sous l'action du rejaillissement et du ruissellement en nappe. Le rejaillissement détache des particules de sol tandis que le ruissellement en nappe assure le transport de particules arrachées, pour autant qu'elles soient suffisamment légères. Dans ce cas, la lame d'eau étant peu épaisse, l'eau n'a pas assez d'énergie pour arracher des particules ou pour transporter des particules lourdes. L'érosion non-uniforme concentrée désigne l'érosion en rigoles et en ravines. Lorsque les caractéristiques topographiques du milieu mènent à une concentration du ruissellement, la force de cisaillement exercée par l'eau sur le sol est suffisamment forte pour en arracher des particules et l'eau contient suffisamment d'énergie pour les transporter sur de longues distances, menant à la formation de rigoles ou de ravines. La distinction entre rigoles et ravines tient à la taille de leur section, supérieure (ravines) ou inférieure (rigoles) à 929cm^2 (Poesen et al., 2003), et à l'ampleur des opérations nécessaires pour les effacer. Les mégaravines désignent des ravines de section et de longueur très importantes.

La dernière forme d'érosion hydrique est l'érosion en galerie. Elle résulte de l'écoulement d'eau souterraine menant à la formation de galerie à faible profondeur sous le sol (Morgan, 2005).

Ravins

Les ravins sont de profondes dépressions à forte pente et à flancs abrupts, généralement à flanc de colline, causées par un torrent éphémère (R.P.C. Morgan, (Kirkby and Bracken, 2009). Poesen et al., (2003) distinguent les ravins dits permanents (ou classiques, Thwaites et al., 2022a) des ravins éphémères. Les ravins permanents y sont définis, d'un point de vue agronomique, comme des canaux trop profonds pour être effacés par des outils usuels de travail du sol. Ils nécessitent donc un remblai par un matériau externe pour être effacés. A l'inverse, les ravins éphémères peuvent disparaître sous l'effet d'un labour normal. Les ravins sont presque toujours associés à une érosion accélérée et, dès lors, une instabilité du terrain (Morgan, 2005).

Ravinement

Poesen et al. (2003) définissent le ravinement comme le processus d'érosion par lequel l'eau s'accumule dans une dépression du sol et, sur une période courte, y arrache et transporte une quantité élevée de particules. Ce processus mène à une expansion séquentielle de la dépression.

Le phénomène débute généralement lorsque l'intensité d'eau de pluie sur l'aire contributive excède la capacité d'infiltration de son sol (Kirkby and Bracken, 2009) générant des eaux de ruissellement à flanc de colline (**figure 1**). Ce ruissellement peut former un flux concentré qui possède assez d'énergie pour détacher et transporter une quantité élevée de particules du sol. S'il rencontre une faible dépression à flanc de colline, résultant d'une fragilité (plus grande érodibilité) locale, l'eau s'y déverse et forme un début de canal. Ce processus d'initiation d'un ravin est appelé incision. L'érosion est concentrée à la tête de la dépression, où la pente quasi-verticale entraîne un écoulement supercritique. La tête du ravin caractérise la zone la plus en amont du ravin qui reçoit les eaux de ruissellement de la zone contributive, dont elle est, par conséquent, l'exutoire. La plupart des particules sont arrachées à la base de la tête menant à un effondrement du sol. La tête du ravin progresse donc vers l'amont de la colline ; cette progression est dite régressive (Morgan, 2005). Il est à noter que la progression de la tête du ravin ne peut avoir lieu que si la pente de celle-ci est suffisamment abrupte et si le débit de ruissellement est suffisant (cela dépend de la taille de l'aire contributive). (Kirkby and Bracken, 2009). L'érosion est aussi constatée en aval par érosion et effondrement des berges.

Le détachement de particules de sol provoqué par l'eau de ruissellement est directement proportionnel à la force, appelée contrainte de cisaillement, exercée par l'eau sur le sol. L'arrachement de particules par effet « splash » est négligeable dans le phénomène de ravinement en raison de l'épaisseur de la lame d'eau (Kirkby and Bracken, 2009).

D'autres processus peuvent être à l'origine de la formation d'un ravin, notamment l'érosion en galerie. Lorsque les tunnels souterrains d'écoulement de l'eau sont surchargés, quand une pluie intense fournit un courant assez fort pour emporter les particules de sol dans ces tunnels, ceux-ci s'effondrent. Le sol, alors éventré, peut former un ravin (Berry and Ruxton 1960).

Un glissement de terrain, qui a lieu sur la trajectoire d'un courant concentré, peut aussi aboutir à la formation d'un ravin (Morgan, 2005).

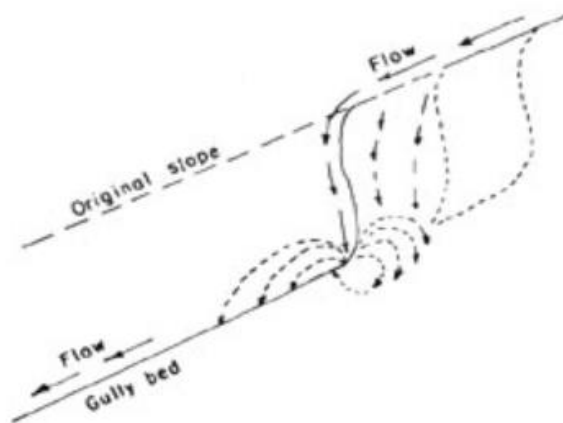


FIGURE 1 : *Les différents stades de développement d'un ravin à flanc de colline (tiré de Morgane, 2005)*

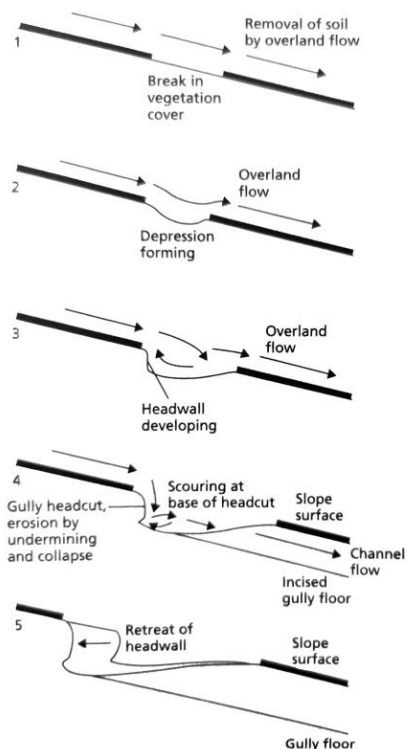


FIGURE 2 : *Progression régressive de la tête du ravin (tiré de Geyik 1986)*

2.1.2. LES DIFFÉRENTS TYPES DE RAVINS

Selon Castillo et Gomez (2016), la littérature sur le ravinement à travers le monde s'est nettement étoffée ces dernières années. Cette augmentation est due à sa reconnaissance comme un problème environnemental majeur (Vanmaercke, 2016). Cependant, les ravins continuent d'y être décrits de façon différente d'un article à l'autre. Thwaites et al., (2022) classifient et définissent de façon très précise le concept de ravin.

Classification selon leur taille

Geyik (1986) classifie les ravins selon leur taille, voir **tableau 1**. Cependant, il n'existe pas de dimension maximale clairement définie (Vanmaercke et al., 2021), des profondeurs bien supérieures à celles mentionnées ci-dessous ont déjà été observées, comme le ravin de Tchali (profondeur moyenne : 35m, largeur moyenne 60m, longueur totale 2080m) à Pointe Noire au Congo (Sitou, 2022). Les méga-ravins sont caractérisés par une largeur supérieure à 5m (Makanzu Imwangana et al., 2014).

TABEAU 1 : *Classification des ravins selon leur profondeur et leur surface de drainage (tiré de Geyik, 1986)*

	Profondeur (m)	Aire de drainage (ha)
Petits ravins	<1	<2
Moyens ravins	[1 ;5]	[2 ;20]
Grands ravins	>5	>20

Classification selon leur forme

Geyik (1986) classe aussi les ravins selon la forme de leur section transversale (**figure 3**). Des ravins en U sont formés lorsque le sol de surface et le sous-sol ont la même résistance à l'érosion, menant à la formation de berges verticales. La forme V apparait lorsque le sous-sol est plus résistant à l'érosion que le sol en surface. C'est la forme la plus commune. Une forme trapézoïdale résulte de la présence d'une couche de sol particulièrement résistant à l'érosion dans le fond du ravin.

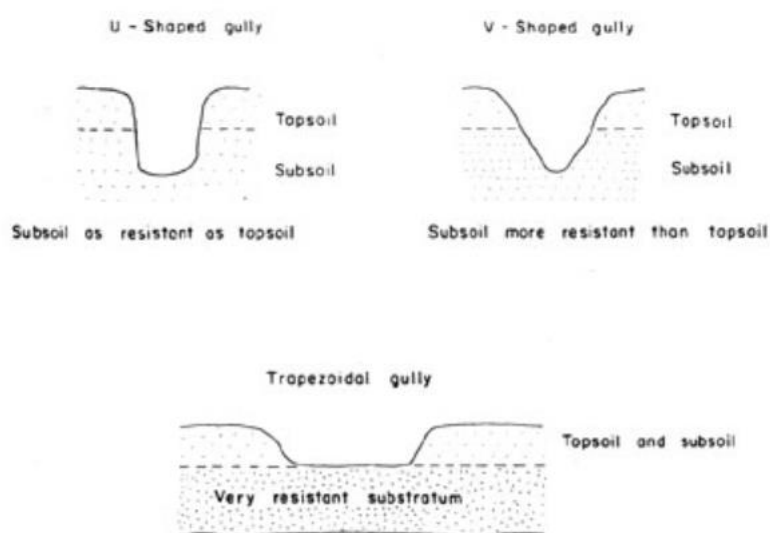


FIGURE 3 : *Classification des ravins selon leur forme (tiré de Geliyk 1986)*

Classification selon leur localisation par rapport à des infrastructures

Il est aussi important de prendre en compte la position du ravin par rapport aux infrastructures urbaines impactant le ruissellement de surface (routes, canalisations,...) à proximité (Imwangana et al., 2015). En effet, les routes sont les plus grands générateurs de ruissellement en milieu urbain. Selon les observations d'Imwangana et al. (2015), il semblerait que 91% des têtes de ravin soient alimentées par une route, une allée ou une piste. La topographie et la présence de 'routes' sont les deux facteurs contrôlant l'occurrence spatiale des méga-ravins dans les environnements récemment urbanisés (Makanzu Imwangana et al., 2014).

La **figure 4** montre les différents positionnements possibles pour un ravin par rapport à une route. Le ravin A est dit axial sur pente convergente. Cela signifie qu'il se développe dans la direction du ruissellement produit par l'infrastructure considérée, ici l'axe de la route ; sa progression engendre donc la destruction de cette dernière. Lorsque l'eau quitte l'infrastructure selon une pente divergente, cela induit la formation d'un ravin comme le ravin B, de type non-oblique. Enfin, le ravin C est de type oblique sur pente parallèle ; il apparaît lorsque l'eau quitte l'infrastructure selon une pente parallèle à celle-ci.

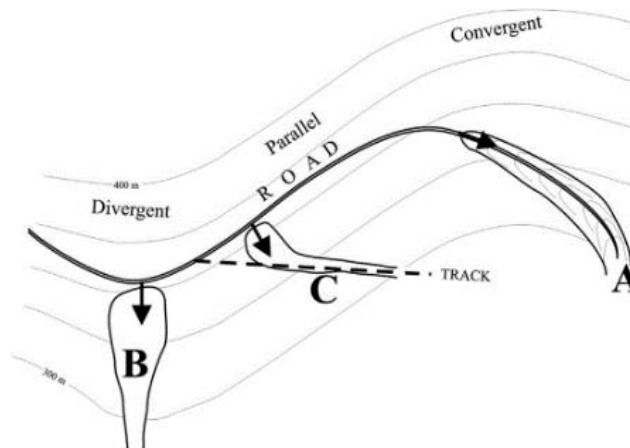


FIGURE 4 : *Classification des ravins selon leur positionnement par rapport à des infrastructures urbaines (tiré de Imwangana et al., 2015)*

Classification selon leur végétalisation

Poesen et al.(2003) expliquent le rôle d'une couverture végétale sur le phénomène de ravinement. De façon générale, la végétation participe à la diminution de l'érodibilité d'un sol. Cependant, selon Imwangana et al. (2015), même si une fois stabilisés, les ravins sont rapidement recouverts par la végétation, cela ne signifie pas qu'ils peuvent être considérés comme stables. En effet, des réactivations de méga-ravins végétalisés, même sous couverture arborescente continue, ont déjà été observées à Kinshasa. La présence de végétation dans le ravin n'est qu'un indicateur d'une stabilité relative (Imwangana et al., 2015).

Classification selon leur morphologie interne

Kirkby and Bracken (2009) classent les ravins en fonction de leur morphologie interne (**FIGURE 5**) selon deux rapports. Le premier est le rapport entre la pente latérale et la pente du canal ($>>1$). Ce rapport est généralement élevé pour les ravins classiques et faible pour les ravins éphémères. Le second est le rapport entre la pente du canal du ravin, sans prendre en compte la pente de la tête du ravin, et la pente de la surface initiale dans laquelle il a été creusé. Lorsqu'un ravin s'étend, il y a normalement au moins une section significative du ravin où ce rapport est inférieur à l'unité, de sorte que la profondeur de la ravine augmente en amont.

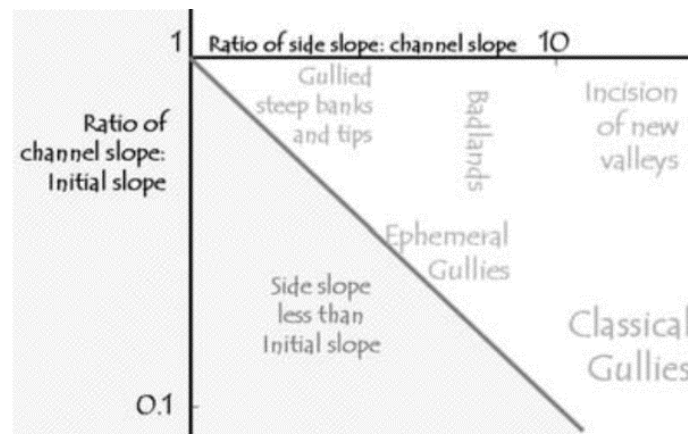


FIGURE 5 : Classification des ravins selon leur morphologie interne (tiré de Kirkby and Bracken, 2009)

Classification selon leur état d'activité

Un ravin est dit actif lorsqu'il continue de croître sous l'action du ruissellement. Il y a deux conditions où on peut considérer un ravin comme n'étant plus actif. Premièrement, lorsqu'il a atteint un état d'équilibre, c'est-à-dire lorsque la superficie en amont de la tête du ravin (aire contributive) a diminué de manière telle que la quantité d'eau qui y est collectée soit insuffisante pour causer une progression future du ravin (Makanzu Imwangana et al., 2014). Deuxièmement, lorsqu'il a été entièrement stabilisé par la mise en place d'infrastructures antiérosives (Imwangana et al., 2015).

2.1.3. REPARTITION MONDIALE

L'érosion du sol est un problème présent dans la plupart des régions du monde, sous des conditions climatiques très différentes. Le ravinement urbain est devenu au cours des dernières décennies un problème mondial majeur. En Afrique, la plupart des sites étudiés sont situés dans la ceinture des savanes ouest-africaines et en Afrique australe (Imwangana et al., 2015). Mais de nombreuses villes en Afrique centrale, telles que Kinshasa (Makanzu Imwangana, 2010) et Brazzaville (Sitou, 2022), sont également sévèrement affectées par ce phénomène. Selon Sitou, 2022, la dégradation de zones urbaines à cause de l'érosion hydrique est surtout alarmant dans les pays en voie de développement, particulièrement ceux d'Afrique sub-saharienne.

L'occurrence de l'érosion sous forme de ravins peut être estimée sur base de modèles statistiques et de cartes GIS (Nicu, 2018; Vanmaercke et al., 2021). Il n'existe pas de carte de la répartition mondiale des ravins. Cependant, la carte ci-dessous (figure 6), basée sur l'analyse d'une superposition d'une carte mondiale des sols et d'une carte mondiale des climats, donne une idée des zones du globe les plus à risque de développer une forte densité en ravins.

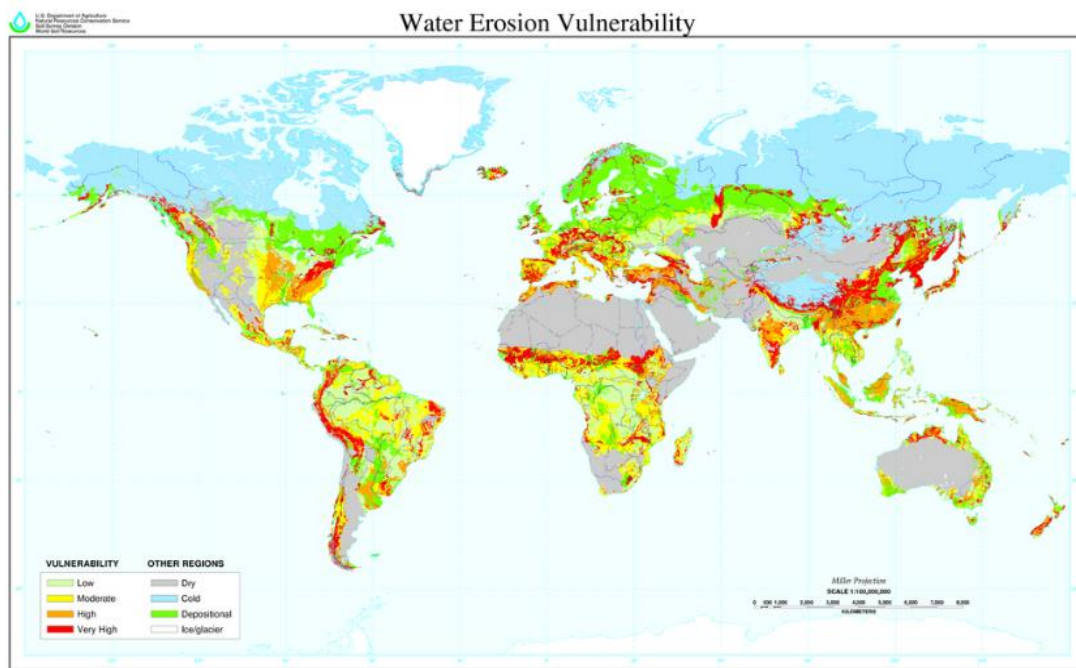


FIGURE 6 : Carte mondiale de la vulnérabilité à l'érosion hydrique (tiré de "Vulnerability to Water Erosion Map | NRCS Soils," n.d.)



FIGURE 7 : Localisation des études avec l'érosion par ravinement comme sujet principal (tiré de Castillo et Gomez, 2016)

2.2. PROBLEMATIQUE DU RAVINEMENT EN MILIEU URBAIN

2.2.1. CONSEQUENCES ET ENJEUX

Le ravinement a de multiples conséquences sur la zone affectée par l'érosion. Il y est responsable de diverses détériorations environnementales telles que des pertes en sol, une déstructuration des habitats naturels, l'envasement des réservoirs et le rabattement des eaux souterraines,... (Bacellar et al., 2005). Vanmaercke et al. (2021) distinguent les impacts in situ des impacts hors sites.

D'un point de vue agricole, le développement de ravins diminue la surface cultivable, mais aussi la productivité agricole par l'incision des terres et/ou l'épuisement des ressources du sol et entraîne ainsi une diminution du rendement des cultures (Ionita et al., 2015; Zgłobicki et al., 2015). En effet les horizons supérieurs, souvent plus riches en matière organique, sont les premiers à être impactés par l'érosion hydrique (Bacellar et al., 2005).

Les zones victimes d'érosion sont des sources de sédiments pour des réservoirs d'eau en aval (Valentin et al., 2005). De plus, les ravins peuvent abaisser le niveau des nappes phréatiques, réduisant ainsi l'eau disponible pour les plantes et le bétail. Cette réduction de la fertilité et de la disponibilité en eau des sols peut être à l'origine d'un appauvrissement économique de l'ensemble de la région (de A. P. Bacellar et al., 2005; (Kirkby and Bracken, 2009; Valentin et al., 2005).

Le ravinement est une cause de perte de revenu, (environ 37% pour une culture de riz en abatis-brulis au Laos), mais il peut aussi induire une augmentation de la charge de travail. Par exemple, dans des conditions identiques au Laos, pour lutter contre le ravinement, le temps de travail des fermiers a augmenté de 5% (Valentin et al., 2005).

Les ravins peuvent aussi être à l'origine d'une augmentation du drainage et une accélération du processus d'aridification. En Ethiopie, on observe une augmentation du drainage entre les ravins, entraînant une diminution de la teneur en eau du sol et donc du rendement agricole. Il se peut aussi que les ravins concentrent le ruissellement dans des canaux étroits limitant l'irrigation des sols avoisinants. C'est le cas dans le sud d'Israël (Negev) où une perte de 80% de la biomasse a été observée, entraînant une chute du potentiel agricole de la région (Valentin et al., 2005).

En milieu urbain, l'expansion des ravins mène certes à d'importants dommages matériels, destruction de routes, de maisons, d'infrastructures électriques ou de canalisations d'eau, etc. Mais elle peut même, dans certains cas, causer des décès ("Géographie physique et gestion des risques et des catastrophes," 2019). De plus, les ravins, une fois formés, ont tendance à s'accroître et sont très difficiles et coûteux à éradiquer (Kirkby and Bracken, 2009). Les impacts économiques négatifs de l'érosion par ravinement ont déjà été étudiés à de nombreuses reprises (Ionita et al., 2015). Par exemple, à Kinshasa, le coût lié à la destruction

des maisons par le ravinement s'élève chaque année à 1,5 million de dollars. Si on considère la RDC, le Rwanda et le Burundi, le total des dégâts matériels engendrés est de l'ordre de 200 millions d'euros/an (Imwangana et al., 2015). Selon une étude réalisée par Ilombe Mawe et al. en 2021, près de 400 000 personnes à Kinshasa vivaient sous la menace d'un ravin dont 150 000 vivent à moins de 100 m de celui-ci.

Finalement, il est à noter que, même si l'érosion par ravinement a de nombreuses conséquences environnementales et socio-économiques négatives (Ionita et al., 2015), ces ravins peuvent aussi constituer des sites géo-touristiques attrayants (Zgłobicki et al., 2015). Ainsi, les enjeux de la recherche sur le ravinement sont doubles. Outre un intérêt scientifique, en mettant à leur disposition les informations et explications nécessaires, elle permet aux décideurs politiques et administratifs de prendre des mesures palliatives ou préventives adaptées. La recherche sur le ravinement a aussi pour objectif d'impliquer les populations riveraines dans la gestion du phénomène. Pour ce faire, il est essentiel de réaliser une étude de la perception qu'elles ont de celui-ci (Sitou, 2022).

2.2.2. CAUSES

Les causes du ravinement sont généralement divisées en deux groupes : les facteurs physiques et les facteurs anthropiques.

2.2.2.1. FACTEURS PHYSIQUES

Geyik (1986) considère quatre facteurs physiques principaux ayant un impact sur le phénomène de ravinement : les précipitations, la topographie, les propriétés du sol et la couverture végétale.

Érosivité de la pluie

L'érosivité d'une pluie désigne sa capacité à provoquer de l'érosion. Elle est fonction de trois éléments. D'abord, son intensité et sa durée qui influencent sa capacité à générer du ruissellement. Ensuite, son énergie cinétique qui conditionne sa capacité à détacher des particules de sol lors de l'impact (Morgan, 2005).

Par conséquent, les distributions mensuelles voir journalières ou encore horaire des précipitations sont plus importantes que les précipitations annuelles totales en raison de ses effets d'intensité et de durée mais aussi pour son impact sur la couverture végétale.

En effet, dans les régions où les précipitations ne sont pas uniformément réparties sur l'année, la végétation se dessèche durant la saison sèche, ce qui offre un terrain propice à

l'érosion hydrique à la reprise des pluies. La quantité d'eau libérée lors d'une pluie dépend de son intensité et de sa durée. Lorsqu'elle dépasse la capacité de rétention en eau du sol, elle génère un ruissellement de surface (Geyik, 1986). Selon Vanmaercke et al. (2021), l'impact de l'intensité et la quantité des précipitations sur la contrainte de cisaillement exercée par l'eau sur le sol sous l'effet du ruissellement a été démontré.

Topographie

Selon Geyik (1986), la taille et la forme de la zone contributive, ainsi que la longueur et l'inclinaison de ses pentes, ont un effet sur le taux de ruissellement et la quantité d'eau de surface.

D'abord, la forme de la zone contributive et plus précisément la distance à l'exutoire impacte le taux de ruissellement, en influençant la concentration des flux. Ensuite, concernant sa taille, plus le bassin versant est grand, plus le volume ruisselé sera important. Enfin, plus la pente est longue, plus la lame d'eau vers la base de la pente sera épaisse. Plus elle est inclinée, plus la vitesse d'écoulement sera élevée. Or, plus la lame d'eau et la vitesse d'écoulement sont élevées, plus l'impact érosif l'est aussi.

De nombreux articles (Makanzu Imwangana et al., 2014; Poesen et al., 2003; Valentin et al., 2005; R.P.C. Morgan, Third edition) font référence à l'existence d'une relation critique entre la pente du sol au niveau de la tête du ravin (S) et l'aire de la zone contributive (A). Cette relation est caractérisée par l'équation suivante :

$$S = a A^{-b}$$

où, a et b sont des constantes dépendant des caractéristiques environnementales.

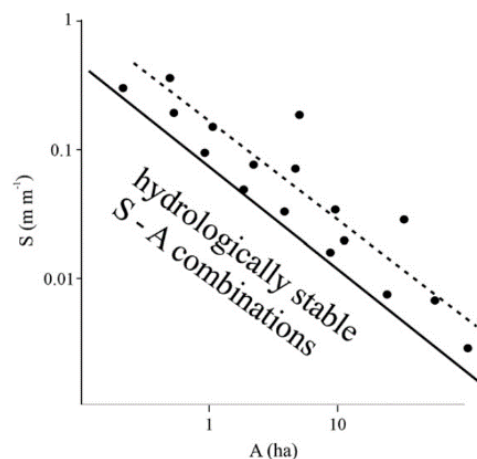


FIGURE 8 : Relation entre la pente de la surface du sol au niveau de la tête du ravin (S) et l'aire de la zone contributive (A) en échelle logarithmique. (tiré de Makanzu Imwangana et al., 2014)

En dessous de la ligne limite d'occurrence (ligne continue sur le graphe) d'un ravin l'incision n'a pas lieu, ces zones sont donc exemptes de risques liés au ravinement.

Érodibilité du sol

Tous les sols ne sont pas égaux face au ravinement (Poesen et al., 2003). L'érodibilité d'un sol désigne sa sensibilité à l'érosion, en d'autres termes, sa sensibilité au détachement et au ruissellement. Elle varie selon sa résistance au détachement et sa capacité d'infiltration. Dans le cas du ravinement la résistance au détachement d'un sol dépend de la cohésion de particules qui le composent. La cohésion est une propriété du sol qui caractérise sa résistance au cisaillement. La force de cisaillement est, pour rappel, la force exercée, lors d'un écoulement concentré, par l'eau sur les particules de sol, pouvant mener à leur détachement. La cohésion d'un sol dépend de divers paramètres tels que la texture, la minéralogie des argiles, la composition de la solution du sol et la présence de liants organiques et/ou inorganiques (Morgan, 2005). L'effet de la texture d'un sol sur son érodibilité est ambivalent. En effet, le taux d'infiltration augmente de l'argile au sable, mais la cohésion et donc la résistance à l'érosion diminue (Geyik, 1986). De même que l'encrouement, car il retarde l'initiation des ravins grâce à leur plus forte résistance au cisaillement mais favorise le ruissellement (Valentin et al., 2005).

Couverture du sol

La couverture végétale est souvent considérée comme un facteur clé contrôlant le ravinement. Il existe une relation négative entre le couvert végétal et l'érosion par ravinement (Vanmaercke et al., 2021). Le rôle joué par la végétation face au ravinement est double. Elle favorise l'infiltration et protège le sol de l'érosion hydrique. Au-dessus de la surface du sol, la végétation proche de celui-ci intercepte les gouttes de pluie et le protège de l'effet « splash » et diminue la vitesse de l'eau de ruissellement, donc son action érosive. En-dessous, elle améliore les propriétés physiques du sol tels que la cohésion ou l'infiltration (Geyik, 1986; Moeyersons et al., 2015; Poesen et al., 2003; Valentin et al., 2005; Vanmaercke et al., 2021).

2.2.2.2. FACTEURS ANTHROPIQUES

Au cours des 1500 dernières années, le ravinement a été déclenché par une combinaison entre changements de la couverture du sol par l'Homme et événements pluviométriques extrêmes (Poesen et al., 2003). De nombreuses études démontrent le lien entre le développement de ravins et les activités agricoles (mauvaise gestion des terres, mauvaises pratiques agricoles,...) , pastorales (surpâturage,...) et forestières (Valentin et al.,

2005). Cependant, selon de A. P. Bacellar et al., 2005, il n'y a pas toujours une relation claire entre l'utilisation des terres et l'intensité du ravinement car leur distribution spatiale serait contrôlée par d'autres facteurs tels que le relief.

Concernant les zones urbanisées, toutes les études semblent formelles (Imwangana et al., 2015; Makanzu Imwangana et al., 2014; Poesen et al., 2003; Sitou, 2022; Zolezzi et al., 2018) : l'urbanisation, en modifiant la surface du sol, peut entraîner une augmentation de l'occurrence des ravins. Pour une pente donnée, l'aire de la zone contributive nécessaire à l'expansion d'un ravin est plus petite si des routes, ou toute autre infrastructure diminuant l'infiltration, sont présentes (Poesen et al., 2003). Ce processus est renforcé en cas d'absence ou de mauvaise gestion des eaux de pluie et d'occupation du site sans précaution (Sitou, 2022). Le rôle prépondérant de l'influence humaine sur le développement des ravins n'est pas toujours aussi évident. Par exemple, les dérèglements climatiques et plus précisément l'augmentation de l'intensité des pluies semblent être une des causes les plus importantes d'augmentation du processus de ravinement (Vanmaercke et al., 2021). Pour conclure, que cela soit directement ou indirectement l'apparition de ravins semble être largement liée à l'activité humaine (Imwangana et al., 2015).

2.2.3. METHODES DE LUTTE

En cas de développement d'un ravin, la première étape est de mettre fin au déversement d'eau à sa tête, ou au moins de l'atténuer et ensuite de stabiliser complètement ses parois (Imwangana et al., 2015). Les méthodes de lutte antiérosives sont généralement divisées en deux catégories : les méthodes d'atténuation, situées en amont de la tête du ravin, ayant pour objectif de diminuer la quantité d'eau qui s'y déverse, et les méthodes de stabilisation, dont l'objectif est de stopper le développement du ravin en stabilisant ses berges. Les méthodes d'atténuation sont souvent bien moins coûteuses que les mesures de stabilisation (Geyik, 1986; Kirkby and Bracken, 2009). L'idée générale est de combiner l'implantation de mesures de différents types pour maximiser les chances de réussite (Wouters and Wolff, 2010).

2.2.3.1. METHODES D'ATTENUATION

Les méthodes d'atténuation applicables en milieu urbain sont divisées en deux types. Le premier englobe l'ensemble des mesures dont le but est de favoriser l'infiltration et la rétention des eaux de surface afin de réduire le taux et la quantité d'écoulement. Le deuxième consiste en une déviation des flux d'eau en amont du ravin, vers un autre exutoire que celui-ci. Les méthodes d'atténuation peuvent aussi être utilisées de façon préventive là où les risques d'apparition d'un ravin sont élevés (Geyik, 1986; Imwangana et al., 2015; Sitou, 2022; Valentin et al., 2005).

De nombreuses mesures de ce genre existent : bassins de rétention, canalisations, mur en terre ou de sacs de sable, cuves, ... Tout le défi réside dans le choix des mesures à mettre en place en fonction des moyens et dans leur positionnement pour en maximiser l'efficacité (Imwangana et al., 2015). De plus, l'entretien de ces mesures est primordial pour en garantir la durabilité (Wouters and Wolff, 2010). Des mesures toutes simples telles que l'implantation ou le maintien d'un couvert végétal en amont du ravin constituent déjà une méthode d'atténuation efficace (Wouters and Wolff, 2010).



FIGURE 9 : *Bassin de rétention captant l'eau s'écoulant sur l'allée adjacente (photographie prise à Kinshasa dans le quartier de Kimuenza)*



FIGURE 10 : *Mur de sac de sable situé dans un canal d'écoulement de l'eau de ruissellement (photographie prise à Kinshasa dans le quartier de Kimuenza)*

2.2.3.2. METHODES DE STABILISATION

Ces méthodes sont utilisées lorsque le ravin s'est déjà formé, afin de minimiser les dommages supplémentaires et de rétablir la stabilité. (Geyik, 1986). L'objectif de ces méthodes est double : diminuer la vitesse d'écoulement des eaux au sein du ravin et limiter, voir stopper si possible, l'expansion de celui-ci (Imwangana et al., 2015). Il existe deux types de méthodes de stabilisation, les méthodes physiques et les méthodes biologiques.

2.2.3.2.1. METHODES PHYSIQUES

Selon (Geyik, 1986), les méthodes à appliquer diffèrent en fonction de l'intensité des précipitations de la région concernée. Ainsi, dans une région à pluie de faible intensité, les ravins peuvent être stabilisés par remplissage et façonnage. Cela consiste en un façonnage de la tête et des berges pour obtenir une pente plus douce qui sera par la suite recouverte de végétation. Cependant, dans une région à pluie de forte intensité, cette mesure n'est pas suffisante. Des mesures supplémentaires telles que les barrages de retenue, les terrasses en pierre, ... doivent être prises.

Par exemple, la construction d'un barrage à la tête et dans le lit du ravin constitue une méthode relativement efficace. Elle a pour but de retenir l'eau qui s'y déverse formant ainsi des zones de sédimentation. Ce faisant, elle protège la tête de la méga ravine et le fond de la méga ravine en aval contre l'incision verticale et le stockage préserve la partie aval de la ville des inondations d'eau et de boue. Cependant, une fois que le volume derrière le barrage est rempli, les sédiments ne sont plus retenus et l'acheminement vers la partie inférieure de la ravine reprend (Guyassa et al., 2017; Imwangana et al., 2015).

Ces méthodes étant souvent coûteuses, elles ne sont pas accessibles à tous (Kirkby and Bracken, 2009). Par exemple, dans les quartiers les plus pauvres de Kinshasa, les Kinois, ne pouvant pas se permettre ce genre d'infrastructures, tentent de limiter la progression du ravin en jetant leurs ordures ménagères et leurs déchets à sa tête, afin de protéger la tête du ravin de l'érosion (Makanzu Imwangana et al., 2014). Bien sûr l'efficacité de cette méthode est limitée, sans compter qu'au cours des événements pluvieux une grande quantité de ces déchets sont transportés en aval par les flux d'eau et contribueront à la pollution des cours d'eau.



FIGURE 11 : Cours d'eau rempli de déchet à Kinshasa (tiré de Pinganayi, 2019)

2.2.3.2.2. METHODES BIOLOGIQUES : VEGETALISATION

Comme déjà mentionné ci-dessus (2.1.2) le couvert végétal joue un rôle primordial sur l'érosivité du milieu. La partie racinaire tout comme la partie caulifère de la plante ont un impact sur la diminution de l'érosion. La partie supérieure de la plante diminue l'impact érosif dû à l'action de l'eau de différentes manières. D'abord, elle protège la surface du sol contre l'impact des gouttes de pluie. Ensuite, elle réduit le volume et la vitesse du ruissellement en augmentant le taux d'infiltration et la rugosité de la surface. Enfin, elle réduit le transport des sédiments en les piégeant (Moeyersons et al., 2015; Poesen et al., 2003; Vanmaercke et al., 2021; Vannoppen, 2015; Wouters and Wolff, 2010).

Le rôle des racines est certes moins visible mais non moins important. En effet, elles peuvent être très efficaces pour stabiliser le sol contre l'érosion par flux concentré (Vannoppen, 2017). La présence de racines vivantes modifie à la fois les caractéristiques mécaniques et hydrologiques de la matrice du sol. Concernant les propriétés mécaniques du sol, les racines vont s'entrelacer dans la matrice du sol et servir de source à la formation d'agrégats, améliorant sa structure. Or, la présence d'agrégats diminue son érodibilité. De plus, les racines des plantes vont également renforcer le sol face aux contraintes de cisaillement. En effet, les racines sont capables de résister à d'importantes forces de tension alors que la matrice du sol est assez résistante à la compression. Elles sont donc complémentaires. Les racines jouent donc un rôle prépondérant dans la réduction des taux de détachement du sol lié aux écoulements concentrés, et ce particulièrement pour les sols de type sableux (Poesen et al., 2003; Vanmaercke et al., 2021; Vannoppen, 2017, 2015; Wouters and Wolff, 2010). Elles améliorent également les propriétés hydrologiques du sol en favorisant le développement d'un milieu propice à un taux d'infiltration élevé (Moeyersons et al., 2015; Vanmaercke et al., 2021).

C'est pourquoi les racines des plantes sont plus efficaces pour contrôler les taux d'érosion des ravins, alors que la partie caulifère est plus efficace pour contrôler le détachement par rejaillissement et les taux d'érosion interrills (Vannoppen, 2015). Ainsi, la végétalisation de la tête du ravin ainsi que de ses berges diminue fortement la capacité érosive du ruissellement, et ce principalement par augmentation de la cohésion du sol (Vanmaercke, 2016). Elle constitue donc une méthode de stabilisation efficace.

Il est à noter que la capacité du couvert végétal à diminuer l'érosion de surface et le ruissellement est fortement dépendant des espèces qui le composent et plus particulièrement de leur architecture racinaire (Vanmaercke, 2016; Vannoppen, 2015). Lors de l'installation d'un couvert végétal, il convient donc de sélectionner efficacement les essences qui le constitueront afin de contrôler au maximum les processus d'érosion du sol (Vannoppen, 2017).

2.2.3.3. EFFICACITE DES DIFFERENTES METHODES DE LUTTE

Pour maximiser l'efficacité des méthodes de lutte antiérosive, le mieux est bien souvent de combiner différentes mesures à mettre en place comme le démontrent Guyassa et al. (2017). Selon Lutete Landu et al. (2021), toutes les mesures mises en place n'ont pas la même efficacité. Par exemple, à Kinshasa, les mesures qui semblent être les plus efficaces sont la mise en place de canalisations et de bassins de rétention d'eau, l'abandon de déchets ménagers à la tête du ravin, malgré les conséquences environnementales, et la construction de petits barrages au niveau de la tête du ravin et/ou dans l'aire contributive. Ils soulignent aussi que l'efficacité de cette mesure est certainement affaiblie par le manque d'entretien de certaines infrastructures telles que les bassins de rétention (Lutete Landu et al., 2021). Toujours à Kinshasa, une combinaison de barrages de sacs de sable, de pneus et d'ordures ménagères a permis une stabilisation du ravin dans 76 cas sur 98. Dans seulement 7 cas, la stabilisation des méga-canaux a été obtenue par la prévention du ruissellement en amont de la tête du ravin (Imwangana et al., 2015). Afin de maximiser l'efficacité des mesures antiérosives, il semble donc préférable d'effectuer une étude du milieu avant leur installation pour proposer les mesures les plus adaptées.

2.3. KINSHASA

2.3.1. LOCALISATION

Kinshasa est la capitale de la République Démocratique du Congo. Comme le montre la **figure 12**, elle est située à l'ouest du pays et s'étend sur la rive gauche du fleuve Congo, qui, à cet endroit, prend la forme d'un croissant de lune appelé « Pool Malebo ». Elle toise Brazzaville située sur la rive opposée. Kinshasa subit un accroissement démographique d'un peu plus de 4% par an, plus ou moins stable depuis 2000. Depuis 1950, la population a été multipliée par 80. Habitée à cette époque par 202 000 habitants, elle en abriterait actuellement quasi 16 millions, faisant d'elle la plus grande ville de la RDC et la plus grande ville francophone du monde ("10 pays et leur plus grande ville francophone - Master Your French," 2021). Elle a connu une croissance urbaine sans précédent et s'étend maintenant sur presque 1000 km² (Moeyersons et al., 2015). Les Kinois sont répartis dans les 24 communes que compte la ville, qui est en réalité une province (Makanzu Imwangana, 2010).



FIGURE 12 : Localisation de la province de Kinshasa (en rouge) (tiré de Editor, 2016)

Comme le montre la **figure 13**, Kinshasa est divisée en deux parties : la ville haute et la ville basse. La ligne en pointillé montre la limite d'urbanisation durant la moitié des années 60. En 2007, la ville s'étend jusqu'à la rive Est du « Pool Malebo » et la zone vallonnée est complètement urbanisée (Moeyersons et al., 2015).

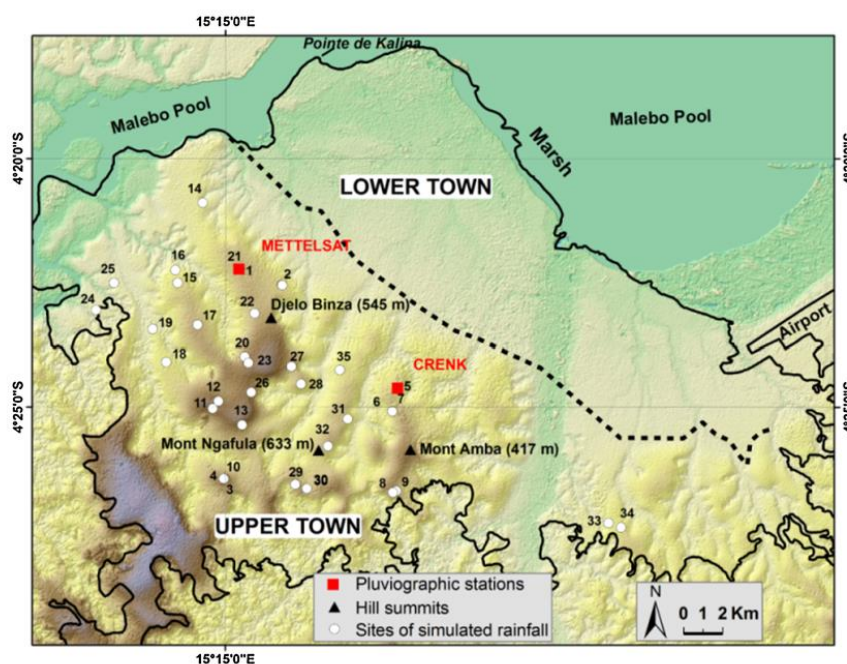


FIGURE 13 : Carte du relief de Kinshasa (tiré de Moeyersons et al., 2015)

2.3.2. CLIMAT

Si on se réfère à la classification des climats selon Koppen-Geiger, le climat à Kinshasa est de type Aw4, ce qui correspond à un climat tropical chaud et humide (Peel et al., 2007). L'année se divise en deux saisons : une saison sèche qui s'étend de juin à septembre avec une température moyenne de 22.8°C et une saison humide d'octobre à mai avec une température moyenne de 25.6°C. Cependant une petite saison humide de quelques semaines coupe la saison sèche en deux vers la fin du mois de décembre (Lateef et al., 2010). Les mois les plus chauds sont mars et avril avec une température maximale moyenne de 32°C et une température minimale moyenne de 22°C. Le mois le plus froid est celui de juillet avec une température maximale moyenne de 27°C et une température minimale moyenne de 18°C (Aladin, n.d.).

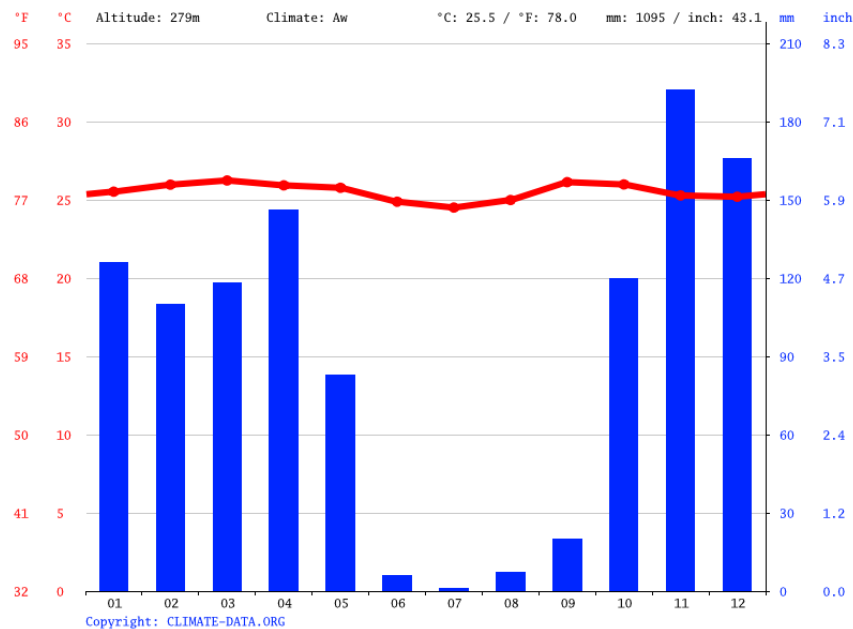


FIGURE 14 : *Diagramme ombrothermique de Kinshasa (tiré de (“Climat Kinshasa: Pluviométrie et Température moyenne Kinshasa, diagramme ombrothermique pour Kinshasa - Climate-Data.org,” n.d.)*

L’humidité moyenne relative est comprise entre 71 et 84% et la pluviométrie annuelle moyenne est de l’ordre de 1500mm (Lateef et al., 2010). Les précipitations sont les plus faibles en juillet avec seulement 2 mm et les plus élevées en novembre avec 173 mm en moyenne (“Climat Kinshasa: Pluviométrie et Température moyenne Kinshasa, diagramme ombrothermique pour Kinshasa - Climate-Data.org,” n.d.). Il est important de noter que, selon Imwangana et al. (2015), Kinshasa est le seul endroit en Afrique centrale où les statistiques montrent que les dérèglements climatiques se traduisent par une augmentation de l’intensité des pluies.

Rainfall - Kinshasa, Democratic Republic of Congo

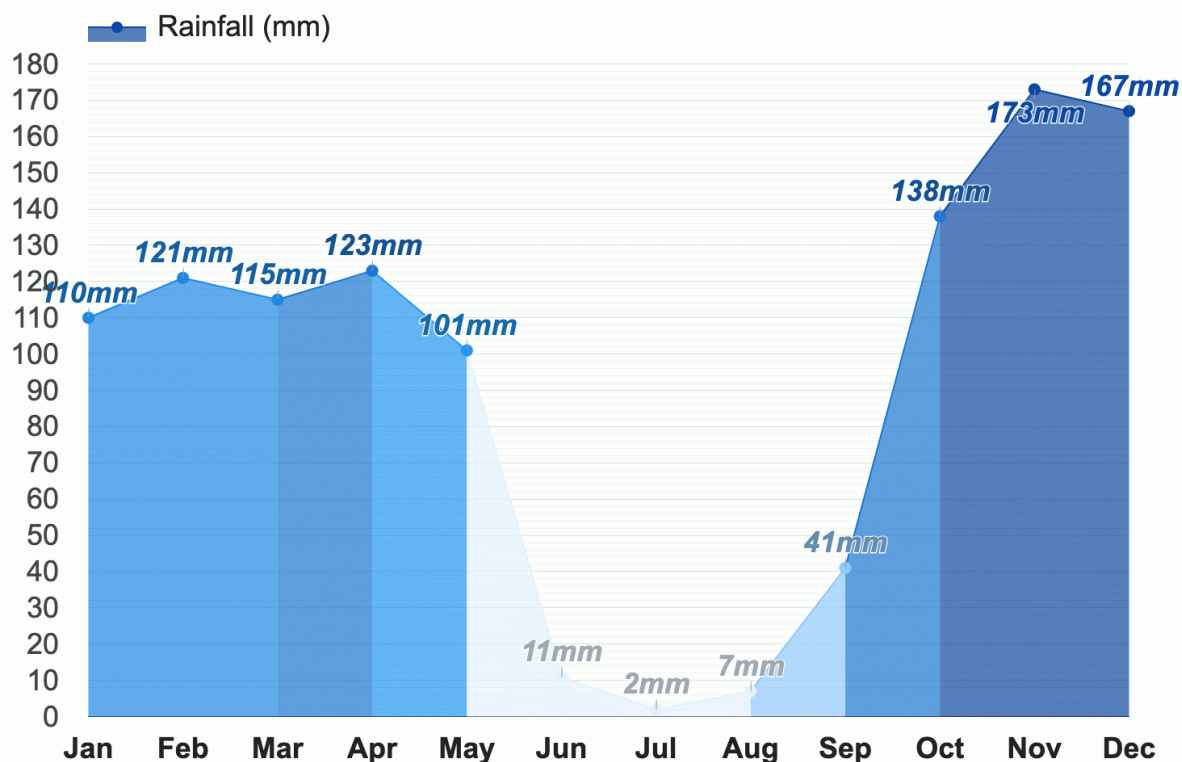


FIGURE 15 : Précipitations mensuelles moyennes à Kinshasa (tiré de (Aladin, n.d.)

Rainfall days - Kinshasa, Democratic Republic of Congo

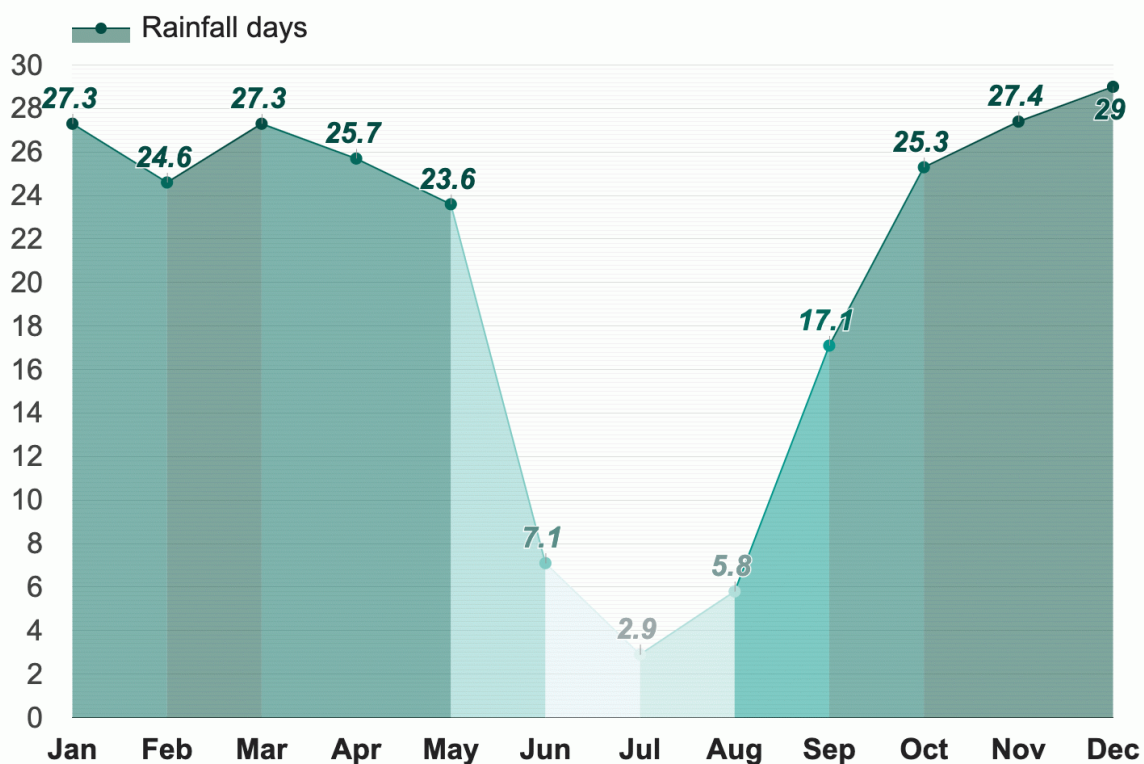


FIGURE 16 : Nombre de jours de pluie mensuel moyen à Kinshasa (tiré de (Aladin, n.d.)

2.3.3. TOPOGRAPHIE

Comme mentionné précédemment, Kinshasa est divisée en deux parties. La partie basse de la ville est une plaine d'environ 200 km² situé à 300m au-dessus du niveau de la mer. La ville haute est en réalité un complexe collinaire qui culmine à quasi 600 m d'altitude (Kayembe Wa Kayembe et al., 2009).

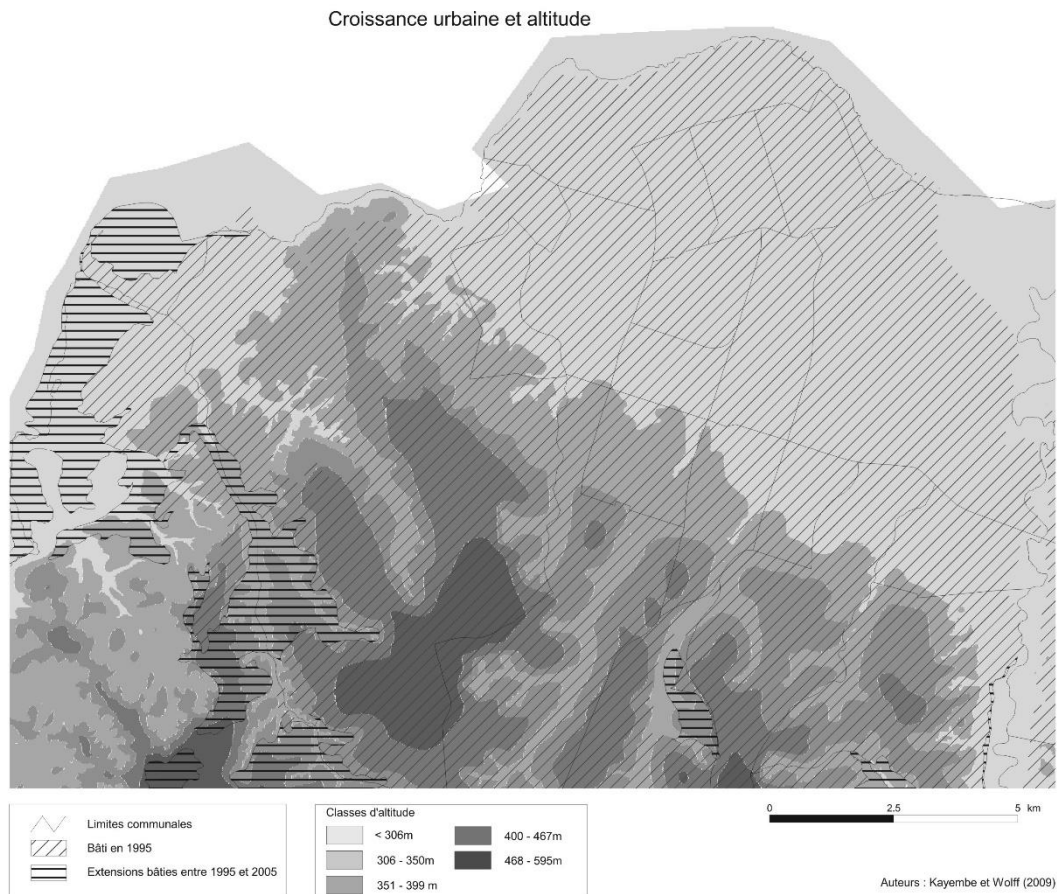


FIGURE 17 : Relief de Kinshasa (tiré de Kayembe Wa Kayembe et al., 2009)

2.3.4. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

La **figure 18** montre les principales structures géologiques présentes à Kinshasa, majoritairement du grès tendre et du sable de Lemba (sable fin), respectivement d'origine secondaire et tertiaire. Leur altération ainsi que les remaniements successifs durant des variations climatiques quaternaires ont engendré le panel des sols actuels (Caillie, 1989). L'ensemble des dépôts sont continentaux, de genèse fluviale, fluviodeltaïque, fluviolacustre,

lacustre ou encore éolienne (Davies, 2015). Comme le montre la **figure 19**, la profondeur des nappes varie environ de 5 à 35 m par rapport au niveau du sol. En terme d'altitude, ces nappes se situent entre 270 et 390 m au-dessus du niveau de la mer (Lateef et al., 2010). Approximativement 25% des précipitations annuelles vont recharger les eaux souterraines qui s'écoulent généralement du sud vers le nord jusqu'au fleuve Congo (Mfumu Kihumba et al., 2017).

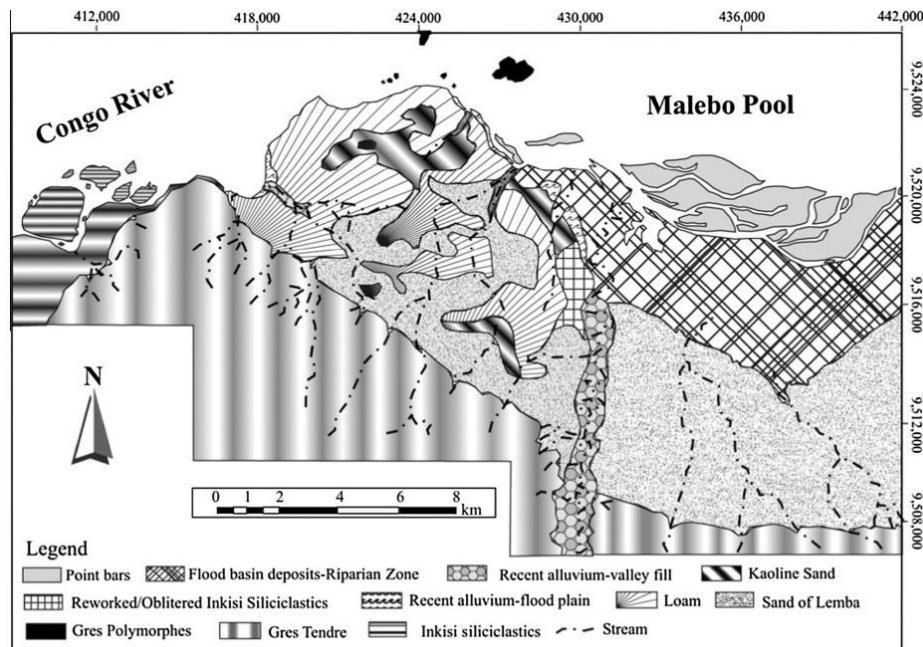


FIGURE 18 : Carte géologique de Kinshasa (tirée Lateef et al., 2010)

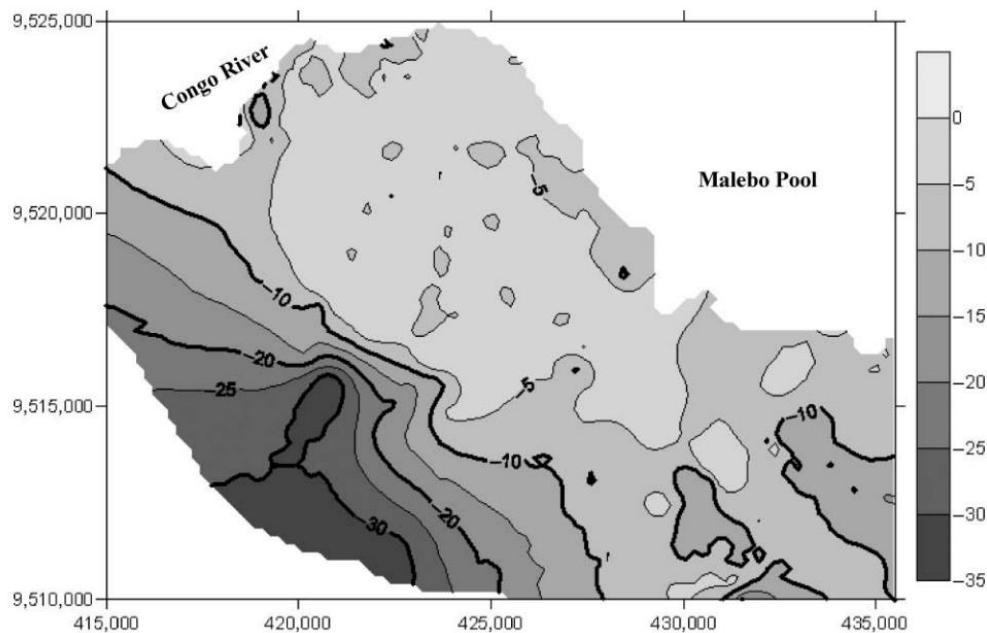


FIGURE 19 : Profondeur des nappes phréatiques par rapport au niveau du sol (tiré de Lateef et al., 2010)

2.3.5. PEDOLOGIE

En se basant sur la classification pédologique WRB (World Reference Base for soil resources, “WRB Translations | FAO SOILS PORTAL | Food and Agriculture Organization of the United Nations,” n.d.), les sols à Kinshasa sont de type arénosol (Wouters and Wolff, 2010). Ces sols sont le fruit d’une altération in situ d’un matériau parental riche en quartz ou de dépôts récents de sables (dunes des déserts, sables de plages, ...) (Jones et al., 2015). Les arénosols sont définis par trois aspects. D’abord, ils ont une texture de sable loameux ou plus grossière, soit jusqu’à une profondeur d’au moins 100 cm à partir de la surface du sol, soit jusqu’à une plinthe. Ensuite, ils contiennent des fragments de roche pour moins de 35 pour cent de leur volume dans les premiers 100 cm sous la surface du sol. Enfin, ils ne possèdent pas d’horizon de type ochrique, yermique albique, plinthique, pétroplinthique ou salique en dessous de 50cm sous la surface du sol (Driessen, 2001). A Kinshasa les dépôts de sables (masse volumique du solide = $2,67 \text{ g/cm}^3$), dits kalahariens, datent du Tertiaire. Ils constitueraient en moyenne 97,7% du sol de Kinshasa (Moeyersons et al., 2015). Ils peuvent atteindre une épaisseur jusqu’à 30m au sommet des bassins versants et 10m au fond de ceux-ci. La porosité volumique des sables kalahariens varie entre 33 et 65 % avec une moyenne de 50 %. Cette couche de sable repose sur un socle de grès tendre de niveau d’altération variable qui trouve son origine durant l’ère Secondaire. Il est lui-même posé sur un substrat gréseux datant du Précambrien (Moeyersons et al., 2015; Wouters and Wolff, 2010). Selon Caillie, n.d., la teneur en argile des sables et grès tendre est comprise entre 5 et 30%. La plupart des sols kinois sont constitués de sables fins à moyen qui possèdent les caractéristiques suivantes (Caillie, 1989) :

- une perméabilité au perméamètre à charge constante : $k = 144 \text{ à } 360 \text{ mm/h}$,
- une cohésion quasi nulle : $\leq 5 \text{ kN/m}^2$,
- une teneur faible en matière organique.

Dans les 5 premiers cm de sol la teneur en eau varie de 2 à 39% avec une moyenne de 9% (Moeyersons et al., 2015). Tous les auteurs (Caillie, n.d.; Davies, 2015; Wouters and Wolff, 2010,..) s’accordent sur le fait que les sols de Kinshasa sont généralement pauvres avec une faible capacité de rétention en eau et une faible capacité d’échange cationique. Par contre, pour les valeurs de perméabilité, un désaccord persiste. Par exemple, selon Makanzu Imwangana et al. (2014) la perméabilité, calculée avec un infiltromètre à simple anneau, excède souvent 354 mm/h . Ou encore, selon Moeyersons et al. (2015), la perméabilité varie d’une infiltration nulle pour une route dans le site de Laloux à 470 mm/h pour un secteur météo. Selon eux, l’infiltration pourrait même atteindre 900 mm/h dans certaines zones spécifiques.

2.3.6. SITUATION SOCIO-ECONOMIQUE

La ville s'est développée sur le rivage sud du Pool Malebo. Ce territoire, qui à l'origine était couvert de forêts denses, savanes et formations aquatiques et semi-aquatiques, est actuellement une région urbanisée de presque 1000 km² (Makanzu Imwangana et al., 2014). En réalité, la partie urbanisée est beaucoup plus petite, environ 650 km² contre 20 km² en 1950 (Lateef et al., 2010). La croissance à la fois démographique et urbaine qui touche Kinshasa depuis la moitié du 20^{ème} siècle est en partie due à un exode rural, bien que décroissant ces dernières années. En 1984, 41 % de toute la population était née ailleurs, alors qu'en 2004 à peine 25 % des habitants ont migré vers la ville. Parmi ces immigrants, on constate une forte augmentation des ressortissants du Bandundu et du Kasaï oriental, deux provinces proches de Kinshasa (De Herdt, 2019).

'Kin la belle' s'est peu à peu effacée pour devenir celle qui est aujourd'hui appelée 'Kin la poubelle'. En effet, en seulement un siècle, la ville est passée d'une société rurale-tribale peu dense à une mégalopole mal gérée (Lateef et al., 2010). Aujourd'hui, Kinshasa est une ville pleine de contrastes possédant des quartiers résidentiels et commerciaux chics ainsi que des universités mais aussi des bidonvilles (Makanzu Imwangana, 2010). L'instabilité politique et les troubles civils qui ont suivi l'indépendance ont mené à une croissance chaotique de la ville (Lateef et al., 2010).

La population kinoise est très jeune, plus de la moitié de la population est âgée de moins de 20 ans. Selon certains rapports, plus de la moitié de la population serait même âgée de moins de 15 ans. Cela est dû à une faible espérance de vie (53,29 ans) et une forte fécondité (3,39 enfants par femme). Kinshasa possède un taux de mortalité plus faible que les autres villes congolaises (Lateef et al., 2010).

A l'origine, la petite ville coloniale alors nommée Léopoldville présentait une division ethnique bien définie au sein de la zone urbaine (Lateef et al., 2010). Actuellement, la ségrégation ne se fait plus sur base de la provenance des citoyens mais plutôt sur leur niveau social (Wouters and Wolff, 2010). La ville est aujourd'hui divisible en trois zones socio-urbaines. La première est le « Centre-ville ». Zone anciennement destinée aux colons, elle est actuellement le cœur commercial et administratif de la ville, où vit une élite. Ses frontières sont : la colline de Ngaliema à l'ouest, Malebo Pool à l'est et le fleuve Congo au nord. La deuxième zone socio-urbaine est le quartier populaire, dit la « Cité ». Elle est située au sud du « Centre-ville » et c'est là que vivent la plupart des Kinois à faible revenu. Elle est majoritairement composée de bidonvilles. La troisième zone socio-urbaine de Kinshasa est constituée par des "cités périphériques". Ce sont des bidonvilles à la frontière entre milieu urbain et milieu rural qui résultent de la croissance spatiale chaotique de Kinshasa, non planifiée par des règles d'urbanisme. La-bas, on y manque de tout. Cette zone recouvre les collines du sud et s'étend sur les communes de Mont Ngafula, Kinsenso Ndjili, Kimbanseke, et Nsele (Lateef et al., 2010).

La population kinoise a été marquée au cours des dernières décennies par de nombreuses crises. Parmi celles-ci mentionnons de nombreux conflits, les pillages du début

des années '90 mais aussi de nombreuses périodes de famines. Même si le pouvoir d'achat par personne aurait augmenté d'environ 75 % entre 1986 et 2004, la population kinoise reste pauvre. Les dépenses mensuelles moyennes par personne en 2004 étaient de 12 544 Franc Congolais, avec une proportion de 56,2% des dépenses pour l'alimentation (De Herdt, 2019). Si l'on considère un taux de change de l'ordre de 1\$ = 2000 FC, cette somme équivaut à environ 6,6\$ par mois. La RDC est un cas typique de « malédiction des ressources naturelles ». Alors que ses abondantes richesses naturelles en font hypothétiquement l'une des nations les plus riches de la planète, son produit intérieur brut par habitant est l'un des plus bas du monde. La plupart des ménages de Kinshasa vivent dans la précarité ou l'extrême pauvreté (Longondjo, 2015). Par comparaison le PIB de 2004 du Congo s'élève à 6,5 milliards de dollars US ("Economie | Congo-Kinshasa | Pays monde," n.d.) alors que celui de la Belgique durant la même année était de quasi 371 milliards (politologue.com, n.d.), pour un pays presque 8 fois moins peuplé.

2.3.7. RAVINEMENT A KINSHASA

2.3.7.1. TYPES ET NOMBRE DE RAVINS

Le **tableau 2** montre un inventaire, effectué en 2007 par Imwangana et al., (2015), qui dénombre un total de 308 méga ravins à Kinshasa. Depuis, il semble évident que le nombre de ravins n'a cessé d'augmenter (Imwangana et al., 2015). En effet, Makanzu Imwangana et al. (2014), estiment à 102km la longueur cumulée des méga ravins en 2010. Une étude plus récente, (Ilombe Mawe et al., 2021), estime à 4 km² la surface occupée par des méga ravins à Kinshasa, soit le double qu'en 2007.

TABLEAU 2 : Caractéristiques des méga ravins à Kinshasa en 2007 (tiré de Imwangana et al., 2015)

	Cumulé	Moyenne	Maximum	Minimum
Longueur (m)	94 732	308	2 129	25
Largeur (m)	-	17	117	3
Profondeur (m)	-	7	41	1
Surface (m ²)	1 969 148	6 393	89 921	146
Volume (m ³)	11 034 595	35 827	1 469 805	124

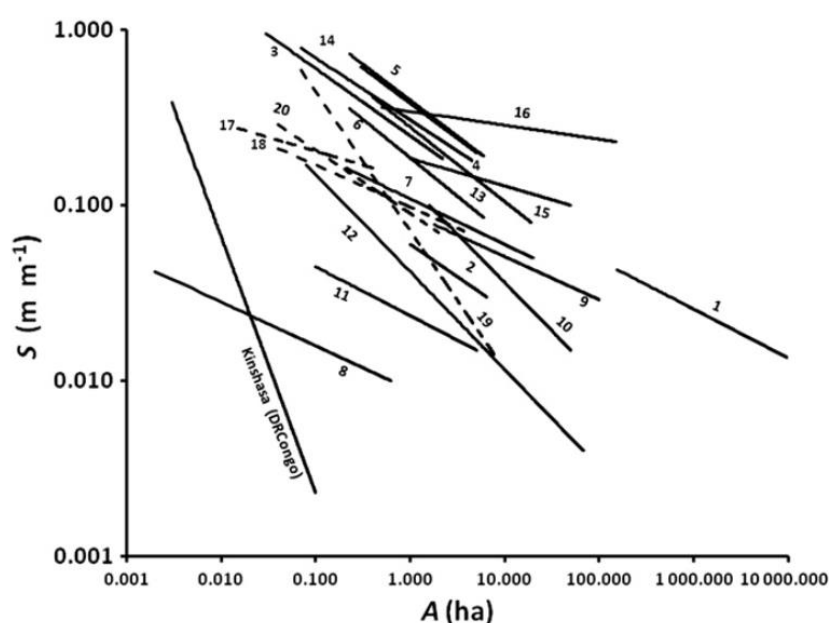
Les ravins typiques de Kinshasa ont une section en V tant qu'ils restent au-dessus de la nappe phréatique avec une largeur généralement équivalente à 3 fois la profondeur (Makanzu

Imwangana et al., 2014). Dans certains cas, ils peuvent s'élargir et présenter un fond plat dans les parties plus en aval (Moeyersons et al., 2015).

2.3.7.2. CAUSES DU RAVINEMENT

Une urbanisation rapide et chaotique combinée avec un environnement sensible sont les causes principales de l'occurrence des méga ravins à Kinshasa. D'un point de vue physique, l'environnement de Kinshasa est considéré comme sensible de par l'intensité des pluies durant la saison humide, son relief vallonné engendrant de fortes pentes et sa texture de sol sableuse peu cohésive et donc facilement érodable (Ilombe Mawe et al., 2021; Poesen et al., 2003).

Si on se réfère à la **figure 20** Kinshasa compte parmi les environnements les plus sensibles au ravinement dans le monde (Makanzu Imwangana et al., 2014).



FIGURE

20 :

Limite géomorphologique pour le ravinement autour du monde, relation entre la pente de la surface du sol au niveau de la tête du ravin (S) et l'aire de la zone contributive (A) en échelle logarithmique. (tiré de Makanzu Imwangana et al., 2014)

Au-dessus de la ligne limite d'occurrence (ligne continue sur le graphe) d'un ravin les risques d'incision sont élevés. Cependant, selon Makanzu Imwangana et al. (2014), étant donné la

perméabilité élevée du sol de Kinshasa, en l'absence de routes ou d'autres structures urbaines entraînant un ruissellement concentré, les risques d'occurrence d'un ravin sont minimes. En effet, 91% des méga ravins sont directement alimentés par une route ou une piste. De façon générale, il a été estimé que la construction de routes et le développement urbain précèdent de 5 à 10 ans l'apparition de ravins (Makanzu Imwangana et al., 2014). Par exemple, 281 des 308 méga ravins répertoriés en 2007 ont été précédés par l'aménagement d'une route ou d'une structure urbaine concentrant le ruissellement, alors que 27 se sont développés en aval d'une zone d'activité humaine (Imwangana et al., 2015). Actuellement, la pluviométrie critique pour le ravinement dans la haute ville de Kinshasa est de 24,9 mm avec une intensité moyenne de 21,8 mm h⁻¹ . (Imwangana et al., n.d.). L'absence de système de canalisation de l'eau est aussi un point de départ du phénomène de ravinement (Geyik, 1986).

3. MATERIEL ET METHODES

3.1. SITE ETUDIE

Le ravin étudié est communément appelé le ravin de « Kimwenza 7 km » en référence à la borne marquant le 7^{ème} km en partant du triangle du Campus (croisement avenue By-pass et la route de Kimwenza). Un marché improvisé s'étend de la tête du ravin jusqu'au premier carrefour en amont. Il est situé dans le quartier de Kimwenza dans la commune de Mont Ngafula. C'est un ravin avec une forme en V ; sa largeur varie de 10 à 25 m et sa profondeur est de l'ordre d'une quinzaine de mètres. Il s'étend sur près de 800 m et longe la route de Kimwenza sur près de 580 m (**figure 21**). Au moment de l'étude, il était encore actif et dépourvu de végétation. La délimitation de l'aire contributive du ravin en août 2021 fut réalisée par Monsieur Lutete sur base d'observations de la topographie et de l'identification des crêtes, du sens d'écoulement de l'eau ainsi qu'en questionnant les habitants. Le sol est de type sableux avec une cohésion quasi nulle et une faible teneur en matière organique. La surface contributive est de 18,7 ha et est comprise entre une altitude max de 488 m et 429 m (altitude de la tête du ravin) au-dessus du niveau de la mer. Elle est couverte à 15,5 % de bâtiments, à 31 % de sols nus, à 24,5 % de sols herbacés et à 29 % de surfaces arboricoles.

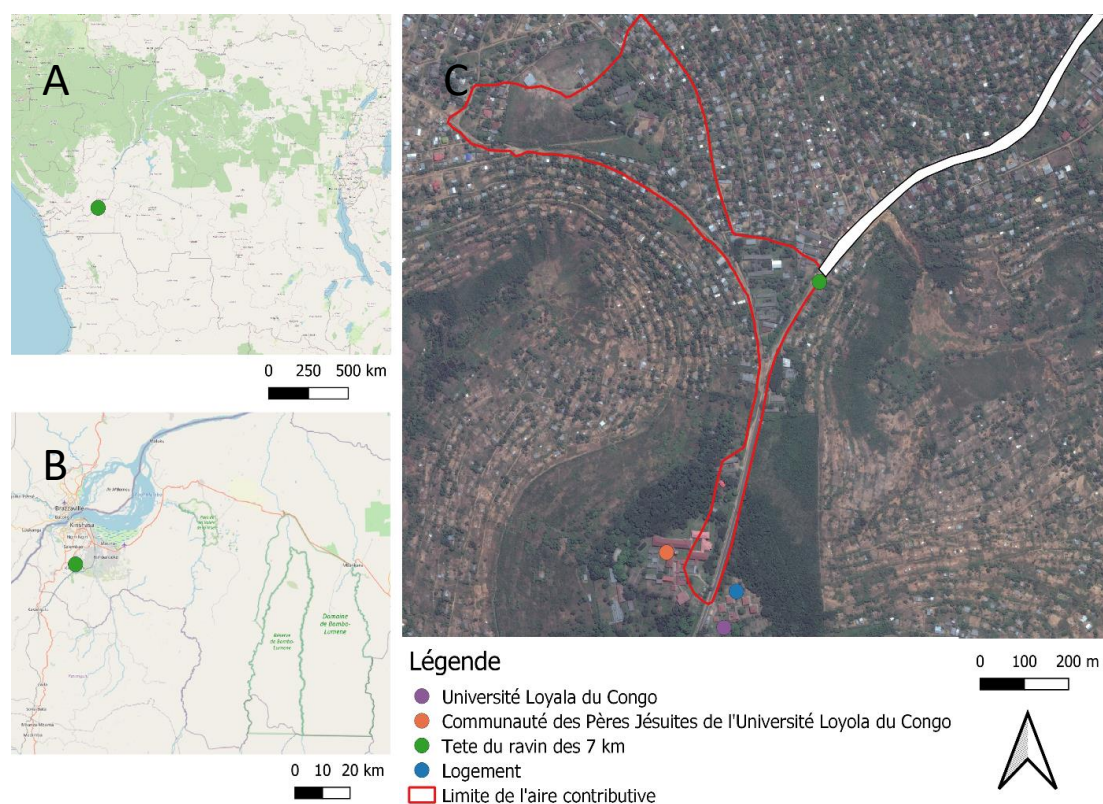


FIGURE 21 : Localisation (a) de la ville de Kinshasa en RDC, (b) du ravin des 7 km à Kinshasa (b) et (c) de la tête du ravin des 7 km, de son aire contributive, de l'Université Loyola du Congo et du lieu de logement

Le ravin des 7 km a fortement évolué au cours du temps ; la **figure 22** montre cette évolution. En 2002, la route de Kimwenza n'est pas encore l'objet d'un phénomène de ravinement (Fig. 22a). La première apparition d'un ravin dans la zone date de 2010 (Fig. 22b). Ce premier ravin, de type axial sur pente convergente, remonte la route de Kindele depuis le bas de la colline. Il est à noter qu'un autre ravin, non montré ici, est visible sur la même route mais sur la colline d'en face. Les deux ravins progressent jusqu'en 2011 où ils sont remblayés. Sur la **figure 22d**, il est visible qu'en janvier 2013 la route est à nouveau totalement praticable. Peu de changements sont observables jusqu'en avril 2017 où apparaît très clairement un ravin en bas de vallée (Fig. 22e). Ce ravin, d'abord perpendiculaire à la route, suit un angle droit pour venir se positionner dans l'axe de la route. Le ravin poursuit sa progression dans l'axe de la route jusqu'en août 2021, période de notre travail sur place (Fig. 22f). Aujourd'hui, le ravin a une fois de plus été remblayé.

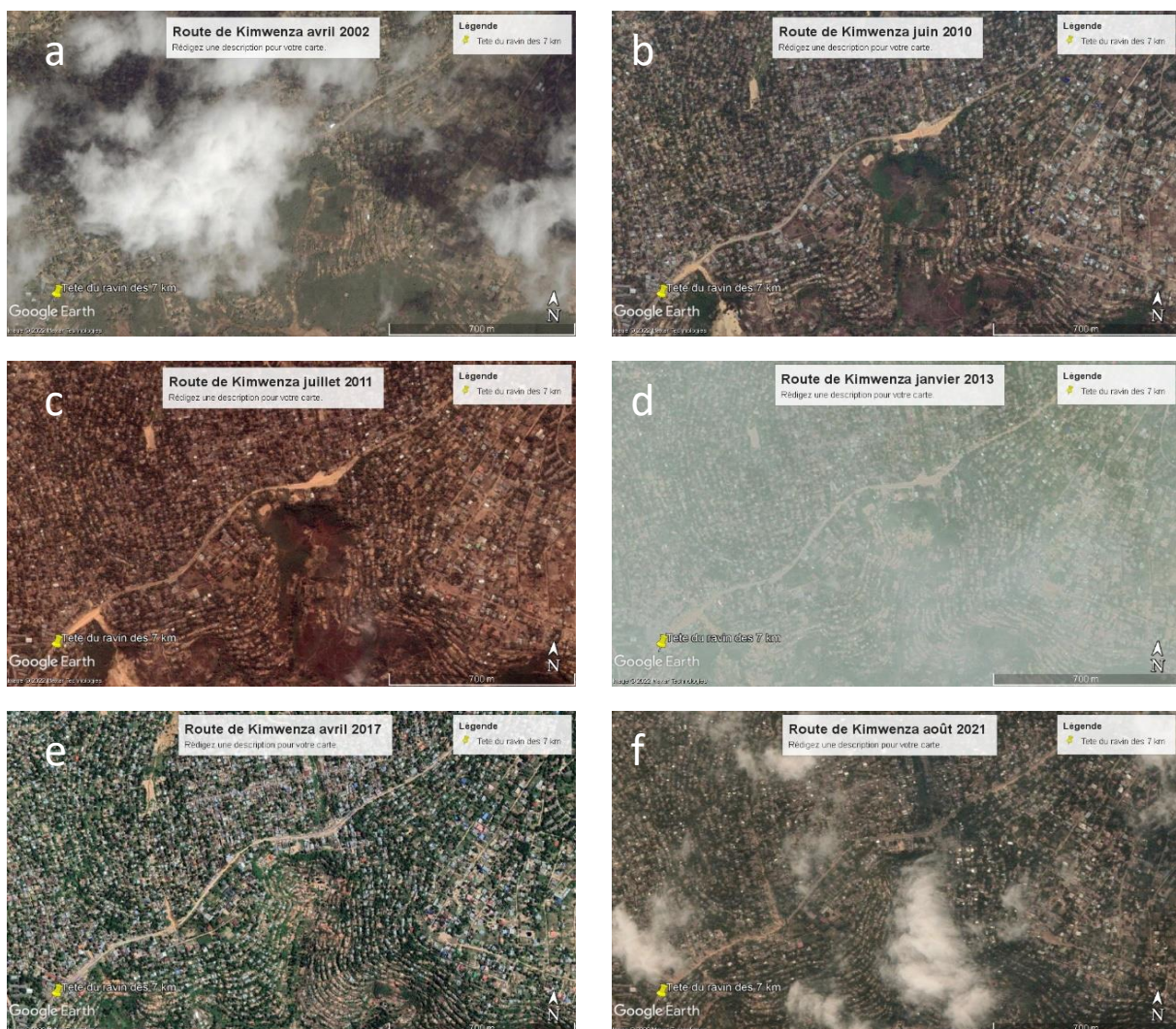


FIGURE 22 : Site du ravin des 7 km en (a) 2002, (b) 2010, (c) 2011, (d) 2013, (e) 2017 et (f) 2021 (Google Earth image de 2002 à 2021)

3.2. RECENSEMENT ET CARACTERISATION DES DIFFERENTS OUVRAGES ANTIEROSIFS PRESENTS DANS L'AIRE CONTRIBUTIVE

Un recensement de tous les ouvrages présents dans l'aire contributive fut effectué. Durant celui-ci, toutes les infrastructures de lutte antiérosive furent caractérisées : dimensions (longueur, largeur, profondeur/hauteur avec un mètre ruban), coordonnées géographiques et altitude à l'aide d'un GPS (GPSMAP64 GARMIN). Par la suite, une comparaison des différents ouvrages, via des photos, fut effectuée pour obtenir une appréciation de leur état général. Une note allant de 1, très mauvais état, à 5, état excellent, leur fut attribuée afin de représenter le niveau d'entretien de ces ouvrages au moment du relevé. D'autres informations telles que le nom de la personne qui a mis en place l'ouvrage, qui l'a financé, qui l'entretient furent aussi récoltées.

Toutes les données concernant la caractérisation des infrastructures antiérosives furent encodées dans Excel. Le volume de rétention d'eau total au sein de l'aire contributive fut calculé. Ce volume représente la quantité maximale d'eau qui pourrait être retenue à l'intérieur de l'aire contributive par les ouvrages de lutte antiérosive au moment des observations. Cela reste un volume potentiel car cette capacité de rétention ne sera atteinte que si le volume d'eau qui converge vers les ouvrages considérés est suffisant pour les remplir. Ensuite, une estimation d'un volume potentiel maximal total de rétention fut calculée. Ce volume estimé correspond au volume de rétention dans le cas où tous les ouvrages de rétention seraient dans un état général excellent. Il se base sur une corrélation entre les dimensions des ouvrages et la profondeur pour des ouvrages bien entretenus, en faisant l'hypothèse que seule la profondeur des ouvrages variait en fonction de son état général.

3.3. TYPES DE SURFACES PRESENTES SUR LE SITE

En parcourant l'aire contributive du ravin, différents types de surfaces ont été recensés. Elles ont été distinguées sur base de leurs probables différences en termes de taux d'infiltration, en lien avec leur couverture végétale et leur degré de perturbation anthropique.

3.4. MESURES D'INFILTRATION

3.4.1. INFILTROMETRE DOUBLE ANNEAU

Etant donné la difficulté de faire parvenir un infiltromètre à Kinshasa, l'appareillage utilisé fut fabriqué sur place (**figure 23**). Il est constitué de deux anneaux de 25 cm de hauteur et, respectivement, 25,5 et 55 cm de diamètre.



FIGURE 23 : *Infiltromètre double anneaux utilisé*

3.4.2. METHODE

L'anneau central puis l'anneau périphérique étaient enfoncés de 5 cm dans le sol à l'aide de pierres trouvées sur place et de morceaux de bois pour amortir les chocs. La profondeur pouvait varier légèrement d'un côté à l'autre de l'appareillage à cause de la pente mais la profondeur minimale d'ancrage était de 5 cm. Il était parfois utile de compacter légèrement la terre à l'extérieur de l'anneau périphérique pour empêcher l'eau de passer en-dessous. Ensuite une feuille plastique ou une éponge était positionnée au point d'impact du versement afin de ne pas altérer la surface du sol durant le remplissage. Il fallait alors remplir la partie périphérique, entre les deux cylindres, et puis la partie centrale. Enfin, la dernière étape consistait à laisser descendre la lame d'eau du cylindre central de 2 cm en prenant note du temps écoulé (chronomètre) tous les 0,5 cm infiltré. La hauteur d'eau était maintenue constante et plus ou moins égale dans la zone périphérique. La différence de pression d'eau engendrée par la différence de 2 cm de hauteur de la lame a été considérée comme

négligeable compte tenu de l'épaisseur de la lame d'eau dans les anneaux (voir §1.4.3). L'expérience s'achevait lorsque les laps de temps nécessaires à l'infiltration de 0,5 cm d'eau pouvaient être considérés comme constants sur au moins 4 à 5 mesures. Normalement, la procédure aurait dû être réalisée à trois reprises à chaque endroit. Cependant, compte tenu du temps et de la quantité d'eau nécessaire (difficultés d'approvisionnement et d'acheminement) pour chaque mesure, la procédure ne fut réalisée qu'une seule fois.

Quatre bidons d'eau de 25 L et un grand contenant de 35 L furent utilisés pour transporter et stocker l'eau. Le temps d'écoulement de 0,5 cm d'eau fut chronométré grâce à un smartphone et l'emplacement des mesures fut enregistré grâce au GPS.

3.4.3. CAPACITE D'INFILTRATION DES SURFACES

Pour chaque type de surface (*paragraphe 3.3*), 7 mesures d'infiltration furent réalisées. Elles se déroulèrent de manière à couvrir au mieux l'aire contributive, dans le respect des Kinois. La hauteur d'eau utilisée variait légèrement d'une mesure à l'autre. La lame d'eau initiale moyenne employée pour les mesures d'infiltration des surfaces est de $19,1 \pm 1.43$ cm (moyenne $\pm$ écart-type). Cette variabilité est due à une erreur de compréhension lors de la prise des mesures et engendre une première incertitude quant à leur interprétation.

Suite à une incompréhension concernant la méthode à suivre, la lame d'eau n'a pas été maintenue constante lors des premières mesures d'infiltration réalisées sur les surfaces. Le cylindre central était rempli jusque 20 cm de hauteur et puis l'eau s'infiltrait jusqu'à atteindre le sol pendant que le temps d'infiltration était enregistré tous les centimètres. L'infiltration ne s'est donc pas faite à charge constante mais bien à charge variable. Une corrélation entre les données issues de la méthode à niveau variable et celles issues de la méthode à niveau constant fut trouvée pour pallier à cette erreur. Cette corrélation se base sur certains points de mesure où les deux méthodes furent appliquées par la suite. Cela engendre une seconde incertitude pour l'interprétation des résultats.

Traitement des données

Après encodage dans Excel, tous les temps associés aux premiers 0,5 cm après remplissage furent mis de côté car une erreur systémique certainement due à une imprécision de manipulation y fut décelée. Les temps liés aux 0,5 cm suivant furent agrégés par pas de 1,5 cm afin de lisser les micro-variations engendrées par une imprécision humaine lors d'une même prise de mesure. La **figure 24** illustre les résultats après ces deux opérations. Ensuite, le taux d'infiltration moyen fut calculé sur base du temps d'infiltration des 3 derniers centimètres et demi. Enfin, un taux d'infiltration moyen par type de surface fut calculé.

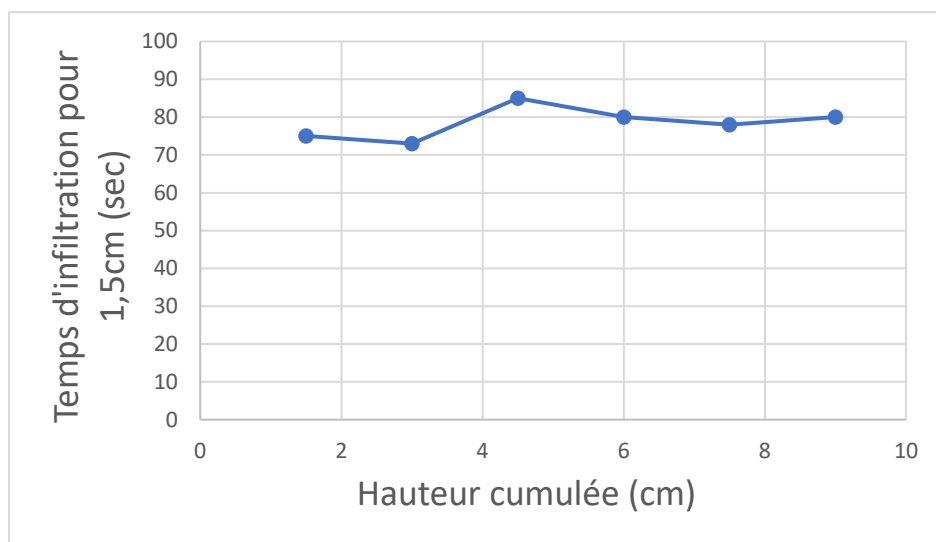


FIGURE 24 : *Temps d'infiltration pour 1,5 cm d'infiltration en fonction de la hauteur d'eau cumulée infiltrée pour la surface herbacée peu perturbée n°7*

Comme expliqué précédemment, certaines mesures d'infiltration ont été réalisées suivant une mauvaise méthodologie. Lors des mesures à charge constante, le taux d'infiltration final correspond à une charge d'env. 19 cm. Lors des mesures à charge variable, le taux d'infiltration final correspond à une lame d'eau d'environ 4 cm. Il y a donc une sous-estimation du taux d'infiltration à charge variable par rapport au taux d'infiltration à charge constante. La corrélation suivante (**figure 25**) vise à rendre les données à charge variable exploitables par le biais d'une corrélation entre les valeurs d'infiltration issues de la méthode à niveau variable et celles issues de la méthode à niveau constant. La corrélation a un R^2 égal à 0,988. Sur base de cette corrélation, une valeur d'infiltration corrigée pour les mesures ayant été effectuées selon la méthode à niveau variable a pu être calculée. Elle se base sur 8 prises de mesures auxquelles les deux méthodes furent appliquées (**figure 26**).

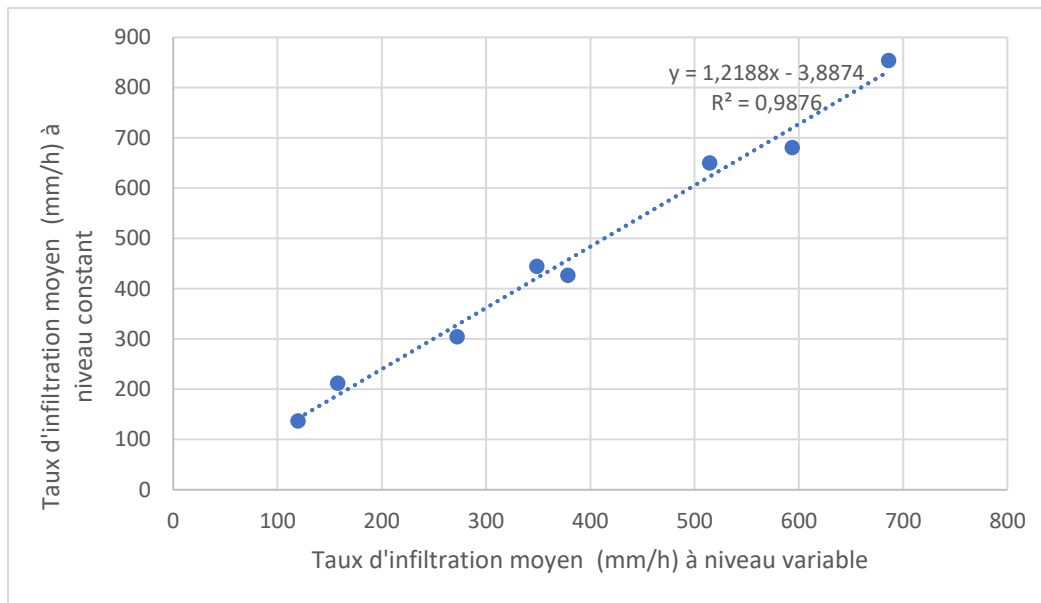


FIGURE 25 : *Corrélation entre le taux d'infiltration final (mm/h) à niveau constant et le taux d'infiltration moyen (mm/h) à niveau variable*

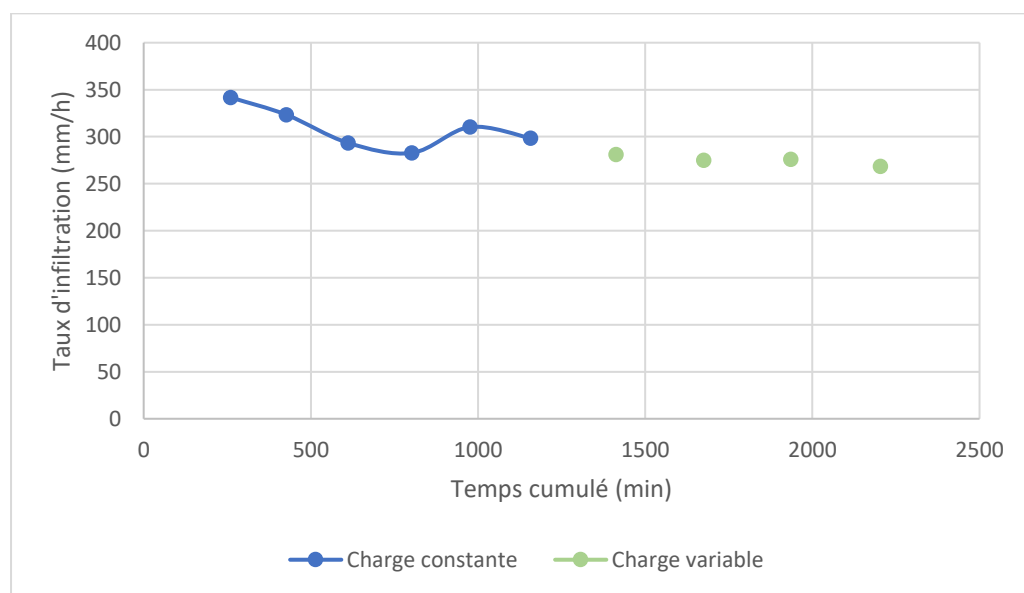


FIGURE 26 : *Taux d'infiltration en fonction du temps cumulé d'infiltration à niveau d'eau constant (en bleu) et variable (en vert) pour la surface cours n°4.*

Enfin, un test de Student fut réalisé sur les taux d'infiltration des surfaces. L'objectif de cette étape est de comparer l'infiltration des différentes surfaces et des différents ouvrages afin de voir si ceux-ci sont bien différents les uns par rapport aux autres.

3.4.4. CAPACITE D'INFILTRATION DES OUVRAGES

Certains ouvrages influencent l'infiltration de l'eau au sein de l'aire contributive. Ils sont au nombre de 2 types (bassins et murs de sacs de sable), dont l'un (bassins) fut subdivisé en 3 catégories compte tenu d'une grande variation de leur état général. Au total, 21 mesures d'infiltration furent effectuées. Le choix des ouvrages où furent réalisées des mesures d'infiltration se base principalement sur leur représentativité de l'ensemble des ouvrages considérés. Les coordonnées du positionnement de ces ouvrages furent recueillies à l'aide du GPS. Comme pour les mesures d'infiltration des surfaces, la hauteur d'eau utilisée variait légèrement d'une mesure à l'autre. La lame d'eau initiale moyenne utilisée pour les mesures d'infiltration des ouvrages est de $14,65 \pm 2,32$ cm.

Toutes les prises de mesure d'infiltration concernant les ouvrages furent réalisées selon la méthode à niveau constant. Aucune correction n'est donc à apporter concernant la méthode employée. Hormis cette différence, le traitement de données est identique à celui des surfaces.

3.5. INTERVIEWS « MICRO-TROTTOIR »

Lors du séjour, 20 interviews furent réalisées. Les personnes interviewées étaient des habitants de Kimwenza qui vivaient ou avaient une échoppe à proximité de la tête du ravin. Les interviews furent menées selon un gradient distanciel par rapport à la tête du ravin afin d'estimer si la distance par rapport à celle-ci influençait les réponses. Le but était d'avoir une idée sur le vécu des conséquences du phénomène de ravinement dans le quotidien des Kinois. Elles furent réalisées grâce à un enregistreur et les coordonnées géographiques des lieux d'interview, maisons ou échoppes, furent retenues à l'aide du GPS. Les personnes interviewées eurent toutes la gentillesse de parler français.

Les questions posées étaient les suivantes :

1. A quelle distance habitez-vous du ravin le plus proche ? (GPS)
2. Avez-vous déjà été victime et/ou témoin du phénomène de ravinement ?
Si oui quand ? + description
3. Pensez-vous qu'il est possible que vous subissiez les conséquences néfastes d'un ravin ? Si oui, à quelle échéance ?
4. Avez-vous déjà participé à la mise en place d'infrastructures de lutte contre l'érosion ? Si oui lesquelles et quand ?
5. Ces infrastructures ont-elles été installées avant ou après la formation du ravin ?
6. Avez-vous une ou plusieurs infrastructures de ce type chez vous ? Si oui lesquelles ?

7. Qu'est ce qui a motivé votre choix du type d'infrastructure ?
8. Quel est l'impact de ces infrastructures dans la réduction du ruissellement ?
9. Quel budget avez-vous investi pour la mise en place de ces ouvrages ?

3.5.1. MODELISATION DES COURANTS D'EAU DE SURFACE

Cette modélisation a été faite sur base d'un programme appelé : « Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2 ». SWMM est un modèle dynamique de simulation de pluie et de ruissellement utilisé pour la simulation d'un événement pluvieux unique ou du ruissellement à long terme provenant de zones urbaines. Le principe du modèle consiste en une division de l'aire contributive en un ensemble de sous-unités. Ces sous-unités de l'aire contributive sont définies sur base d'une pluviométrie, d'une infiltration et d'un exutoire communs. C'est-à-dire, au sein d'une sous aire, les valeurs de pluviométrie et d'infiltration sont considérées comme homogènes, et l'eau qui y ruisselle s'échappe par la même sortie. Ce modèle possède l'avantage de prendre en compte une potentielle infiltration, dans des sous-unités situées en aval, du ruissellement quittant une sous-unité vers l'exutoire final de l'aire contributive.

Sur base d'une image satellite, l'aire contributive fut divisée en 220 sous-unités. Chacune d'entre elle fut associée à une valeur d'infiltration correspondant à l'infiltration de la surface qui y est majoritairement dominante. Afin de calculer l'aire et le pourcentage de surface imperméable de chaque sous-unité, la couche réalisée dans SWMM fut exportée et géoréférencée dans QGIS. Le pourcentage de surface imperméable correspond à la superficie des bâtiments. A l'exception de certaines sous-unités particulièrement pentues, la valeur de pente encodée pour chaque sous-unités fut la pente moyenne de l'aire contributive, c-à-d 10%. En ce qui concerne le coefficient de rugosité de Manning-Strickler, une valeur de 0,024 fut utilisée pour les surfaces imperméables. Cela correspond au coefficient de rugosité des surfaces métalliques ondulées dont sont composés les toits des bâtiments. Un coefficient de rugosité de 0,05, correspondant aux surfaces non cultivées, fut appliqué aux autres surfaces et de 0,011 pour la route asphaltée de Kimwenza (Telliez Marion, 2010).

Le modèle d'infiltration choisi fut le modèle de Green Ampt. Ce modèle décrit d'une manière simplifiée le mouvement de l'eau dans le sol sur base de sa conductivité hydraulique à saturation, de son potentiel de succion et de sa capacité au champ. Dans ce cas, la conductivité hydraulique dépend du type de surface, le potentiel de succion et la capacité au champ considérés sont ceux d'un sol à texture sableuse, soit, respectivement -49 mm et 6 % (Telliez Marion, 2010).

Une fois toutes les sous-unités de l'aire contributive dessinées et caractérisées, des unités appelées « junctions nodes » sont ajoutées au point correspondant à l'exutoire de

chaque sous-unité. Ces jonctions collectent l'eau qui ruisselle en dehors de chaque sous-unité. Ensuite, ces jonctions sont reliées à d'autres jonctions et ainsi de suite jusqu'à l'exutoire de l'aire contributive. Lorsqu'une jonction est située sur une zone, cela signifie que l'eau qui passe par cette jonction ruisselle sur cette zone et peut dès lors s'y infiltrer. Les liens entre les différentes jonctions sont assurés par des conduits. Ces conduits sont considérés comme étant les routes. Ils ont donc un coefficient de rugosité de 0.05, une profondeur de 1 m, une largeur de 4 m et sont de forme rectangulaire.

Le modèle choisi de ruissellement de l'eau dans le réseau est le modèle de l'onde cinématique. Il permet de prendre en compte une variation du débit et de la lame d'eau à la fois dans le temps et dans l'espace. Théoriquement ce modèle fournit les résultats les plus précis. Dans les conduits, les pertes de charge liées à la hauteur d'eau et au débit se basent sur la formule de Hazen-Williams. Enfin, des unités permettant de prendre en compte la présence d'ouvrages de rétention d'eau de ruissellement peuvent être ajoutées. Ces unités sont positionnées grâce aux coordonnées géographiques dans l'aire contributive. Ils captent l'eau provenant de la sous-aire dans laquelle ils se situent mais aussi l'eau des sous-aires situées en amont dont le ruissellement se déverse dans l'ouvrage. Chaque ouvrage possède un volume propre lié à ses dimensions et à sa forme. Ces ouvrages représentent les bassins de rétention et les cuves présents dans l'aire contributive.

Différents tests furent réalisés : des tests avec et sans les ouvrages de rétention et avec deux pluviométries différentes. La première correspond à une pluie d'intensité banale à Kinshasa, soit 10 mm pour une période de un jour (Makanzu et al., n.d.). Ici, nous avons considéré que cette pluie dure une heure et a donc une intensité constante de 10 mm/h. La seconde correspond à une pluie anormale d'un temps de retour de 20 ans. Cette pluie dure une heure et a une intensité de 78,9 mm/h. Tous les tests s'étalent sur une durée de 23 heures.

Le **figure 27** montre la division de l'aire contributive du ravin de 7 km en sous-unités. La **figure 28** donne un exemple des sous-unités liées entre-elles par les conduits et les jonctions avec la présence d'ouvrages de rétention.

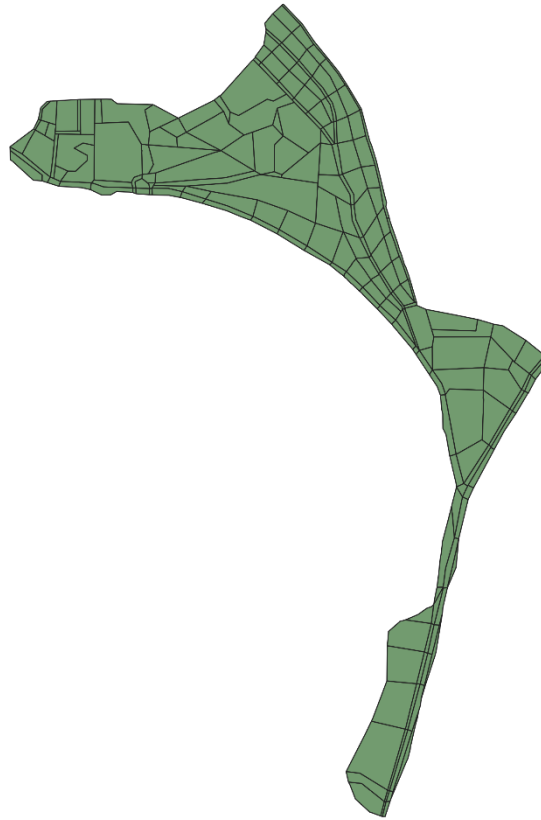


FIGURE 27 : *Subdivision de l'aire contributive en sous-unités (QGIS)*

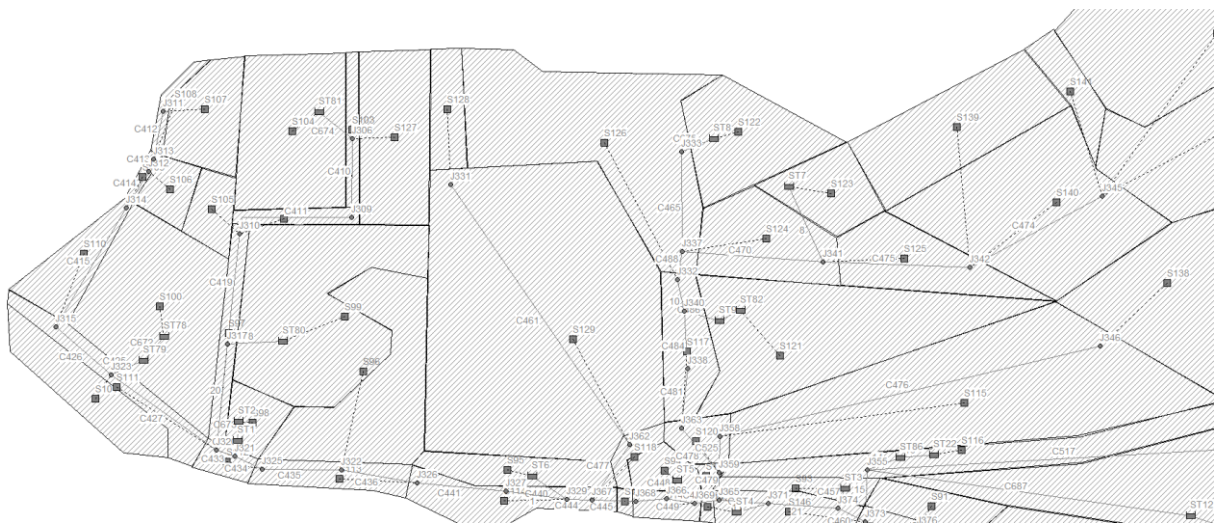


FIGURE 28 : *Partie ouest de l'aire contributive comme représentée dans SWMM avec présence d'ouvrages de rétention. Les jonctions (J) sont symbolisés par des points, les carrés (S) représentent les sous-unités de l'aire contributive, les lignes continues (C) correspondent aux conduits et les rectangles (ST) aux ouvrages de rétention d'eau.*

4. RÉSULTATS

4.1. RECENSEMENT ET CARACTÉRISATION DES OUVRAGES DE LUTTE ANTIÉROSIVE PRÉSENTS DANS L'aire CONTRIBUTIVE

Les différents ouvrages présents dans la zone sont les suivants : des bassins de rétention, des murs et des sols de sacs de sable, un mur de terre, des barrages, mais aussi d'autres ouvrages très astucieux tels que l'enfouissement de carcasses de voitures pour protéger le sol de l'incision à un endroit à haut risque. Il n'y a aucun aménagement dans la partie sud de l'aire contributive, majoritairement occupée par l'Université Loyola du Congo.

Bassins de rétention

Les bassins de rétention englobent l'ensemble des trous creusés ayant pour objectif de retenir de l'eau de pluie et donc de diminuer le ruissellement et par extension le débit d'eau qui se déverse dans le ravin. 88 bassins furent recensés dans l'aire contributive du ravin des 7 km. Leur volume de rétention est très variable ; de moins d'un mètre cube à 63,5 m³ pour le plus grand. Un exemple de bassin est visible sur la **figure 29**. Une grande majorité des bassins présents possèdent un volume de rétention faible (**figure 30**), seulement 5 bassins possédaient un volume de rétention supérieur à 20 m³. Le volume moyen est de 6,6± 9,7 m³. Le volume total d'eau pouvant être retenu par des bassins sur l'aire contributive s'élève à 580 m³. Leur état général est aussi très variable (**figure 31**). Seulement 10 bassins furent considérés en excellent état d'entretien et 16 en très mauvais état. La **figure 32** montre la localisation de tous les ouvrages de lutte antiérosives répertoriés dans la zone au moment de l'étude.



FIGURE 29 : Bassin de rétention avec la Maman qui l'a creusé et qui l'entretient
(photographie prise à Kimwenza)

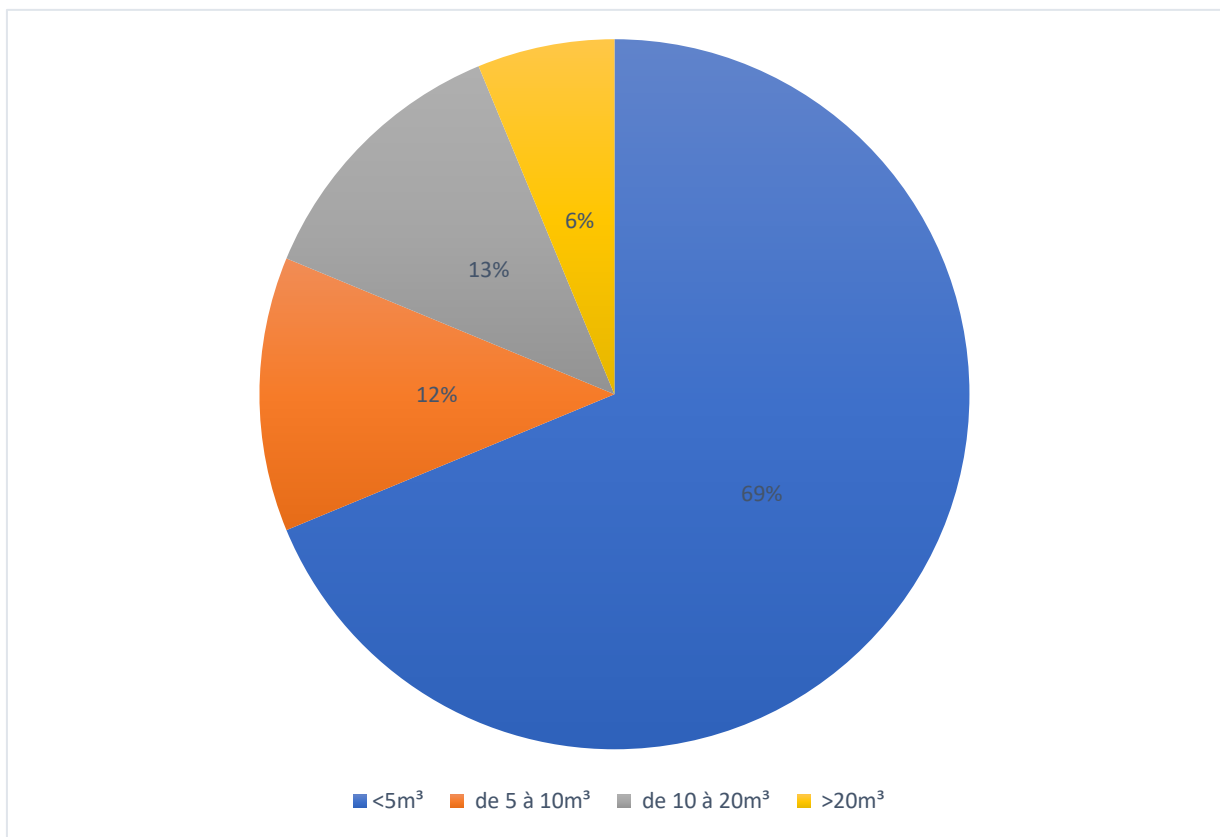


FIGURE 30 : *Proportion des différents volumes de rétention des bassins présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km*

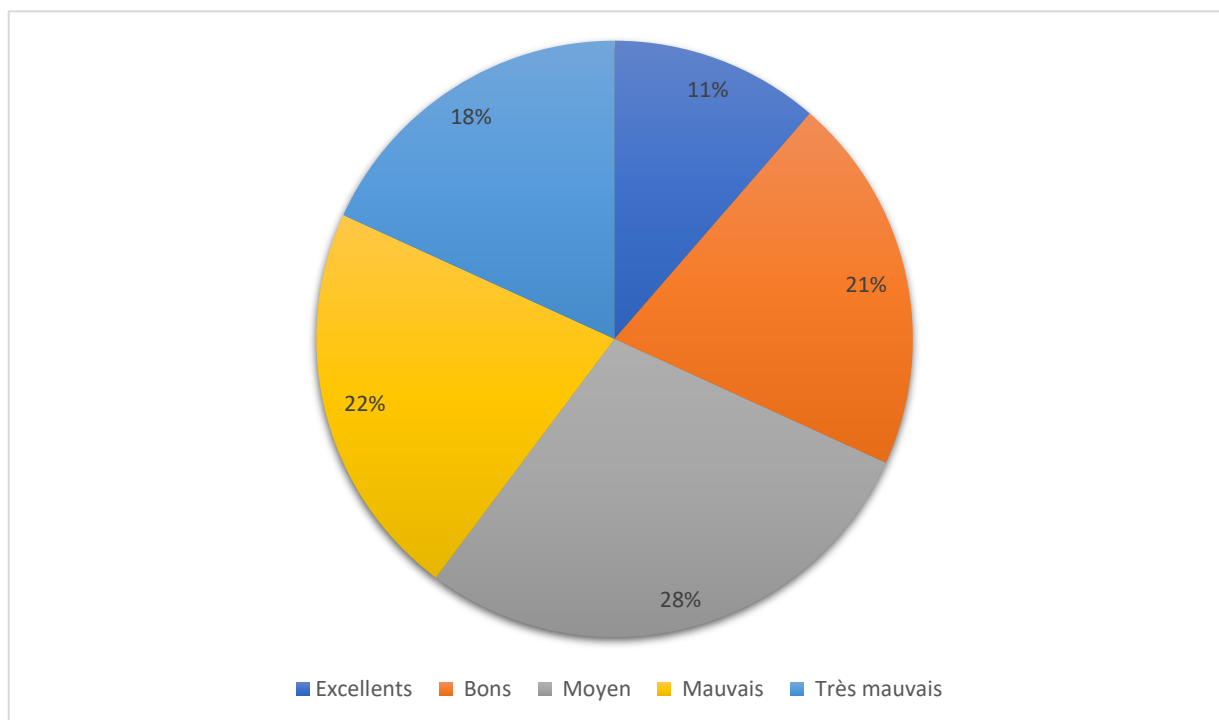


FIGURE 31 : *Proportion des bassins de rétention présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km en fonction de leur état*

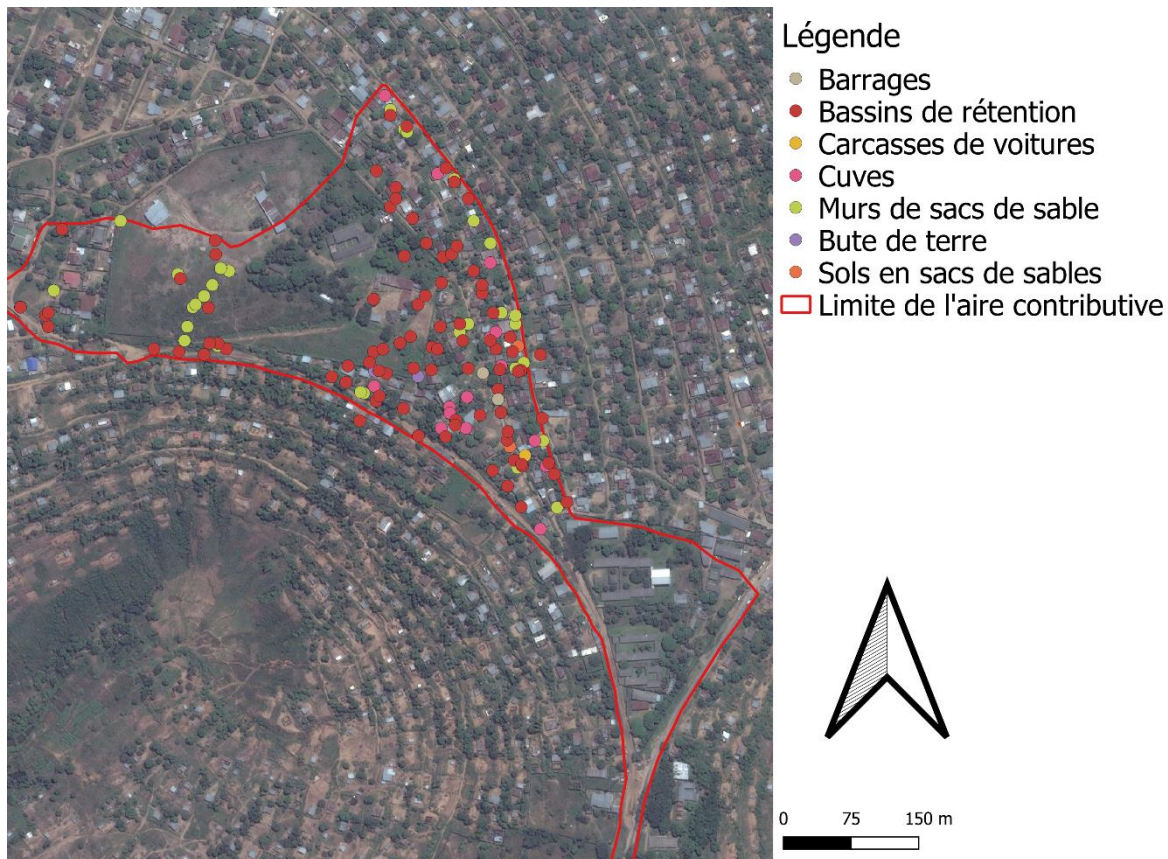


FIGURE 32 : Localisation des ouvrages de lutte antiérosives présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km

Les interviews indiquent que les bassins sont creusés et entretenus par les propriétaires/locataires de la parcelle où ils se trouvent. Concernant les bassins en bordure de route, ils sont creusés et entretenus par des personnes habitant à proximité. Les habitants qui souhaitent mettre en place une infrastructure de lutte antiérosive choisissent souvent, par défaut, un bassin, par manque de connaissance dans le domaine et parce qu'il s'agit d'une mesure qui ne nécessite pas d'apport financier.

Murs de sacs de sable

Un total de 34 murs de sacs de sable furent caractérisés dans l'aire contributive. La **figure 33** montre un exemple de mur de sacs de sable. Leur longueur moyenne est de $3 \pm 2,1$ m et leur hauteur moyenne est de $16,3 \pm 12,7$ cm. Leur état général est en majorité moyen ou mauvais (**figure 34**). Ils sont tous mis en place chez et par des particuliers, à leur propres frais. Le prix d'un sac de sable est généralement de l'ordre de 500FC (2000FC=1\$).



FIGURE 33 : Mur de sacs de sable (photographie prise à Kimwenza)

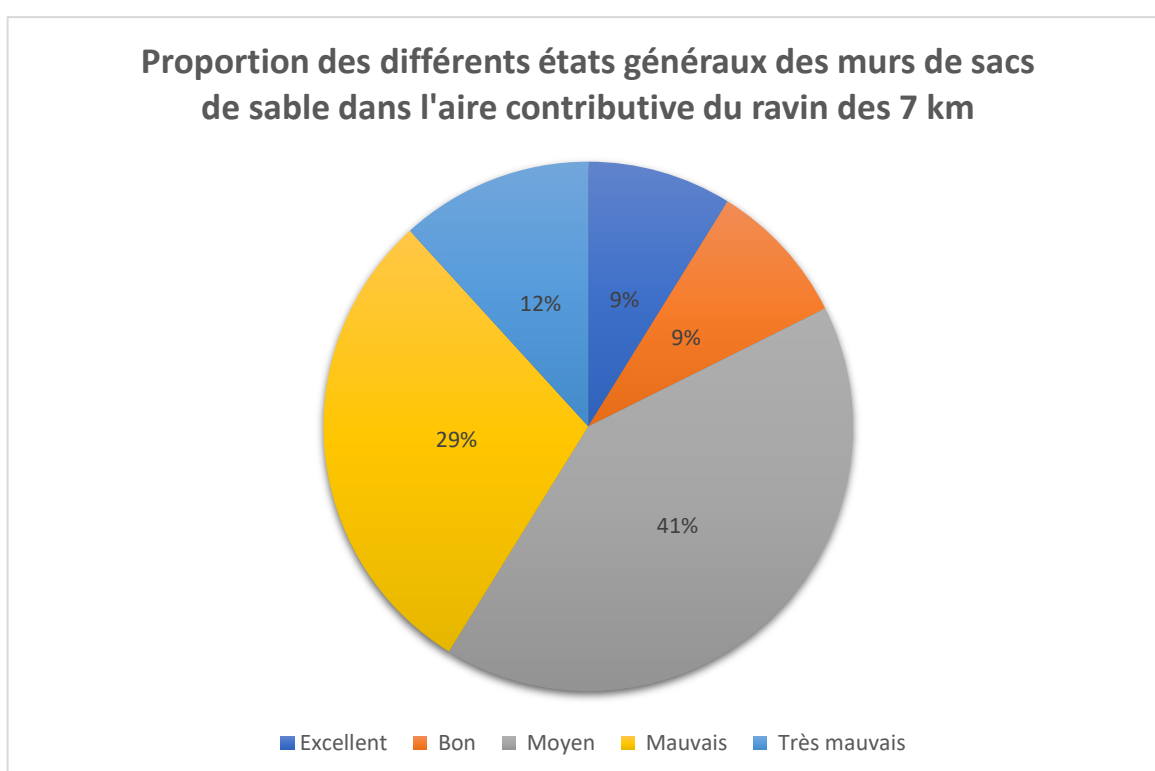


FIGURE 34 : Proportion des différents états généraux des murs de sacs de sable présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km

Cuves

Les cuves sont des réservoirs d'eau construits en béton qui récoltent l'eau des toits. Elles sont situées sur des terrains privés. Elles peuvent être enfouies ou à la surface. Leur coût moyen est de l'ordre de plusieurs centaines de dollars. Un exemple est visible sur la **figure 35**. Elles sont au nombre de 15 dans l'aire contributive. Leur état général est globalement bon ; 13 sont en excellent état. Il est à noter que toutes les cuves répertoriées sont à leur volume de rétention maximal, quel que soit leur état général. Leur volume de rétention moyen est de 7,34 m³ avec un écart-type de 5,73 m³. Le volume d'eau total pouvant être retenu par les cuves présentes est de 110 m³.



FIGURE 35 : Cuve (photographie prise à Kimwenza)

Autres ouvrages présents

Quatre autres types d'ouvrages sont présents dans l'aire contributive (**figure 36**). Parmi ceux-ci, une butte de terre dont la hauteur de plusieurs dizaines de centimètres varie d'un point à l'autre. Il s'étend sur 49 m. Deux barrages ont aussi été caractérisés. Il s'agit de murs de 12 m de long fait de blocs de béton partiellement enterrés dans le sol d'une route perpendiculairement à son axe. Deux revêtements faits de sacs de sable ont aussi été réalisés dans la zone. Ils sont situés à des endroits où le risque d'érosion est élevé. Ici, ils sont situés sur les routes dont ils permettent de maintenir l'utilisation.

Le dernier type d'ouvrage recensé est plus insolite. Il s'agit de deux châssis de voiture et d'un châssis de camion, enfouis et superposés pour stabiliser le sol d'une route. Cet ouvrage étant

complètement enterré, il fut impossible de le prendre en photo. Il se peut que d'autres ouvrages de ce genre soient présents dans la zone mais n'ont pas été répertoriés car invisibles.



FIGURE 36 : (a) *Mur de terre*, (b) *revêtement en sacs de sable* et (c) *barrage* (photographie prise à Kimwenza)

4.2. CAPACITÉ DE RÉTENTION TOTALE ACTUELLE ET POTENTIELLE MAXIMUM

Dans cette partie seuls les ouvrages dont la vocation est de stocker une quantité élevée d'eaux de ruissellement seront pris en compte : les bassins de rétention et les cuves. L'objectif est d'estimer la quantité totale d'eau de ruissellement qui serait retenue par ces infrastructures de rétention d'eau si elles étaient toutes en excellent état, c'est-à-dire si leur entretien était parfait.

Le volume de rétention total des cuves est de 110 m³. Il est considéré comme maximal dans le sens où l'état général des cuves n'influence pas leur capacité à retenir de l'eau. Le seul moyen pour augmenter ce volume est de construire de nouvelles cuves.

Le volume de rétention total actuel (au moment des observations) des bassins présents dans l'aire contributive est de 580 m³. Pour les bassins mal entretenus, une perte de capacité est probable suite à l'ensablement, l'accumulation de déchets, etc. Nous faisons l'hypothèse que la longueur et la largeur (donc la surface) des bassins ne dépendent pas de l'état général. Seule la profondeur des bassins est jugée variable et affectée par l'état général. Nous avons ensuite cherché à déterminer s'il existait une relation entre les dimensions de surface des bassins et leur profondeur pour les bassins en excellent état. La corrélation la plus pertinente, c'est-à-dire avec le R² le plus élevé (ici, R²=0,88), fut trouvée entre le rapport surface-profondeur du bassin et sa surface pour les bassins en excellent état d'entretien (**figure 37**). Il est à noter qu'un R² aussi élevé provient dans ce cas entre autre du fait que la même variable (surface) est utilisée en X et en Y. Cette corrélation rend néanmoins possible une estimation de la profondeur et donc du volume de tous les bassins s'ils avaient tous été parfaitement entretenus. A titre d'exemple, la **figure 38** met en évidence la différence entre la capacité de stockage réelle et potentielle maximum pour les bassins de niveau 2 (en mauvais état d'entretien). Pour tous les bassins, sauf le n°9, le volume potentiel estimé est plus élevé que le volume réel. La **figure 39** reprend le stockage réel et potentiel des bassins pour chaque niveau d'état général, les volumes de rétention des ouvrages pour chaque état général sont additionnés. Les volumes de rétention potentiels sont plus faibles que les volumes de rétention réels pour les bassins de niveau excellent et bon. Selon cette corrélation, le volume potentiel maximum de rétention d'eau des bassins présents est de 686 m³, soit environ 106 m³ de plus que le volume réel au moment de l'étude. En prenant en compte l'eau retenue dans les cuves, la capacité de stockage potentielle totale dans l'aire contributive du ravin serait de 796 m³.

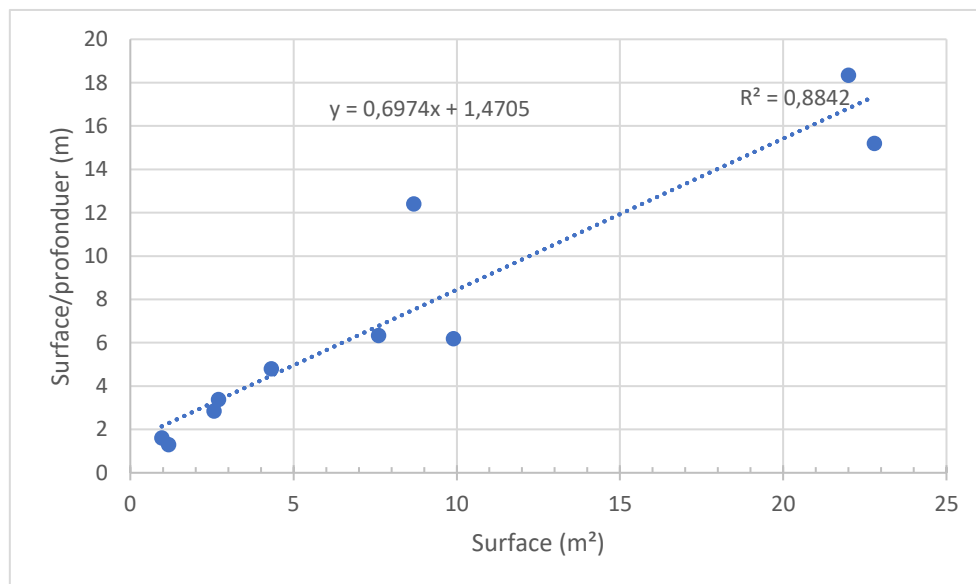


FIGURE 37 : *Corrélation entre le rapport surface/profondeur et la surface pour les bassins en excellent état d'entretien.*

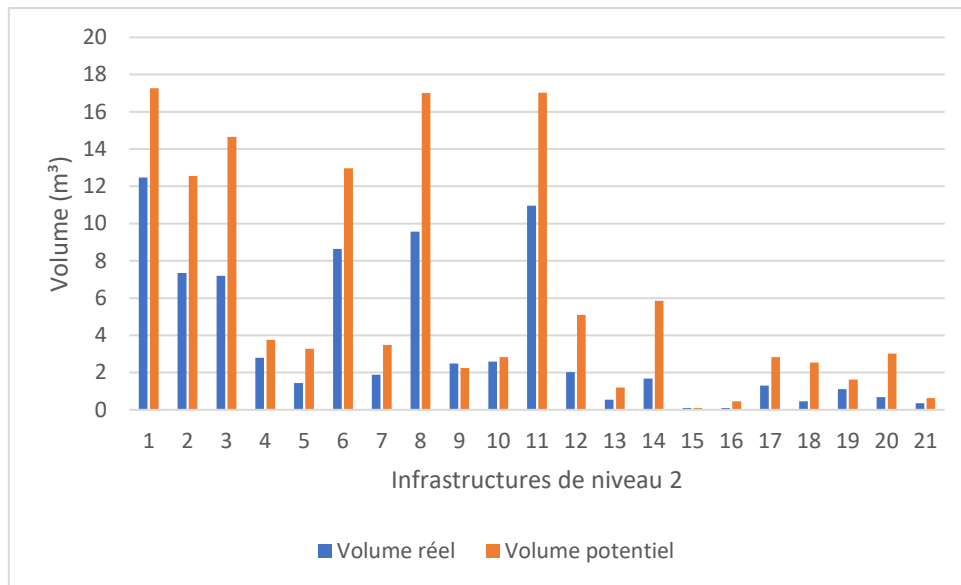


FIGURE 38 : *Différence entre le volume réel et potentiel maximum pour les bassins en mauvais état d'entretien (niveau 2)*

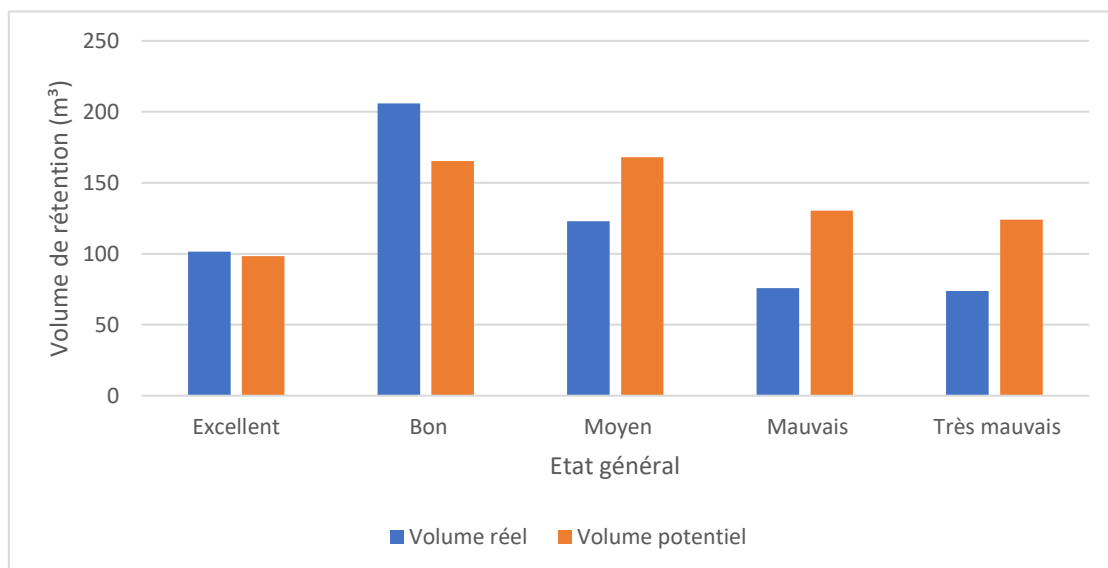


FIGURE 39 : *Capacité de stockage réel et potentiel des bassins pour chaque niveau d'état général*

4.3. INFILTRATION DES SURFACES

Surfaces identifiées

Cinq types de surface ont été identifiés (**figure 40**) : surfaces herbacées peu perturbées, herbacées perturbées, non-herbacées perturbées, routes et cours. Les surfaces herbacées perturbées désignent l'ensemble des surfaces qui sont recouvertes d'une végétation herbacée que l'activité humaine n'a que peu modifiée. Il peut s'agir d'une bordure de route peu empruntée par des piétons ou un pan de parcelle trop en pente pour être utilisée. Les surfaces herbacées perturbées comprennent l'ensemble des surfaces recouvertes d'herbe mais où des traces de l'activité humaine sont visibles, principalement des lieux de passage de piétons. Les surfaces non-herbacées perturbées couvrent la mosaïque de surfaces non-herbacées qui ne sont ni des routes, ni des cours. Cela peut être, par exemple, un trottoir sans revêtement, un fond de canal creusé par l'eau ou une cour de récréation. Les surfaces de type route représentent l'ensemble des routes, avenues et chemins présents dans l'aire contributive. Elles sont caractérisées par une fréquentation élevée de passants et de véhicules motorisés. Enfin, les surfaces de type cour comprennent l'ensemble des surfaces non recouvertes de végétation à proximité des habitations. Elles sont généralement fortement tassées. La **figure 41** montre la proportion des différentes surfaces au sein de l'aire contributive. Elle prend en comptes la portion de l'aire contributive occupée par la route de Kimwenza qui est asphaltée et donc imperméable.



FIGURE 40 : Différents types de surfaces identifiés dans l'aire contributive (de gauche à droite) : herbacée peu perturbée, herbacée perturbée, route, cours et non-herbacée perturbée

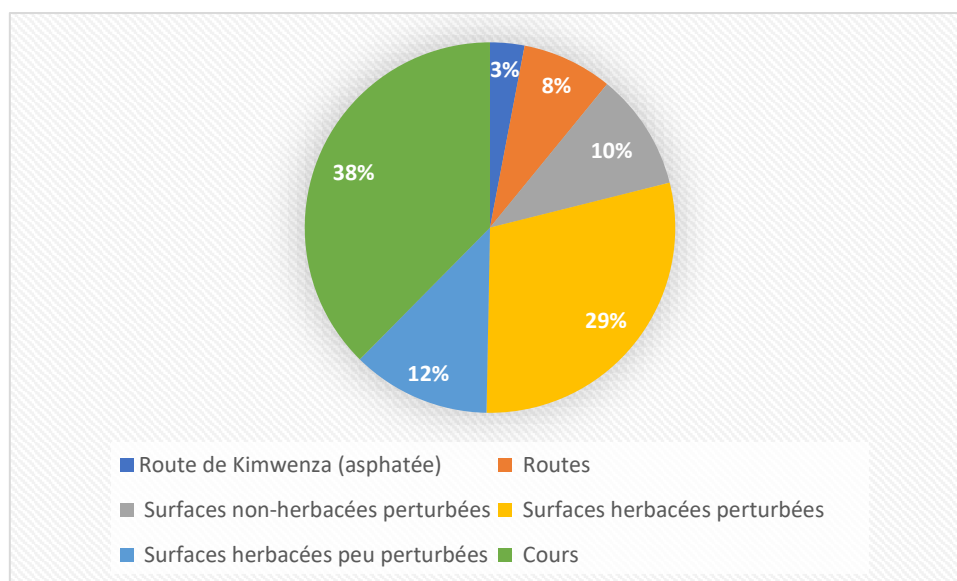


FIGURE 41 : *Proportion des différents types de surfaces présents dans l'aire contributive*

Taux d'infiltration moyen des surfaces

Les taux d'infiltration suivants se basent uniquement sur les valeurs d'infiltration à niveau constant, mesurées ou estimées sur base des mesures à niveau variable (Fig. 26). Au total 34 prises de mesures furent effectuées, 7 par type de surface, sauf pour les cours qui ne comptent que 6 prises de mesures car l'une d'entre elles fut jugée non fiable. La **figure 42** montre leur emplacement au sein de l'aire contributive. Les taux d'infiltration moyen des surfaces sont respectivement de 834 mm/h (écart-type : 432 mm/h) pour les surfaces herbacées peu perturbées, 411 mm/h (écart-type : 281 mm/h) pour les surfaces herbacées perturbées, 280 mm/h (écart-type : 138 mm/h) pour les cours, 99 mm/h (écart-type : 43 mm/h) pour les routes et 140 mm/h (écart-type : 70 mm/h) pour les surfaces non-herbacées perturbées (Fig. 42).

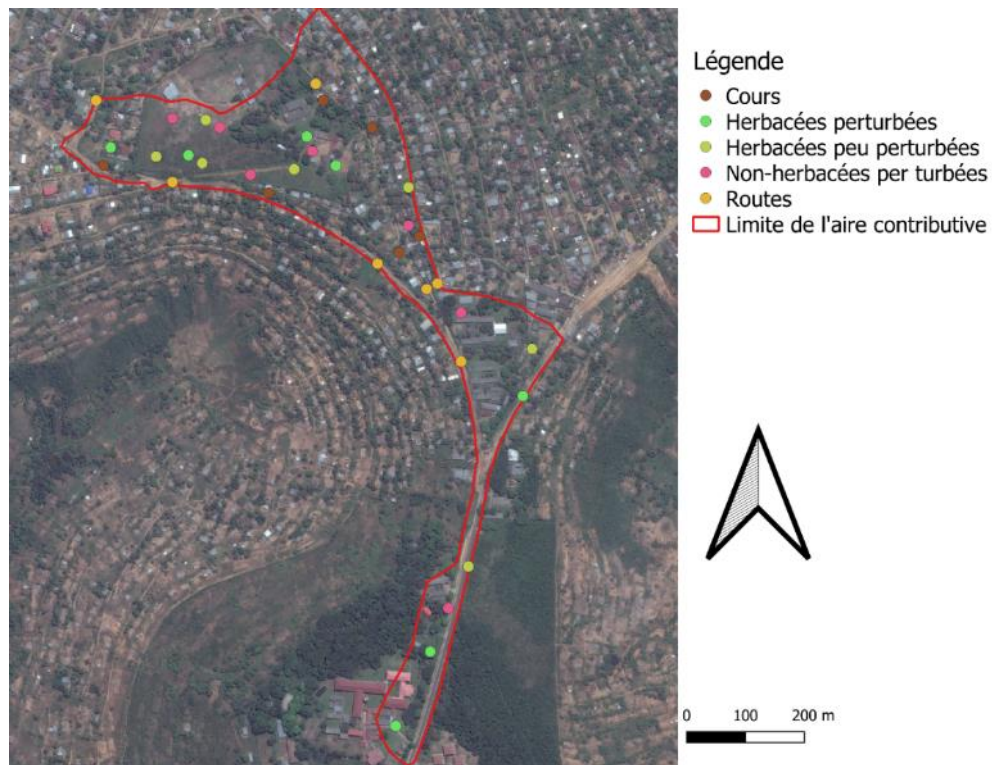


FIGURE 42 : *Localisation des mesures d'infiltration des surfaces dans l'aire contributive*

Un test d'égalité de la variance fut réalisé. Après transformation logarithmique, aucune variance ne peut être considérée comme différente d'une autre (**figure 43**). Sur base des tests d'égalité des moyennes effectués, tous les taux d'infiltration peuvent être considérés comme différents, hormis entre les surfaces herbacées perturbées et les cours, les surfaces non-herbacées perturbées et les cours et entre les routes et les surfaces non-herbacées perturbées. Les tests furent réalisés avec un niveau de confiance de 95%

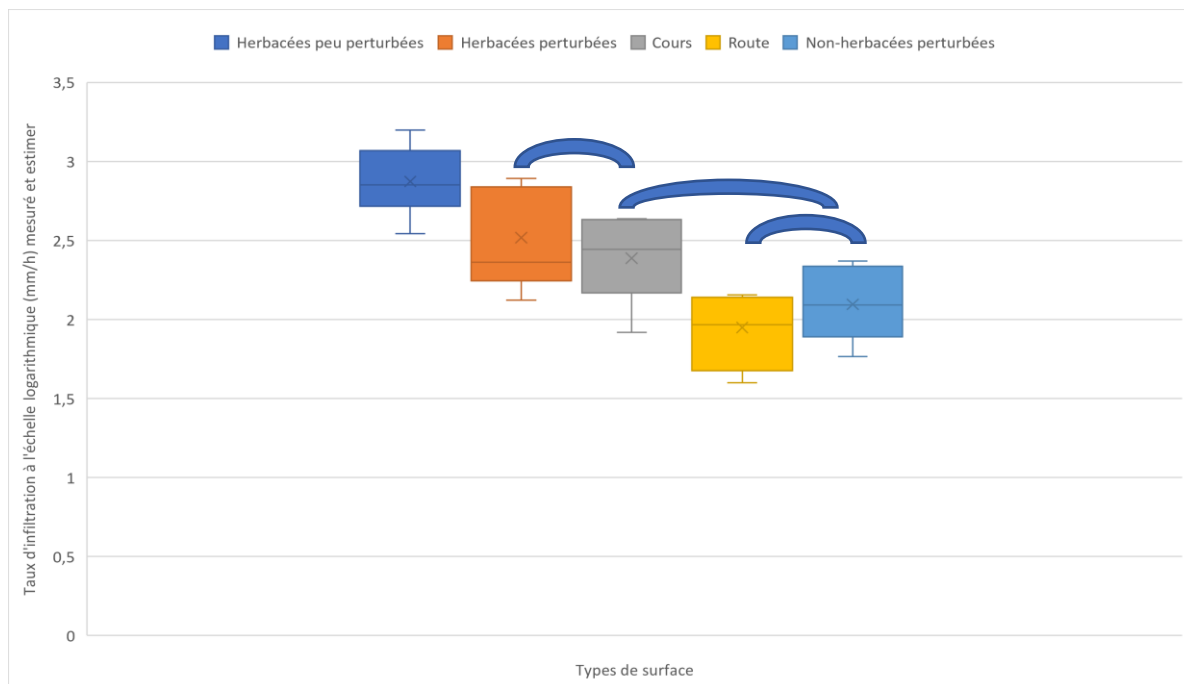


FIGURE 43 : Taux d'infiltration à l'échelle logarithmique (mm/h) en fonction du type de surface

4.4. INFILTRATION DES OUVRAGES DE LUTTE ANTIÉROSIVE

Ouvrages considérés

Les ouvrages pouvant influencer l'infiltration totale sont les murs de sacs de sable et les bassins de rétention (**figure 44**). Au vu de la grande diversité des états généraux des bassins de rétention, ceux-ci furent divisés en trois catégories : les bassins recouverts de déchets, les bassins ensablés et les bassins bien entretenus.



FIGURE 44 : *Ouvrages dont le taux d'infiltration fut calculé (de gauche à droite et de haut en bas) : bassin recouvert de déchets, bassin ensablé, mur de sacs de sable et bassin bien entretenu*

Taux d'infiltration moyen des ouvrages

Au total, 21 mesures d'infiltration furent prises pour caractériser l'infiltration de ces ouvrages. La **figure 45** montre leur emplacement dans l'aire contributive. Toutes furent effectuées selon la méthode à charge constante et ne nécessitent donc aucune correction. Quatre mesures d'infiltration furent réalisées pour les murs de sacs de sable. La moyenne d'infiltration est de 146 mm/h et l'écart-type est de 47 mm/h. Concernant les bassins bien entretenus, recouverts de déchets et ensablés, 6, 5 et 6 mesures furent respectivement prises. Les moyennes et écart-type respectifs de ces bassins sont : 423 mm/h (écart-type : 242 mm/h), 427mm/h (écart-type : 366 mm/h) et 493 mm/h (écart-type : 388 mm/h) (Fig. 45).

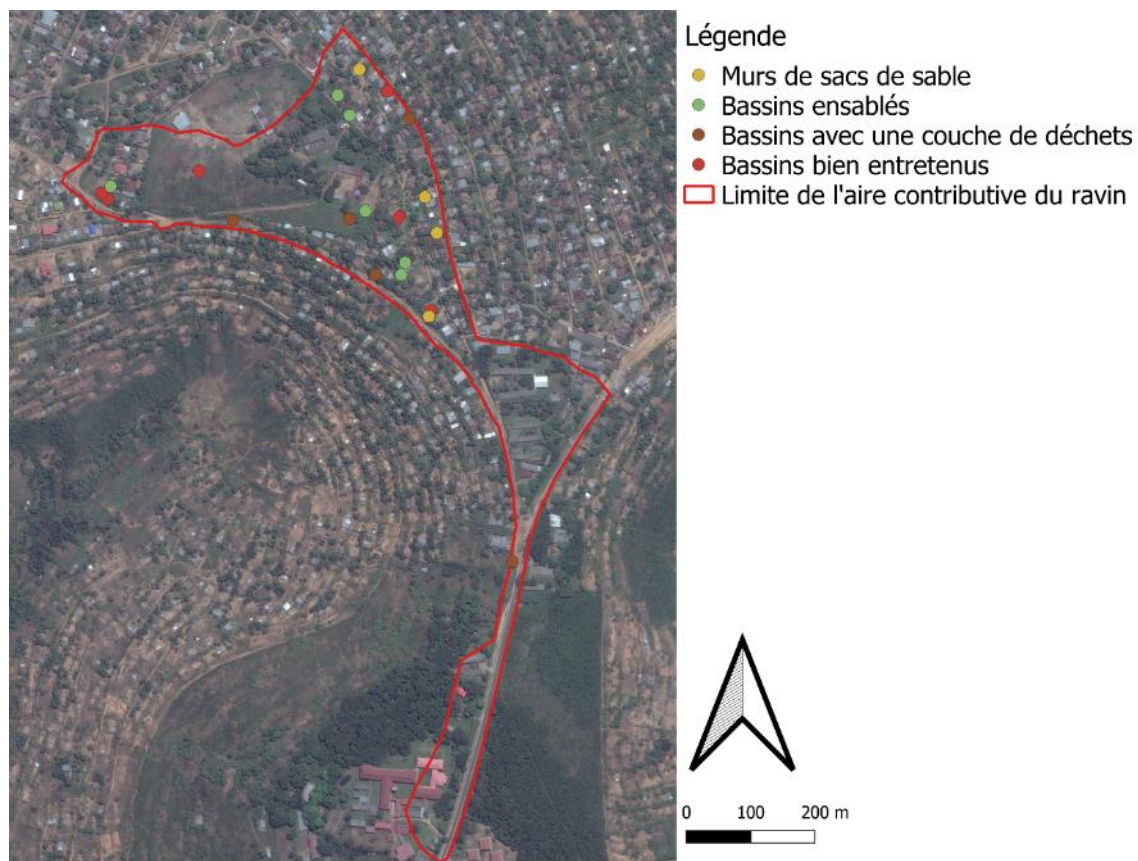


FIGURE 45 : Localisation des mesures d'infiltration des ouvrages antiérosifs dans l'aire contributive

Comme pour les surfaces, un test d'égalité des variances et des moyennes fut effectué avec un niveau de confiance de 95% (**figure 46**). Aucune variance ne peut être considérée comme différente d'une autre, sauf entre les bassins bien entretenus et les bassins avec une couche de déchets, et les murs de sacs de sable et les bassins avec une couche de déchets. De même, aucune moyenne ne peut être jugée différente d'une autre, excepté entre les bassins bien entretenus et les murs de sacs de sable.

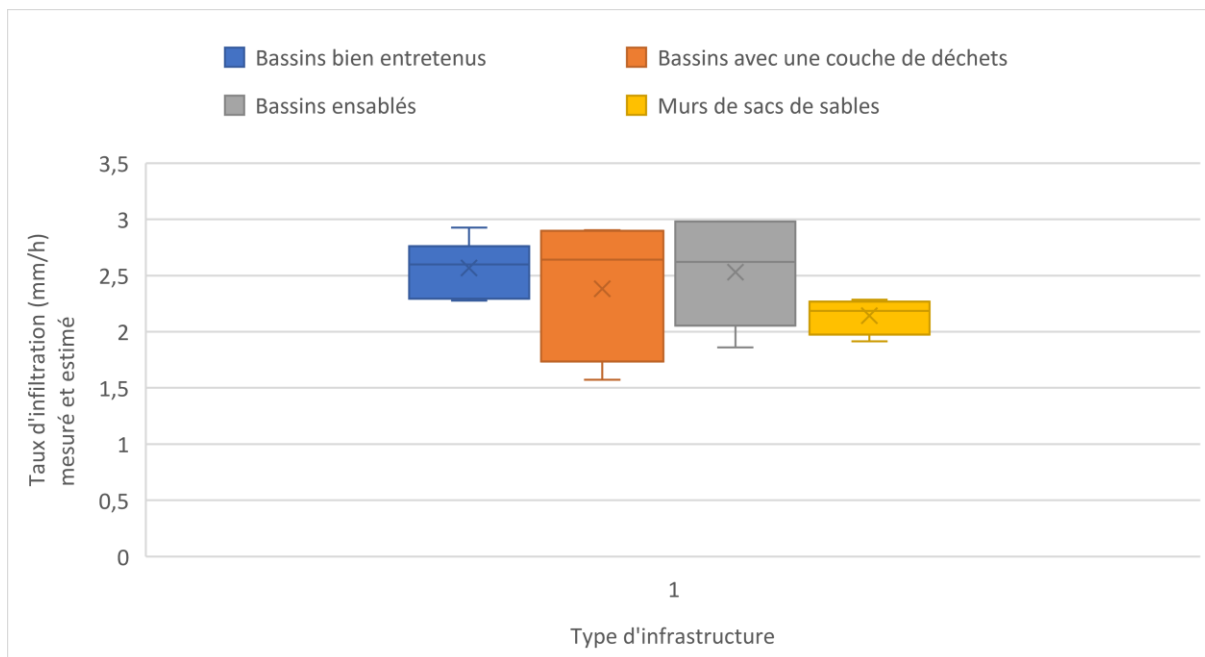


FIGURE 46 : *Taux d'infiltration à l'échelle logarithmique (mm/h) en fonction du type d'infrastructure*

4.5. MICRO-TROTTOIR

Qu'ils en aient été directement victimes ou non, toutes les personnes interviewées ont déjà été témoins du phénomène de ravinement. 70% d'entre eux ont déjà participé à la mise en place d'un ouvrage antiérosif et 45% en possèdent un chez eux. De façon générale, les personnes qui habitent à proximité du ravin ont plus souvent un ouvrage dans leur propriété. Ceux qui habitent à moins de 100 m estiment que le ravin pourrait arriver à hauteur de leur maison en quelques mois après l'interview. Le choix de l'ouvrage à mettre en place s'oriente souvent vers un bassin de rétention car il s'agit d'une infrastructure qui ne nécessite pas ou peu d'apports financiers. Concernant les coûts engagés pour la mise en place d'ouvrages les réponses étaient de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de francs congolais (2000 FC = 1\$).

4.6. MODÈLE SWMM

Quatre tests furent effectués, avec et sans le paramètre des ouvrages de rétention et pour deux intensités de pluie différentes, une pluie banale à Kinshasa de 10mm/h (pluviométrie 1) et une pluie anormale d'une période de retour de 20 ans de 78,9 mm/h (pluviométrie 2). Pour les quatre tests, la durée de la pluie est d'une heure et celle de l'expérience complète, de 3 heures.

Concernant la pluviométrie 1, les débits moyens qui se déversent à la tête du ravin sont de 0,037 m³/s en l'absence d'ouvrage et de 0,024 m³/s avec ouvrages. Pour la pluviométrie 2, ces débits sont de 0,287 m³/s, sans, et de 0,181 m³/s, avec ouvrages. Ces débits moyens s'étalent sur une durée de test de 3 heures. Les débits maximaux pour chaque situation de test sont respectivement de 0,1 m³/s, 0,062 m³/s, 0,785 m³/s et 0,49 m³/s. La **figure 47** montre l'évolution du débit qui se déverse dans la tête du ravin au cours du temps pour les tests réalisés en considérant la pluviométrie 1 et la **figure 48** en considérant la pluviométrie 2. Les volumes totaux d'eau qui se déversent à la tête du ravin sont de 359 m³ et 238 m³ pour la pluviométrie 1, respectivement sans et avec ouvrages. Concernant la pluviométrie 2, ces volumes totaux sont de 2 831 m³ et 1784 m³. Les proportions d'eau infiltrée et ruisselée sont, respectivement, de 98,46 % et 1,54 %. Ces paramètres restent les mêmes pour les quatre test effectués. Les volumes d'eau retenue par les ouvrages de lutte antiérosive sont de 84 m³ en considérant la pluviométrie 1 et de 213 m³ en considérant la pluviométrie 2. Il est à noter que, au minimum, 90 % des surfaces herbacées peu perturbées absorbent la totalité des précipitations qu'elles reçoivent.

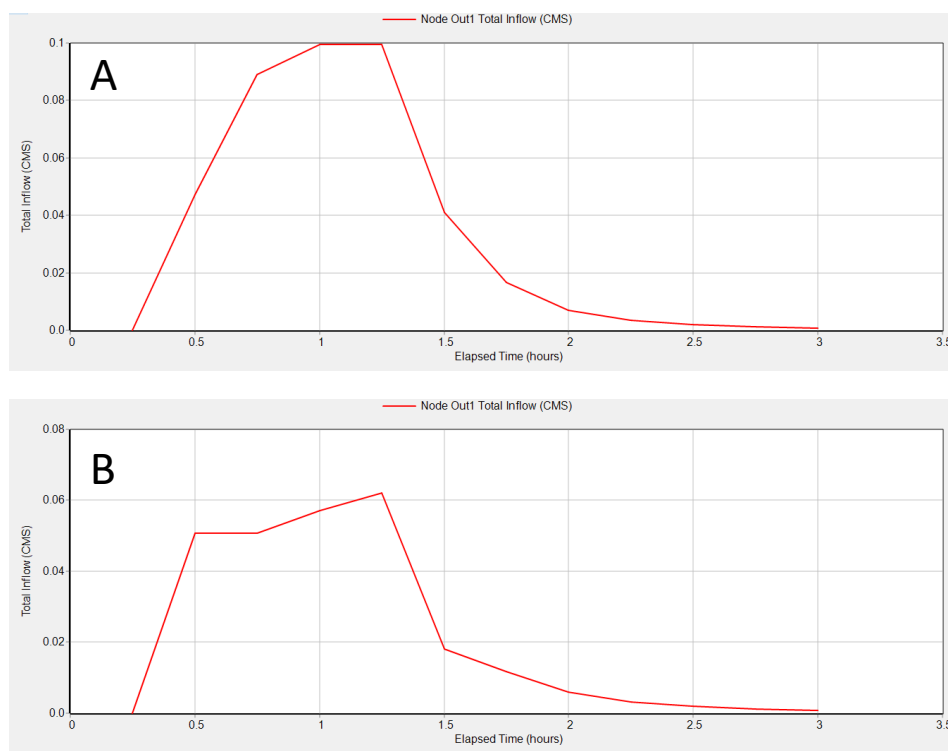


FIGURE 47 : Evolution du débit qui se déverse dans la tête du ravin au cours du temps pour les tests réalisés en considérant la pluviométrie 1 sans (A) et avec (B) ouvrages de lutte antiérosive

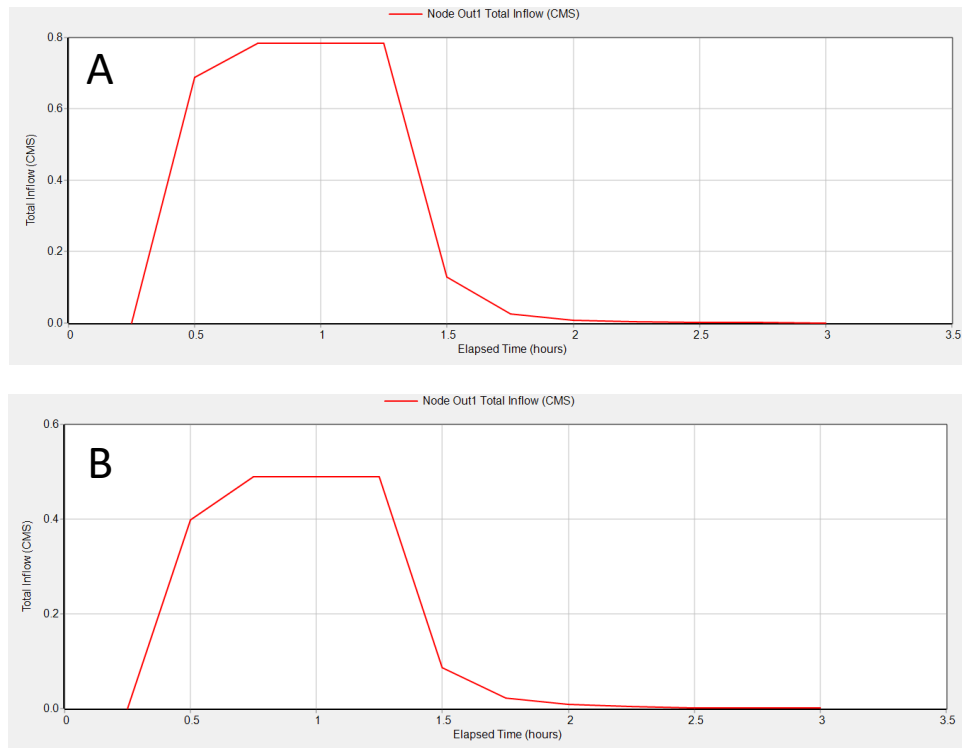


FIGURE 48 : Evolution du débit qui se déverse dans la tête du ravin au cours du temps pour les tests réalisés en considérant la pluviométrie 2 sans (A) et avec (B) ouvrages de lutte antiérosive

5 DISCUSSION

5.1. OUVRAGES

A l'exception des cuves, l'état général des ouvrages de lutte antiérosive était généralement moyen ou mauvais. Ils représentent 50 % des bassins et 60 % des murs de sacs de sable. Selon l'estimation expliquée précédemment (*paragraphe 4.2*), si tous les ouvrages étaient bien entretenus, environ 106 m³, soit 15 % du volume réel, d'eau supplémentaire pourraient être retenus sur l'aire contributive. Posons l'hypothèse que tous les ouvrages de rétention sont positionnés de façon optimale et peuvent être tous remplis durant une pluie. En considérant un évènement pluvieux extrême d'une période de retour de 20 ans, une intensité de pluie de l'ordre de 78,9 mm/h durant une heure est envisageable (Mohymont and Demarée, 2006). La surface de l'aire contributive étant de l'ordre de 18,7 ha, la quantité d'eau reçue sur l'aire contributive durant ce laps de temps est environ de 14750 m³ d'eau. En considérant un coefficient de ruissellement de 40,7 % (Moeyersons et al., 2015), environ 6003 m³ d'eau ruissèleront sur l'aire contributive durant cette pluie. L'impact de l'état général des ouvrages sur la quantité d'eau retenue durant un évènement pluvieux extrême est donc minime, soit une potentiel rétention de moins de 2 % du volume d'eau ruisselé. De même, l'impact de la rétention totale réelle, environ 700 m³, est faible car elle correspond à plus ou moins 12% de la quantité d'eau ruisselée lors d'un tel évènement. Considérons maintenant une pluie d'intensité plus banale de l'ordre de 10 mm/h durant une heure. La quantité d'eau reçue sur l'aire contributive durant cette période de temps est d'environ 1700 m³. Selon le même coefficient de ruissellement que précédemment, le volume d'eau ruisselé serait de l'ordre de 700 m³. Dès lors, à condition qu'ils soient employés à l'optimum de leurs capacités, les ouvrages de rétention pourraient potentiellement retenir l'entièreté de l'eau ruisselante. Dans le cas d'une pluie de relativement faible intensité, la quantité d'eau retenue par les ouvrages de lutte antiérosive est potentiellement considérable. La **figure 49** montre l'évolution du pourcentage de rétention par rapport à la quantité d'eau ruisselée durant des pluies de différentes périodes de retour. Cette estimation se base sur des intensités de pluies issues de Moeyersons et al., 2015 et considère une durée de pluie de 30 min et le même coefficient de ruissellement de 40.7 % que dans l'expérience précédente.

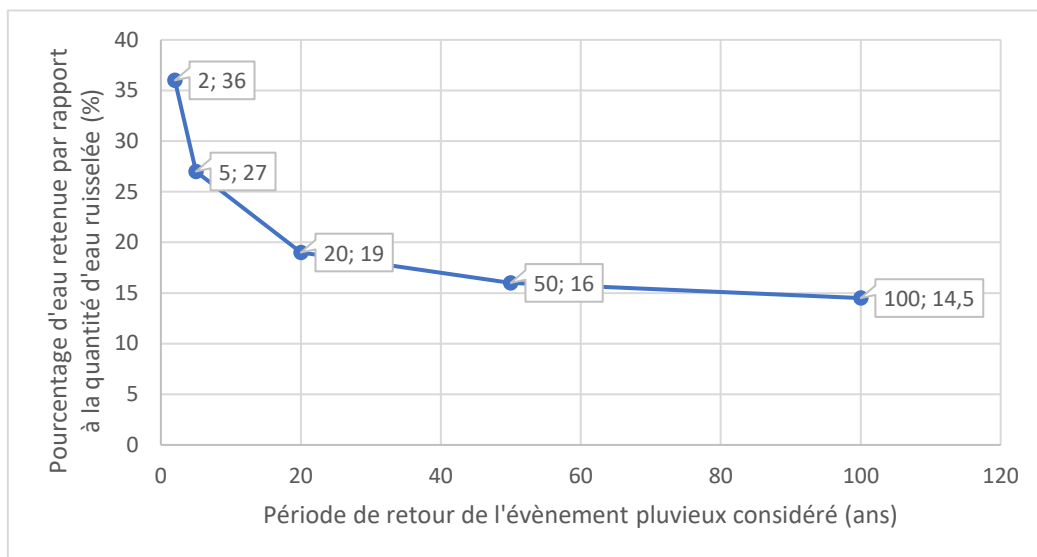


FIGURE 49 : *Pourcentage du volume d'eau retenue par les ouvrage de rétention par rapport à la quantité d'eau ruisselée durant des pluies de différentes périodes de retour*

Considérons que chaque habitant doivent collecter l'ensemble du ruissellement de sa parcelle. En estimant que les dimensions moyennes d'une parcelles sont de 13 m sur 13m, la surface moyenne d'une parcelle est de 169 m². La **figure 50** montre le volume de rétention minimum au sein de la parcelle pour retenir toute l'eau de ruissellement en fonction de la période de retour de l'évènement pluvieux considéré. Comme précédemment, cette expérience se base sur des intensités de pluies issues de Moeyersons et al., 2015 et considère une durée de pluie de 30 min et un coefficient de ruissellement de 40.7 %. Si chaque habitant a sur sa parcelle un ou plusieurs ouvrages de rétention d'un volume total d'au moins 3,3m³ capable de collecter l'ensemble du ruissellement de sa parcelle cela serait suffisant pour contenir le ruissellement provenant d'un évènement pluvieux d'une période de retour de 20 ans.

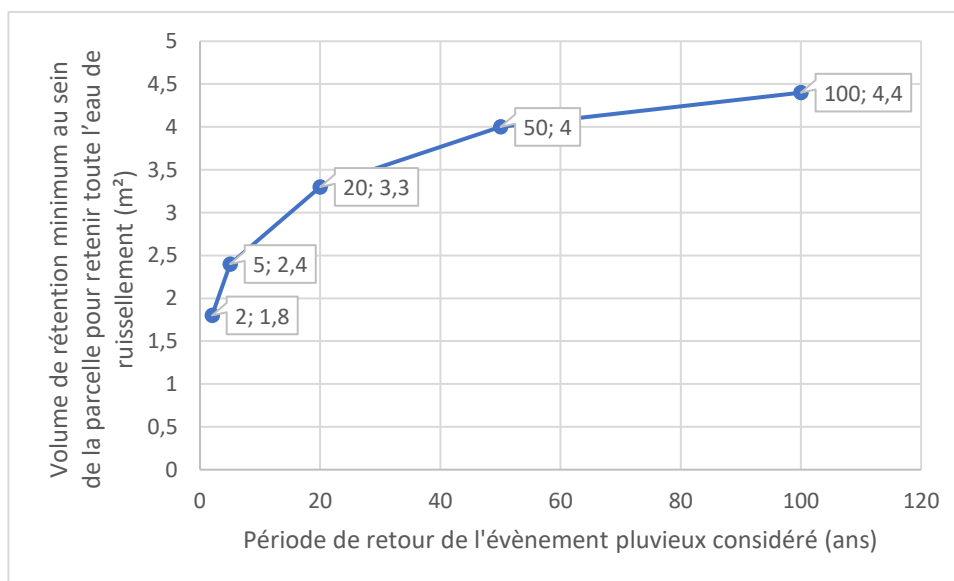


FIGURE 50 : *Volume de rétention minimum au sein de la parcelle pour retenir toute l'eau de ruissellement en fonction de la période de retour de l'évènement pluvieux considéré*

Lors de la collecte des données, les coûts liés aux ouvrages furent souvent surestimés par leur propriétaire. Par exemple un mur de 8 sacs de sable qui aurait coûté 50 \$ alors que le prix conventionnel d'un sac de sable dans la région est de 500 FC (2000 FC = 1 \$) à ajouter aux possibles coûts de mains d'oeuvre. L'hypothèse la plus plausible est que certains Kinois ont donné un prix supérieur au prix réel dans l'espoir d'un remboursement. Cela rend très difficile toute interprétation concernant les coûts engagés pour la mise en place de certains ouvrages.

5.2. SURFACES

Les taux d'infiltration mesurés sont, particulièrement pour les surfaces herbacées, très élevés. Néanmoins, ils correspondent tous aux ordres de grandeurs évoqués dans des études précédentes. En effet, Moeyersons et al. (2015) caractérisent les taux d'infiltration de Kinshasa comme allant de moins de 50 mm/h à plus de 900 mm/h dans certaines zones spécifiques. Par contre, selon (Caillie, 1989), la valeurs d'infiltration pour Kinshasa varient de 144 à 360 mm/h. Par contre, selon Makanzu Imwangana et al. (2014), la perméabilité excède souvent 354 mm/h. Les valeurs d'infiltration des différentes surfaces varient de 99 mm/h à 834 mm/h. Ces résultats concordent avec les valeurs d'infiltration proposées par Moeyersons et al. (2015), partiellement avec ceux présenté par Makanzu Imwangana et al. (2014) mais pas du tout avec ceux de (Caillie, 1989).

Sur base de l'étude statistique, seules trois comparaisons sur dix du taux d'infiltration des différentes surfaces n'ont pas été considérées comme statistiquement différentes. Cette constatation démontre que le choix de la division de l'aire contributive en cinq surfaces différentes a ses limites mais reste cohérent. Comme attendu, les surfaces herbacées peu perturbées ont le plus grand taux d'infiltration et les routes le plus faible. De façon générale, il est constatable que les surfaces les moins perturbées infiltrent plus rapidement que les surfaces perturbées. Conformément à ce qui a été dit précédemment (*paragraphe 2.1.2*), une couverture végétale favorise une infiltration élevée. De plus, la présence d'une couverture végétale diminue l'action érosive de l'eau (Imwangana et al., 2015). Par conséquent, les 3 surfaces les moins infiltrantes, par ailleurs dépourvues de végétation, sont aussi plus sensibles à la perte en terre sous l'action de l'eau. Plus de la moitié de l'aire contributive étant composée de surfaces non-herbacées, elles sont certainement une des causes majeures du ruissellement.

Les surfaces de type cours sont les surface les plus abondante au sein de l'aire contributive. Elle couvre 38 % de l'aire contributive. Elles sont le troisième type de surfaces les moins infiltrantes après les routes et les surfaces non-herbacées perturbées. Admettons que si ces cours venaient à être végétalisées elle aurait une infiltration similaire à celle des surfaces herbacées perturbées. L'infiltration y serait supérieur de 131,9 mm/h sur une surface de 71 ha. Le volume s'eau supplémentaire pouvant dès lors être absorbé par le sol durant une

période de temps de une heure s'élève à 9370m³. Cette végétalisation des cours pourrait donc potentiellement infiltrer un volume d'eau supplémentaire supérieur au volume d'eau ruisselant (6003m³) sur toute l'aire contributive lors d'une pluie d'une période retour de 20, ans comme calculé précédemment. Cette expérience met en évidence l'impact élevé de la végétation sur l'infiltration. Malheureusement, végétaliser des surfaces telles que des cours, des trottoirs ou des routes semble irréalisable à cause de la perturbation anthropique élevée rendant impossible le développement des végétaux.

5.3. URBANISATION

L'urbanisation de l'aire contributive contribue fortement à la sensibilité de la zone au ravinement. L'urbanisation a mené malheureusement à la destruction des espèces végétales présentes originellement dans les collines de Kinshasa (Makanzu Imwangana, n.d.). Or, sur base des mesures effectuées, le taux d'infiltration des surfaces herbacées peu perturbées est de l'ordre de 800 mm/h contre environ 150 mm/h pour les surfaces plus perturbées. Il est dès lors évident que l'urbanisation, en diminuant le couvert végétal et plus généralement en participant à la perturbation des surfaces de l'aire contributive, participe fortement à l'augmentation du ruissellement dans celle-ci (Makanzu Imwangana, n.d.).

En plus des cinq types de surfaces identifiées, un sixième type de surface est présent dans l'aire contributive. Il s'agit de toutes les surfaces imperméables. Elles sont composées principalement des toits des maisons et de la route asphaltée. L'aire contributive étant fortement urbanisée, à l'exception de la concession de la paroisse de la Divine Miséricorde (située au nord de l'aire contributive), la proportion élevée, 18,5 % (les 15,5 % de surfaces bâties et les 3 % de la route asphaltée de Kimwenza) de ces surfaces imperméables joue un rôle majeur dans la génération du ruissellement. Comme pour 91% des ravins de Kinshasa (Imwangana et al. 2015), le ravin des 7 km suit une route (route de Kimwenza). Selon les dires des locaux, durant les fortes pluies, les routes, même non asphaltées, se transforment en cours d'eau. Hormis les surfaces imperméables, elles sont les surfaces les moins infiltrantes de l'aire contributive. De nombreuses routes segmentent l'aire contributive, créant un réseau de surfaces peu perméables capable de concentrer les écoulement et de les canaliser jusqu'au niveau de la tête du ravin.

Finalement, l'aire contributive du ravin des 7 km ne compte aucune infrastructure en état de fonctionnement telle que des fossés de drainage pour contrôler le chemin emprunté par l'eau de ruissellement. L'entièreté de l'eau qui n'est ni retenue par des ouvrages de lutte et ni infiltrée se déverse automatiquement dans la tête du ravin.

5.4. INFILTRATION DES OUVRAGES DE LUTTE ANTIÉROSIVE

Comme pour les surfaces, les taux d'infiltration mesurés pour les ouvrages correspondent aux valeurs proposées par Moeyersons et al., 2015. Au vu du test statistique voué à la comparaison des différents taux d'infiltration des ouvrages, la catégorisation des ouvrages de lutte selon leur supposé taux d'infiltration est mauvaise car les taux d'infiltration des différents ouvrages ne sont pas statistiquement différents. En effet, aucun des taux d'infiltration des différents bassins ne peuvent être considérés comme différents. La division des bassins en trois catégories était donc inutile. Il semblerait donc que l'état bien entretenu, ensablé ou couvert de déchet d'un bassin n'influence pas sa capacité infiltration. Selon cette logique, à surface de fond égale, un bassin en très mauvais état pourrait donc infiltrer la même quantité d'eau qu'un bassin en excellent état. Cela semble contre-intuitif qu'une couverture de déchets tels que des sacs et des bouteilles en plastique ne puisse avoir aucun impact sur le taux d'infiltration. De même entre les taux d'infiltration moyens des bassins et le taux d'infiltration moyen des murs de sacs de sable, une seule différence est notable, entre les bassins bien entretenus et les murs. Peut-être qu'une étude plus approfondie de ces phénomènes pourrait apporter quelques éclaircissements.

Ces taux d'infiltration sont élevés. En effet, les bassins infiltrent en moyenne plus rapidement que toutes les surfaces considérées dans l'aire contributive à l'exception des surfaces herbacées peu perturbées. Ils ne jouent donc pas uniquement un rôle de rétention d'eau mais aussi un rôle important d'infiltration d'eau. Ce phénomène est peut-être dû à un encroustement ou un tassement des premiers centimètres du sol au niveau des surfaces qui ne serait pas présent au fond des bassins. Comme précédemment, une étude plus approfondie de l'infiltration au fond des bassins pourrait expliquer cette infiltration aussi élevée. Par exemple, considérons un bassin bien entretenu (infiltration = 423 mm/h) de 4,5 m de long, 2,2 m de large et de 15,8 m² de volume de rétention. En posant l'hypothèse que le taux d'infiltration est constant au cours du temps et unidirectionnel (pas d'infiltration via les parois du bassin), le volume d'eau pouvant être infiltré durant une période de une heure s'élève à 4,2 m³ soit 27 % du volume de rétention de l'ouvrage. L'impact des bassins sur la réduction du ruissellement dépasse donc le simple cadre de rétention d'eau.

5.5. MICRO-TROTTOIR

Toutes les personnes interviewées étaient tout à fait au courant du phénomène de ravinement actif dans la zone ainsi que de son inévitable progression en l'absence de mesures drastiques. Malgré cela, moins de la moitié ont chez eux une ou plusieurs infrastructures de lutte antiérosive. Face au phénomène de ravinement, les Kinois sont largement démunis. L'absence de fonds, la faible connaissance des locaux en la matière ainsi que la quasi inaction du gouvernement rendent difficile la mise en place de mesures de lutte contre le ravinement

efficaces à long terme. Il est important de souligner le courage dont font preuve les habitants de Kimwenza dans la lutte contre le ravinement mais aussi de manière générale.

5.6. CADRE DE TRAVAIL

Cette partie tente d'apporter une vision critique sur la méthodologie suivie durant la prise des mesures sur le terrain en vue d'éventuelles améliorations pour des études futures. Certaines erreurs et imprécisions furent décelées dans la récolte des données sur le terrain. Cependant, la méthodologie appliquée reste pertinente dans l'ensemble et présente l'avantage de ne nécessiter que peu de matériel.

5.6.1. RAVIN ÉTUDIÉ

Le souhait de base était d'étudier de 3 à 5 ravins. Cependant, diverses contraintes ont entraîné une revue à la baisse de cet objectif. D'abord la durée du séjour a été réduite car la date du départ a été reculée à cause d'une insécurité grandissante au sein de l'ERAIFT (lieu de résidence originel) à la suite d'une attaque de « kulunas » (bandits locaux). Ensuite, l'accès à l'eau demeure une difficulté majeure à Kinshasa pour la plupart des quartiers. Or chaque mesure d'infiltration nécessitait environ 80 L d'eau. Enfin, la difficulté de transport, les trajets se faisant principalement à pied ou en taxis-moto, le temps nécessaire pour effectuer un déplacement était généralement élevé. C'est pourquoi, le temps n'a permis finalement que l'étude d'un seul ravin. La représentativité de l'étude est donc faible à l'échelle de la ville entière, sachant qu'il y a environ 308 méga-ravins à Kinshasa (Imwangana et al., 2015).

Le ravin étudié présentait l'avantage d'être situé à proximité du lieu de logement (couvent des Pères jésuites de l'Université Loyola du Congo), les pertes de temps liées au déplacement étaient donc limitées. De plus, il n'y a de l'eau courante qu'une fois tous les trois jours environ à Kimwenza. Sans la présence d'un puits au couvent des Pères et leur autorisation de l'utiliser pour les mesures d'infiltration, il aurait été impossible de mener à bien cette étude. Enfin, un accord passé avec les commissariats du quartier a permis une prise de mesures plus sécurisante.

5.6.2. TESTS D'INFILTROMETRIE

Les mesures d'infiltration furent réalisées pour une lame d'eau qui n'est pas représentative des réalités de terrain car rarement atteinte même lors d'un évènement pluvieux extrême. La pression due à la hauteur d'eau lors des prises de mesures est donc supérieure à celle présente en réalité lors d'une pluie. Il aurait été intéressant de faire des tests au même endroit avec plusieurs hauteurs d'eau différentes afin de voir si ce paramètre avait un réel impact sur la vitesse d'infiltration de l'eau. Si oui, il aurait été plus pertinent d'effectuer les prises de mesures à une hauteur d'eau plus proche de la réalité.

Dans le protocole initial, il était question d'effectuer 3 répétitions par prise de mesure (*paragraphe 3.4.2*) compte tenu de la grande variabilité spatiale de la conductivité hydraulique des sols. Cependant, seulement une prise fut effectuée. Si ce protocole venait à être réutilisé il serait intéressant de réaliser trois prises de mesure par endroit comme prévu initialement pour permettre une base statistique plus fiable.

Deux erreurs de méthode lors de la prise de mesures entraînent une incertitude sur l'interprétation des données. La première est la prise de mesures d'infiltration à niveau variable. Bien que corrigée par la suite par le biais d'une corrélation, cette erreur engendre une incertitude concernant l'interprétation des données issues de cette méthode. La deuxième source d'incertitude provient de la variation de la hauteur initiale de la lame d'eau ($19,1 \pm 1,43$ cm pour les surfaces et $14,65 \pm 2,32$ cm pour les ouvrages) une prise de mesure à l'autre. Aucune correction ne fut appliquée pour pallier à cette erreur. Cependant, comme expliqué précédemment, la hauteur de la lame d'eau a certainement une influence sur la vitesse d'infiltration. A situation identique, on peut supposer une fluctuation du taux d'infiltration entre deux prises de mesure effectuées à hauteur d'eau différente. Concernant cette incertitude, il aurait aussi été intéressant de faire des tests d'impact de la hauteur d'eau sur la vitesse d'infiltration.

L'appareillage utilisé possède des forces et des faiblesses. Parmi ses forces, citons la facilité d'emploi et la facilité d'en faire construire sur place. En effet, les deux cylindres furent confectionnés par un artisan du métal local. Cependant, en l'absence de voiture, l'appareillage, comme le reste du matériel utilisé, reste encombrant et pesant lors du transport. Une autre force de l'infiltromètre à double anneau est que, contrairement à l'infiltromètre à simple anneau, il est moins affecté par la divergence des écoulements. En effet, quand l'eau s'infiltre dans le sol dans un infiltromètre simple anneau, elle ne se déplace pas uniquement de façon verticale mais aussi de façon latéral sous l'effet des forces de capillarités. Or, dans le cas d'un infiltromètre à double anneau, cette divergence affecte principalement l'infiltration de l'eau dans la zone périphérique qui agit comme une barrière circulaire en favorisant l'infiltration verticale dans la zone centrale. Les flux au niveau de l'anneau central ne sont que peu affectés par cette divergence. Ils sont dès lors plus facilement interprétables car majoritairement verticaux et unidirectionnels. Plusieurs pistes d'amélioration de l'appareillage sont cependant envisageables. L'emploi d'une bouteille de Mariotte, qui permet de maintenir un niveau d'eau constant tout en mesurant le débit d'eau infiltré, serait opportun. Durant les prises de mesures, l'hypothèse fut posée que le taux d'infiltration ne variait pas avec une différence de lame d'eau de deux centimètres. Cette hypothèse n'aurait pas été nécessaire si une bouteille de Mariotte ou un appareil de même effet avait été utilisé. Le mètre pliable utilisé pour mesurer la hauteur d'eau infiltrée ne garantissait pas une précision élevée. Il aurait été plus rigoureux d'employer, par exemple, une tige graduée munie d'un flotteur afin de garantir une rigueur plus élevée dans la mesure de la hauteur d'eau.

5.7. REMBLAYAGE

Comme précisé dans le *paragraphe 3.1*, le ravin est actuellement en cours de remblayage. Le premier remblayage date de 2011 mais à peine 6 ans plus tard, en 2017, le ravin était réapparu. Cela pose question quant à l'efficacité du remblayage du ravin des 7 km. En l'absence de mise en place d'infrastructures efficaces de contrôle du ruissellement, telles que des canalisations, une réapparition future du ravin est à craindre.

5.8. MODÈLE SWMM

Les résultats des quatre tests effectués montrent que, pour une pluie d'intensité de 10 mm/h et d'une durée d'une heure, la présence d'ouvrages de rétention d'eau de ruissellement diminue de 34 % le volume d'eau total qui se déverse à la tête du ravin. Concernant les tests effectués avec une intensité de 78,9 mm/h, cette réduction est de 37 %. Les débits maximaux d'eau à la tête du ravin diminuent de 38 % pour les deux intensités de pluie considérées. La **figure 51** montre l'évolution du pourcentage de réduction du volume total d'eau qui ruisselle à la tête du ravin, estimé par SWMM. Les tests ont été effectués sur une période de trois heures et la durée des événements pluvieux considérés est de 30 minutes. Ils se basent sur des valeurs d'intensité de pluie en fonction de leur période de retour issues de (Moeyersons et al., 2015). Selon les estimations du modèle, la réduction du volume due aux ouvrages de rétention d'eau de ruissellement reste quasiment constante malgré une forte augmentation de l'intensité pluvieuse (de 51 mm/h à 128 mm/h). Cette réduction, de l'ordre de 35 %, est considérable.

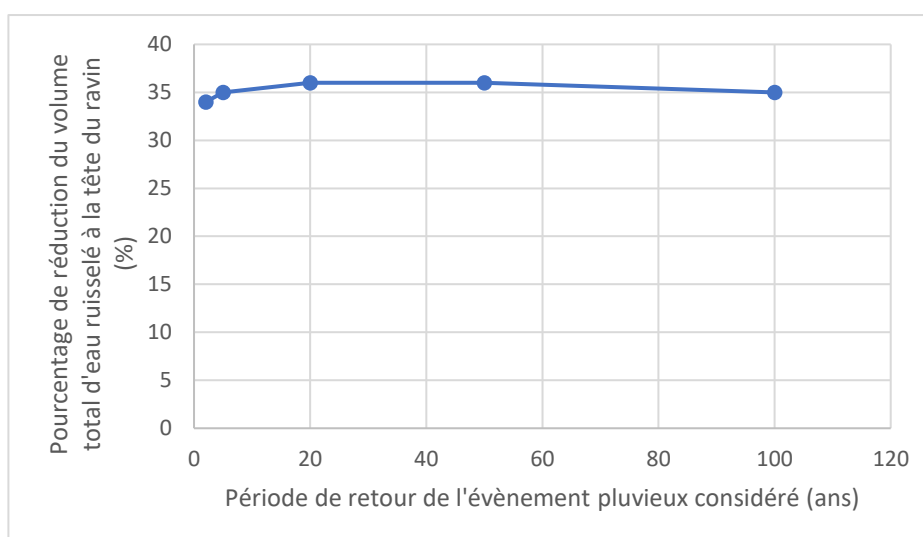


FIGURE 51 : Evolution du pourcentage de réduction du volume total d'eau qui ruisselle à la tête du ravin, estimé par SWMM, par l'action des ouvrages de rétention présents dans l'aire contributive

La **figure 52** met en évidence l'impact des ouvrages de rétention sur la réduction du débit maximum à la tête du ravin estimé par le programme SWMM. Les valeurs d'intensité et de durée de pluie en fonction de leur période de retour sont les mêmes que précédemment (Moeyersons et al., 2015) et la durée des différents tests effectués est de trois heures. Il y est constatable que la diminution du débit maximum à la tête du ravin engendrée par la présence des ouvrages augmente avec l'intensité de la pluie considérée.

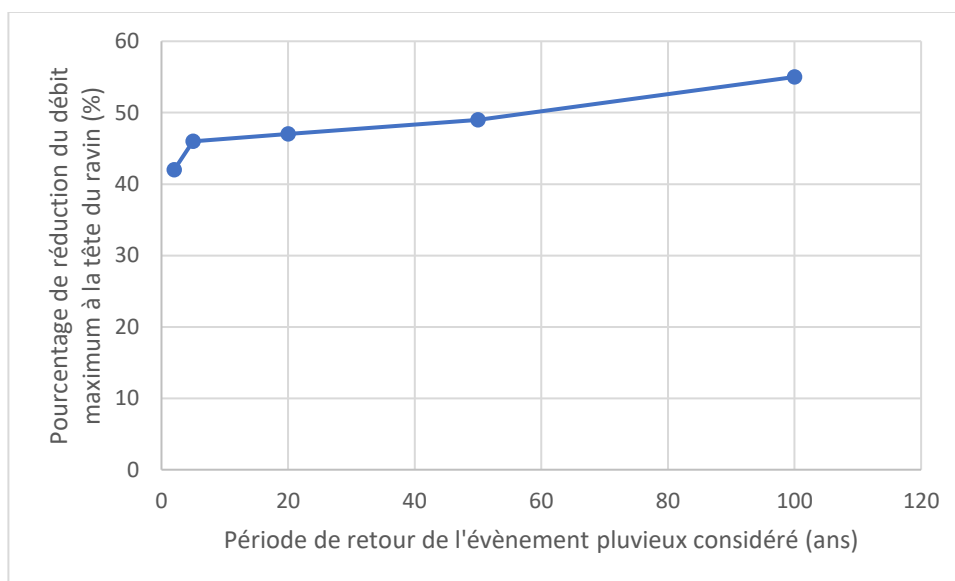


FIGURE 52 : *Evolution du pourcentage de réduction du débit maximal d'eau à la tête du ravin, estimé par SWMM, par l'action des ouvrages de rétention présents dans l'aire contributive*

Les résultats obtenus grâce au programme SWMM sont cohérents. Cependant, ils sont à nuancer. En effet le programme ne prend en compte que les ouvrages de lutte antiérosive capables de retenir de l'eau de ruissellement, les bassins de rétention et les cuves. Or, d'autres types d'ouvrages sont présents dans l'aire contributive du ravin des 7 km. Leur effet antiérosif n'est pas pris en considération par le modèle. Bien que leur effet sur la réduction des écoulements soit moins évident, certains ouvrages tels que les murs de sacs de sable pourraient être pris en compte lors de la modélisation. De plus, cela permettrait de nous donner une appréciation de leur influence sur la diminution du ruissellement. Ensuite, le modèle ne prend pas en compte l'infiltration de l'eau au sein des bassins de rétention. Infiltration qui, comme décrite précédemment (*paragraphe 5.4*), n'est pas négligeable. Pour ces deux raisons il est possible que le modèle sous-estime l'impact antiérosif de l'ensemble des infrastructures de lutte présentes dans l'aire contributive du ravin. Pour une estimation plus précise, il serait intéressant de trouver un moyen d'insérer tous ces paramètres au sein

du modèle ou d'utiliser une autre modèle capable de les prendre en compte. A l'inverse, le modèle surestime l'impact des ouvrages de rétention car il ne donne pas la possibilité au réseau de conduits d'emprunter plusieurs chemins d'écoulement à hauteur d'un ouvrage de rétention. Le conduit est forcé de passer par l'ouvrage situé sur sa route. Or, dans la réalité, toutes les eaux de ruissellement passant à proximité d'un ouvrage de rétention ne se déversent pas forcément dans celui-ci : une partie de l'eau ruissellera sur les côtés. Le modèle choisi pour le déplacement de l'eau au sein du réseau de conduits est le modèle de l'onde cinématique. Ce modèle possède comme lacune de ne pas prendre en compte les influences de l'aval sur l'écoulement et les inversions du sens d'écoulement (Telliez Marion, 2010). Or, certains conduits ont des pentes faibles de l'ordre de 1 %. Ces conduits sont, de par leur faible pente, potentiellement sensibles à l'écoulement en aval. Bien qu'ils soient peu nombreux au sein de l'aire contributive, ce modèle d'écoulement pourrait générer des erreurs locales au niveau de ces conduits de faible pente. Afin d'améliorer l'estimation faite par le modèle, il aurait été pertinent d'augmenter le nombre de sous-unités de l'aire contributive, couvrant dès lors chacune une surface moindre, afin de s'assurer qu'un seul type de surface, et donc une seule valeur d'infiltration, soit présente au sein de chaque sous-unité. Actuellement, l'infiltration encodée pour une sous-unité correspond au taux d'infiltration de la surface majoritairement présente dans cette sous-unité. Mais, dans la réalité, il se peut que, par exemple, sur une surface considérée comme une cour il y ait un potager dont l'infiltration s'apparentera plutôt à celle d'une surface végétalisée, soit supérieure à celle de la cour. La solution aurait été de considérer ce potager comme une sous-unité de l'aire contributive. De plus, de nombreux ouvrages sont positionnés de façon à récolter directement l'eau s'écoulant des toits. Considérer chaque toit possédant un ouvrage de ce type comme une sous-unité se déversant dans un ouvrage de rétention permettrait de prendre en compte ce paramètre. Malheureusement la résolution des images satellites de l'aire contributive ne permet actuellement pas une telle subdivision. Pour ce faire, il serait nécessaire de réaliser une étude de plus longue durée sur le terrain.

Selon Imwangana et al. (2015), la pluviométrie critique pour le ravinement dans la haute ville de Kinshasa est de 24,9 mm avec une intensité moyenne de 21,8 mm/h. Considérons une pluie d'une intensité identique sur une période d'une heure. Selon le modèle SWMM, cette pluie engendrerait sur une durée de 3 heures un débit moyen et maximum à la tête du ravin de 0,027 m³/s et 0,122 m³/s et un volume total d'eau s'y déversant de 263 m³, en présence d'ouvrages de rétention. En l'absence d'ouvrages de rétention, ces valeurs sont, respectivement de 0,044 m³/s, 0,166 m³/s et 395 m³.

Sur base du modèle, un coefficient de ruissellement de l'aire contributive du ravin des 7 km de 1,54 % a été calculé. Ce coefficient est nettement inférieur à celui utilisé précédemment (40,7 %) et proposé par Moeyersons et al. (2015). Des recherches supplémentaires devraient permettre d'expliquer l'ampleur de cette différence.

6. CONCLUSION

L'objectif principal de ce mémoire était d'évaluer l'efficacité des ouvrages de lutte antiérosive présents dans l'aire contributive d'un ravin à Kinshasa. Pour ce faire, 143 ouvrages présents au sein de l'aire contributive furent inventoriés et caractérisés. Sur base de la caractérisation des ouvrages présents, une capacité totale de rétention des eaux de ruissellement fut calculée. 21 mesures d'infiltration furent réalisées sur certains types d'ouvrages pour estimer leur effet sur l'infiltration totale de l'aire contributive. Cinq types de surfaces du sol furent identifiées et, sur base de 34 mesures d'infiltration, leur infiltration moyenne fut calculée. En fonction de ces éléments, une modélisation du ruissellement de surface au sein de l'aire contributive fut réalisée afin de quantifier l'impact des ouvrages de rétention sur le ruissellement. Un second objectif était d'évaluer la manière dont les habitants du quartier perçoivent le phénomène de ravinement.

L'urbanisation chaotique de l'aire contributive engendre une augmentation du ruissellement, par la présence de surfaces imperméables mais aussi par la réduction de la perméabilité des autres surfaces présentes dans l'aire contributive. En effet, cette étude a démontré que, pour une zone considérée, plus une surface est sujette aux perturbations anthropiques, plus son taux d'infiltration est faible. De plus, le ruissellement est concentré et canalisé jusqu'à la tête du ravin par un réseau de routes, segmentant l'aire contributive.

Les surfaces herbacées ont un taux d'infiltration très élevé. Elles génèrent très peu de ruissellement. Cependant, afin de réduire le ruissellement, augmenter leur proportion au sein de l'aire contributive semble peu réalisable étant donné la densité élevée d'habitants et, en conséquence, un degré élevé de perturbation anthropique des surfaces.

Les ouvrages de rétention ont une capacité considérable à réduire le volume ruisselé lors d'une pluie banale à Kinshasa dans l'hypothèse où ils seraient utilisés de manière optimale. Cependant, le modèle a révélé que leur effet sur la réduction du ruissellement ne se limite pas à une pluie banale. En effet, leur impact sur la proportion de la réduction du volume total qui se déverse à la tête du ravin reste quasi identique, même lors d'une élévation de l'intensité des pluies. Selon le modèle, leur influence sur la réduction du débit maximum et moyen à la tête du ravin augmente même avec l'augmentation de l'intensité des pluies.

Le micro-trottoir a révélé que l'entièreté des habitants sont bien conscients du phénomène de ravinement actif dans leur quartier. Cependant certaines parcelles ne sont pas équipées d'ouvrages de lutte. Cette étude prouve pourtant que l'impact de ces ouvrages sur la lutte contre la progression du ravin est important.

Les différents ouvrages de lutte présents dans l'aire contributive ont différents impacts sur la réduction de l'érosion. Malheureusement, seul l'effet de rétention du ruissellement des bassins de rétention et des cuves a pu être évalué. Ni l'impact des autres ouvrages, ni l'effet

des ouvrages sur l'infiltration totale au sein du bassin n'ont été évalués. Pour des recherches futures, il serait judicieux d'ajouter ces différents paramètres à la modélisation.

7. BIBLIOGRAPHIE

- 10 pays et leur plus grande ville francophone - Master Your French [WWW Document], 2021. URL <https://www.masteryourfrench.com/fr/france/villes-francophones/> (accessed 5.31.22).
- Aladin, n.d. Kinshasa, Democratic Republic of Congo - Detailed climate information and monthly weather forecast [WWW Document]. Weather Atlas. URL <https://www.weather-atlas.com/en/democratic-republic-of-congo/kinshasa-climate> (accessed 6.9.22).
- Caillie, D.V., 1989. Erodabilité des terrains sableux du Zaïre et contrôle de l'érosion 12.
- Castillo et Gomez, 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches | Elsevier Enhanced Reader [WWW Document]. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
- Climat Kinshasa: Pluviométrie et Température moyenne Kinshasa, diagramme ombrothermique pour Kinshasa - Climate-Data.org [WWW Document], n.d. URL <https://fr.climate-data.org/afrique/congo-kinshasa/kinshasa/kinshasa-408/> (accessed 6.9.22).
- Davies, T.C., 2015. Urban geology of African megacities | Elsevier Enhanced Reader [WWW Document]. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.06.012>
- de A. P. Bacellar, L., Netto, A.L.C., Lacerda, W.A., 2005. Controlling factors of gully in the Maracujá Catchment, southeastern Brazil. *Earth Surf. Process. Landf.* 30, 1369–1385. <https://doi.org/10.1002/esp.1193>
- De Herdt, T., 2019. L'Expérience Inégale de la Transition à Kinshasa [WWW Document]. Lemag. URL <https://www.lemag.cd/actualite/2021/07/16/les-activites-humaines-continuent-de-polluer-les-eaux-en-rdc> (accessed 5.30.22).
- Driessen, P.M. (Ed.), 2001. Lecture notes on the major soils of the world, World soil resources reports. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Economie | Congo-Kinshasa | Pays monde, n.d. URL <https://www.pays-monde.fr/information/afrique/congo-kinshasa/fiche-identite-economie/> (accessed 6.9.22).
- Editor, 2016. Kinshasa Subway Map. Travel. ®. URL <http://travelsfinders.com/kinshasa-subway-map.html> (accessed 5.31.22).
- Géographie physique et gestion des risques et des catastrophes, 2019. 88.
- Geyik, M.P., 1986. Recognized HTML document [WWW Document]. URL <https://www.fao.org/3/ad082e/introdu.htm> (accessed 5.26.22).
- Guyassa, E., Frankl, A., Zenebe, A., Poesen, J., Nyssen, J., 2017. Effects of check dams on runoff characteristics along gully reaches, the case of Northern Ethiopia. *J. Hydrol.* 545, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.019>
- Ilombe Mawe, G., Lutete Landu, E., Makanzu Imwangna, F., Nzolang, C., Wazi Nandefo, R., Poesen, J., Bienders, C., Dewitte, O., Vanmaercke, M., 2021. Quantifying the impacts of urban gully in the scale of the Democratic Republic of Congo, in: *Geophysical Research Abstracts*. Presented at the EGU General Assembly 2021, p. EGU2021.
- Imwangana, F.M., Moeyersons, J., Ozer, P., Ntombi, M., Dewitte, O., n.d. GULLY EROSION IN KINSHASA: HYDROMORPHOGENIC DYNAMICS AND DEVELOPMENT OF PREVENTION TOOLS 1.
- Imwangana, F.M., Vandecasteele, I., Trefois, P., Ozer, P., Moeyersons, J., 2015. The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (D.R. Congo). *CATENA* 125, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.019>
- Ionita, I., Fullen, M.A., Zgłobicki, W., Poesen, J., 2015. Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Nat. Hazards* 79, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1935-z>
- Jones, A, Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R, Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, E., Montanarella, L, Spaargaren, O., Thiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M., Zougmore, R, Jones, Arwyn, Montanarella, Luca, Jones, Robert, European Commission, Joint Research Centre, 2015. Atlas des sols d'Afrique. Publications Office, Luxembourg.
- Kayembe Wa Kayembe, M., De Maeyer, M., Wolff, E., 2009. Cartographie de la croissance urbaine de Kinshasa (R.D. Congo) entre 1995 et 2005 par télédétection satellitaire à haute résolution. *Belg. Rev. Belge Géographie* 439–456. <https://doi.org/10.4000/belgeo.7349>
- Kirkby, M.J., Bracken, L.J., 2009. Gully processes and gully dynamics. *Earth Surf. Process. Landf.* 34, 1841–1851. <https://doi.org/10.1002/esp.1866>
- Lateef, A.S.A., Fernandez-Alonso, M., Tack, L., Delvaux, D., 2010. Geological constraints on urban sustainability, Kinshasa City, Democratic Republic of Congo. *Environ. Geosci.* 17, 17–35. <https://doi.org/10.1306/eg.04080908007>

- Longondjo, C., 2015. Urbanization and Poverty in Kinshasa: Thinking Beyond 2015 Millennium Development Goals, in: Andrews, N., Khalema, N.E., Assié-Lumumba, N.T. (Eds.), *Millennium Development Goals (MDGs) in Retrospect: Africa's Development Beyond 2015*, Social Indicators Research Series. Springer International Publishing, Cham, pp. 31–44. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16166-2_3
- Lutete Landu, E., Ilombe Mawe, G., Bielders, C., Makanzu Imwangana, F., Dewitte, O., Poesen, J., Vanmaercke, M., 2021. Understanding the effectiveness of measures aiming to stabilize urban gullies in Congolese cities: a systematic analysis based on field surveys, in: *Geophysical Research Abstracts*. Presented at the EGU General Assembly 2021, p. EGU2021.
- Makanzu, F., Ozer, P., Moeyersons, J., n.d. Caractéristiques des Pluies et ravinement dans la ville de Kinshasa de 1961 à 2010 3.
- Makanzu Imwangana, F., n.d. Memoire Online - Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa par télédétection et SIG (système d'information géographique) entre 1957 et 2007 - Fils Makanzu Imwangana [WWW Document]. Memoire Online. URL <https://www.memoireonline.com/09/13/7437/Etude-de-lerosion-ravinante--Kinshasa-par-teledetection-et-SIG--systeme-dinformation-g.html> (accessed 5.25.22).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.021>
- Mfumum Kihumba, A., Vanclooster, M., Ndembo Longo, J., 2017. Assessing groundwater vulnerability in the Kinshasa region, DR Congo, using a calibrated DRASTIC model. *J. Afr. Earth Sci.* 126, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.11.025>
- Moeyersons, J., Makanzu Imwangana, F., Dewitte, O., 2015. Site- and rainfall-specific runoff coefficients and critical rainfall for mega-gully development in Kinshasa (DR Congo). *Nat. Hazards* 79, 203–233. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1870-z>
- Mohymont, B., Demarée, G.R., 2006. Courbes intensité—durée—fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrol. Sci. J.* 51, 239–253. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.2.239>
- Morgan, R.P.C., 2005. *Soil Erosion and conservation*. Blackwell Publishing
- Nicu, I.C., 2018. Is Overgrazing Really Influencing Soil Erosion? *Water* 10, 1077. <https://doi.org/10.3390/w10081077>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci* 12.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA, Gully Erosion and Global Change* 50, 91–133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
- politologue.com, n.d. STATISTIQUES - PIB Belgique [WWW Document]. Politologue.com. URL <https://www.politologue.com/statistiques/PIB-par-pays/?nom=Belgique> (accessed 6.26.22).
- Sitou, L., 2022. Etude de la dynamique et des facteurs du ravin de Tchiali à Pointe-Noire en République du Congo 3, 21.
- Telliez, M., mars 2010. Storm Water Management Model - User's manual
- Thwaites, R.N., Brooks, A.P., Pietsch, T.J., Spencer, J.R., 2022. What type of gully is that? The need for a classification of gullies. *Earth Surf. Process. Landf.* 47, 109–128. <https://doi.org/10.1002/esp.5291>
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA* 63, 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- Vanmaercke, M., 2016. How fast do gully headcuts retreat? | Elsevier Enhanced Reader [WWW Document]. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
- Vanmaercke, M., Panagos, P., Vanwalleghe, T., Hayas, A., Foerster, S., Borrelli, P., Rossi, M., Torri, D., Casali, J., Borselli, L., Vigiak, O., Maerker, M., Haregeweyn, N., De Geeter, S., Zgłobicki, W., Bielders, C., Cerdà, A., Conoscenti, C., de Figueiredo, T., Evans, B., Golosov, V., Ionita, I., Karydas, C., Kertész, A., Krása, J., Le Bouteiller, C., Radoane, M., Ristić, R., Rousseva, S., Stankoviansky, M., Stolte, J., Stolz, C., Bartley, R., Wilkinson, S., Jarihani, B., Poesen, J., 2021. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art. *Earth-Sci. Rev.* 218, 103637. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>
- Vannoppen, 2017. How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species? | Elsevier Enhanced Reader [WWW Document]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.001>
- Vannoppen, 2015. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates | Elsevier Enhanced Reader [WWW Document]. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.011>

- Vulnerability to Water Erosion Map | NRCS Soils [WWW Document], n.d. URL https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/?cid=nrcs142p2_054006 (accessed 5.24.22).
- Wouters, T., Wolff, E., 2010. Contribution à l'analyse de l'érosion intra-urbaine à Kinshasa (R.D.C.). *Belgeo* 293–314. <https://doi.org/10.4000/belgeo.6477>
- WRB Translations | FAO SOILS PORTAL | Food and Agriculture Organization of the United Nations [WWW Document], n.d. URL <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/wrb-translations/en/#c184591> (accessed 6.15.22).
- Zgłobicki, W., Baran-Zgłobicka, B., Gawrysiak, L., Telecka, M., 2015. The impact of permanent gullies on present-day land use and agriculture in loess areas (E. Poland). *CATENA* 126, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.022>
- Zolezzi, G., Bezzi, M., Spada, D., Bozzarelli, E., 2018. Urban gully erosion in sub-Saharan Africa: A case study from Uganda. *Land Degrad. Dev.* 29, 849–859. <https://doi.org/10.1002/ldr.2865>

Les ouvrages de lutte antiérosive dans l'aire contributive d'un ravin de Kinshasa

Caractérisation et évaluation de l'efficacité

Pierre Seeger

Le ravinement est une forme d'érosion hydrique capable d'engendrer de grandes pertes en terre. Ce travail tente d'analyser les méthodes de lutte contre le ravinement à Kinshasa. Il évalue l'efficacité des ouvrages de lutte antiérosive présents dans l'aire contributive d'un ravin. Ces ouvrages sont destinés à retenir la terre, capter de l'eau de ruissellement et augmenter l'infiltration d'eau dans le sol. Ce travail se focalise sur l'étude du ravin dit « des 7 km » situé dans le quartier de Kimwenda, dans la commune Mont-Ngafula. Un séjour sur le terrain de six semaines a été effectué afin d'identifier et de caractériser les ouvrages et les types de surfaces présentes dans l'aire contributive du ravin. Au total, 56 mesures d'infiltration furent effectuées et 143 ouvrages furent identifiés et caractérisés. Le taux d'infiltration moyen fut calculé pour cinq types de surfaces distinctes et pour quatre types d'ouvrages. Le volume de rétention de l'eau de ruissellement de ces ouvrages fut aussi calculé. Une application du modèle SWMM, tenant compte de ces mesures, à l'aire contributive du ravin fut réalisée afin de différencier les débits de ruissellement dans le ravin en présence des ouvrages antiérosifs ou en leur absence et d'ainsi évaluer leur effet. Ce travail permet d'affirmer l'efficacité des ouvrages antiérosifs présents sur le terrain, même dans l'état d'entretien où ils se trouvent actuellement. Enfin, une estimation de la perception du phénomène de ravinement par les Kinois fut réalisée sous forme d'un micro-trottoir, car ils sont à la fois les victimes du ravinement et les acteurs de cette lutte antiérosive.