

**Belgeo**

Revue belge de géographie

3 | 2010**Miscellaneous**

Contribution à l'analyse de l'érosion intra-urbaine à Kinshasa (R.D.C.)

A Contribution to the analysis of urban erosion in Kinshasa (D.R.C.)

Thomas Wouters et Eléonore Wolff

**Édition électronique**URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/6477>

DOI : 10.4000/belgeo.6477

ISSN : 2294-9135

Éditeur :

National Committee of Geography of Belgium, Société Royale Belge de Géographie

Édition imprimée

Date de publication : 1 octobre 2010

Pagination : 293-314

ISSN : 1377-2368

Référence électronique

Thomas Wouters et Eléonore Wolff, « Contribution à l'analyse de l'érosion intra-urbaine à Kinshasa (R.D.C.) », *Belgeo* [En ligne], 3 | 2010, mis en ligne le 15 décembre 2012, consulté le 19 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/6477> ; DOI : 10.4000/belgeo.6477

Ce document a été généré automatiquement le 19 avril 2019.



Belgeo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International.

Contribution à l'analyse de l'érosion intra-urbaine à Kinshasa (R.D.C.)

A Contribution to the analysis of urban erosion in Kinshasa (D.R.C.)

Thomas Wouters et Eléonore Wolff

Introduction

- 1 Le phénomène d'érosion est un mécanisme qui a longtemps été étudié dans le passé. Nombreuses sont, en effet, les publications traitant de la perte de la partie superficielle des sols par divers agents bioclimatiques essentiellement sur les terres arables. Toutefois, rares sont les articles qui relatent le problème en milieu urbain.
- 2 La ville de Kinshasa, mégapole et capitale de la République Démocratique du Congo, connaît depuis le début des années 1950 une croissance urbaine sans précédent. L'intense mise en valeur de ses terres, sans réel contrôle de la part des autorités responsables de l'aménagement, ainsi que le manque de connaissances par ces dernières des actions efficaces pouvant être menées contre la dégradation des sols par ravinement régressif, ne font actuellement qu'aggraver la situation d'instabilité et de danger au niveau de la région des collines.
- 3 Près de 400 ravins auraient été comptabilisés en 2007 (Muamba, 2007). Certains d'entre eux, comme celui de Mataba localisé dans la commune de Ngaliema, ne cessent de prendre des proportions plus qu'alarmantes, atteignant des tailles imposantes (environ 1 km de long, 10 m de profondeur et 300 de large) et réduisant le plus souvent à néant toute tentative de stabilisation des sites. Ce ravinement cause d'importantes pertes matérielles (maisons, routes, bâtiments scolaires, dispensaires,...) et humaines (décès lors des glissements de terrain). Si, localement, la population sait où se trouvent les ravins, aucune vision d'ensemble n'existe à l'heure actuelle. La prévention et la lutte curative contre cette érosion sont basées sur une compréhension intuitive de ce phénomène que nous souhaitons améliorer.

- 4 C'est ainsi que le premier objectif de ce travail est de définir une méthode basée sur la télédétection satellitaire à très haute résolution pour identifier par interprétation visuelle les ravins actifs et inactifs, mais également identifier l'origine des différents ravins. Ensuite, un inventaire des ravins actifs par GPS différentiel a pour objectif non seulement de valider l'interprétation visuelle mais surtout d'approfondir la compréhension des causes de l'érosion intra-urbaine.

Le ravinement

- 5 Le mécanisme de ravinement est un phénomène connu de très longue date ; il consiste en une perte de matériaux et donc de volume de sol suite aux différents agents bioclimatiques que constituent l'eau, le vent ou encore certains organismes vivants (Fournier, 1960).
- 6 Divisée en trois parties que sont le détachement, le transport et la sédimentation des particules déplacées, cette action érosive du sol n'agit pas de manière uniforme à la surface de la terre. En effet, plusieurs études sur la mesure de la prise en charge de sédiments par les rivières ont pu démontrer une variation spatiale à l'échelle planétaire du processus. Selon Walling et Webb (cité par Morgan, 2005), certaines régions du globe sont soumises à une perte pouvant dépasser plusieurs centaines de tonnes par km² par an. Les différentes intensités des précipitations et leurs fréquences, ainsi que la modification de l'utilisation du sol au cours du temps influencent la quantité de matières transportées (Mermut *et al.*, 1997).
- 7 Tous ces déplacements ont bien évidemment des conséquences directes et/ou indirectes sur l'environnement. De nombreuses terres autrefois cultivables ont, par exemple, vu leur rendement chuter de manière drastique et ce suite à la perte de matières organiques et autres éléments nutritifs constitutifs de la partie superficielle des sols (Larney *et al.*, 2009 ; Van De *et al.*, 2008).

Le processus physique

- 8 Le *splash* constitue le point de départ du mécanisme. Basé sur le transfert d'énergie cinétique accumulé par les gouttes de pluie lors de leur chute, il débute toujours par l'impact de ces dernières sur une surface nue de végétation. La vitesse et donc l'énergie avec laquelle le choc se produit dépendent principalement de la taille des gouttes, elle-même liée à l'intensité des précipitations (Laws & Parsons, 1943, in Pedersen & Hasholt, 1995). Lorsque le diamètre des gouttes est important, soit au maximum 9 mm (Biro, 1981), l'énergie accumulée lors de la chute est suffisante pour former un petit cratère et projeter de petites gouttelettes, mélange d'eau et de particules fines, à des distances pouvant atteindre quelques centimètres (Fournier, 1960), l'impact étant plus important lorsqu'un fin film d'eau, d'une épaisseur égale au diamètre de la goutte, recouvre le sol (Palmer, 1963, in Kirkby & Morgan, 1980).
- 9 On observe des pertes par érosion lorsque les gouttes, projetées ainsi que les particules fines présentes en surface, sont prises en charge par un écoulement dit de surface (Morgan, 2005). Ce dernier apparaît lorsque l'eau ne peut s'infiltrer dans le substrat (faible perméabilité, forte intensité des précipitations, grande fréquence des

précipitations). L'apparition d'une croûte de battance limite très fortement la capacité d'infiltration d'un sol très perméable (Birot, 1981).

- 10 Les ravins, définis comme étant difficilement retravaillés par labourage du sol, apparaissent pendant et/ou immédiatement après de fortes pluies. Morgan (2005) décrit une évolution du processus en cinq étapes : (1) la mise en évidence d'une surface de faible densité de végétation, apparue par surpâturage ou feux de brousse, associée à une perte de matériaux par écoulement de surface ; (2) l'apparition de dépressions, liées aux nombreux événements de précipitations ; (3) la formation d'un canal par creusement et fusion de ces derniers ; (4) la mise en évidence d'une tête d'érosion suffisamment abrupte pour générer un écoulement de surface, qualifié de supercritique ; (5) le développement d'un processus de régression, au niveau de la tête d'érosion, favorisant une évolution vers le haut du versant. Les sédiments ainsi transportés proviendraient à la fois de l'érosion superficielle, responsable du creusement du ravin, et des effondrements successifs de la tête d'érosion.
- 11 La forme adoptée par les ravins varie en fonction des différences de résistance successives des horizons du sol. Débutant par une configuration qualifiée de "V", la forme du ravin peut en effet, en fonction des couches inférieures du sol atteintes, évoluer en "U" ou accentuer sa forme de départ. Lorsque les horizons profonds sont plus résistants que ceux situés proches de la surface, la forme initiale s'élargit. Inversement, lorsque les horizons inférieurs sont moins résistants que les horizons supérieurs, les parois du ravin deviennent plus escarpées et les différents sapements, survenant à la base, génèrent une configuration en "U" (Fournier, 1960).
- 12 De Ploey (1972) précise les mécanismes des processus d'érosion affectant le substrat sableux, surtout pour l'érosion pluviale et les divers types d'érosion en masse.

Les paramètres influençant l'érosion

- 13 Plusieurs paramètres influencent le ravinement. La végétation protège le sol en interceptant préalablement les gouttes d'eau. Au contact de la feuille, l'eau ne glissant pas le long de la tige ou n'étant pas évaporée chute d'une hauteur moins importante que celle de départ. L'énergie cinétique ainsi accumulée s'en retrouve alors minimisée : la déstructuration des agrégats du sol ainsi que l'apparition de croûte de battance, diminuant l'infiltration, sont alors fortement réduites (Wainwright *et al.*, 1999). La hauteur de la canopée reste cependant un facteur important à prendre en compte puisqu'il suffirait d'une hauteur de 10 mètres pour atteindre 97 % de la vitesse initiale des précipitations (Epema & Riezebos, 1983). Néanmoins, rares sont les formations arborescentes qui ne possèdent pas de strates inférieures, arbustives ou herbacées ou encore une épaisse couche de feuilles, pouvant jouer un rôle tampon face aux gouttes de pluie tombée des hautes cimes (Greco, 1978). Le problème devient gênant dans des zones herbacées clairsemées présentant une couverture arbustive ponctuelle. La végétation intervient également de manière indirecte dans la protection face à l'érosion. La libération de matières organiques, dégradées en humus, augmente en effet la stabilité du sol par l'amélioration de ses propriétés physiques et chimiques (Bochet *et al.*, 1998) alors que les organes foliaires limitent l'apparition de croûte de battance, maintenant une perméabilité adéquate. Elle réduit également, par leur densité et hauteur de tige, la vitesse d'écoulement de surface, assurant ainsi une réduction de l'érosion (Morgan, 2007).

- 14 L'inclinaison et la longueur de la pente, la structure et la texture du sol, l'intensité et la fréquence des précipitations, l'humidité initiale du sol ainsi que l'utilisation du sol influencent également la quantité de matières transportées.
- 15 Lorsque l'inclinaison ainsi que la longueur de la pente deviennent importantes, la vitesse et le volume de particules déplacées vers l'aval par ruissellement augmentent fortement (Morgan, 2005). Une relation exponentielle existe entre la quantité de matériaux transportés et le gradient de la pente, ce qui s'explique notamment par la distribution asymétrique des particules transportées par le splash sur une surface en pente (Morgan, 2005 ; Xu *et al.*, 2008).
- 16 La structure du sol, caractérisé par l'agencement des agrégats les uns par rapport aux autres, influence la vitesse de ruissellement de surface et donc la quantité de matières déplacées ; l'écoulement est d'autant plus faible que les aspérités du sol sont nombreuses.
- 17 La texture influence la cohésion du sol et donc la résistance de ce dernier au ravinement. Un sol argileux présente, par exemple, une cohésion suffisante, grâce aux propriétés colloïdales des argiles, pour empêcher une perte trop importante de matériaux et ce malgré sa faible perméabilité et donc un ruissellement important (Gaucher, 1968).
- 18 L'humidité initiale du sol détermine la part d'eau précipitée pouvant s'infiltrer à travers les éléments constitutifs du sol et donc celle pouvant ruisseler à sa surface (Fitzjohn *et al.*, 1998). Selon Shainberg *et al.* (1996), les particules d'un sol saturé tendraient à s'éloigner les unes des autres, limitant ainsi leur cohésion, alors qu'un sol à faible teneur en eau limiterait, quant à lui, la réorganisation des éléments constitutifs dans une position améliorant leurs interactions ; les deux cas étant favorables au mécanisme érosif. Hanson (in Knapen *et al.*, 2007) serait dès lors d'accord pour dire qu'il existerait une teneur en eau optimale qui limiterait la sensibilité des sols au processus érosif. Il serait fort probable que l'érosion présente une variation saisonnière, apparaissant préférentiellement en saison des pluies, lorsque la quantité d'eau évaporée est faible et que le sol reste saturé pendant une longue période (Kirkby & Morgan, 1980). La saison sèche est quant à elle caractérisée par un taux d'infiltration majoritairement plus important et donc une teneur en eau et un ruissellement nettement plus faible (Wei *et al.*, 2007).
- 19 Il semblerait selon Morgan (2005) que l'érosion soit reliée à deux types de pluies. L'une, caractérisée par une forte intensité, dépassant rapidement la capacité d'infiltration du sol (Théorie de Horton, 1945) et l'autre, présentant un long étalement dans le temps ou un délai entre deux averses suffisamment court pour le saturer. Le résultat génère dans les deux cas un écoulement de surface, qualifié de *runoff* et capable de transporter de grandes quantités de matériaux.
- 20 La nature érosive des précipitations est reprise dans l'équation révisée de Wischmeier et Smith (RUSLE), comme une combinaison de l'énergie totale libérée lors d'une pluie, par mètre carré, multiplié par le maximum d'intensité mesurée sur une période de trente minutes (Shamshad *et al.*, 2008).
- 21 Bien que le processus érosif, inhérent à la formation des reliefs, puisse dans la région être très rapide, Salomon (1998) cite un recul d'une dizaine de mètres par an dans l'est du plateau du Kwango-Kwilu, le rôle de l'activité anthropique dans l'apparition et l'accélération du mécanisme est loin d'être anecdotique. La déforestation, l'utilisation de pratiques agricoles inappropriées, mais aussi l'urbanisation spontanée des villes de pays en développement semblent fortement accélérer la déstabilisation du milieu au départ en

équilibre avec son environnement (Brandt *et al.*, 2006). Cette manifestation de l'érosion est 10 à 1000 fois plus rapide que les processus naturels (Roose, 1994).

Croissance urbaine et érosion intra-urbaine

- 22 L'organisation spatiale des villes africaines se caractérise le plus souvent par une superposition de deux modèles contradictoires : le modèle dit colonial/ blanc/ métropolitain et le ou plutôt les modèles autochtones africains (Coquery *in* Antoine, 1991). Si la ville blanche était viabilisée et équipée, la ville africaine l'était déjà moins. Depuis leur indépendance, les jeunes Etats ont prolongé un modèle d'urbanisation basé sur celui de la ville blanche en continuant la construction de cités. Néanmoins, dès la crise des années 1980, les Etats manquent de moyens. La très forte croissance urbaine (croissance naturelle et exode rural) est de moins en moins accompagnée par l'Etat ; l'urbanisation spontanée prend le relais. Elle se caractérise notamment par l'absence d'infrastructures et d'équipements urbains.
- 23 L'origine de Kinshasa n'est pas une exception sur le continent. En effet, la ville fait partie des grandes cités coloniales dont la position stratégique assurait à l'époque une certaine prospérité économique (Antoine, 1997). Si à l'époque coloniale, l'organisation urbaine ségrégative assurait une très nette séparation entre la population blanche et les populations africaines, actuellement la ségrégation n'est plus réellement basée sur une différence culturelle mais bien sur le niveau social des citoyens (Antoine, 1997), les plus démunis étant indirectement rejetés à la périphérie de Kinshasa suite à l'augmentation du prix de la terre et/ou des loyers, devenus hors de portée de la plupart des citoyens. La ville de Kinshasa s'étend vers le sud-ouest, le long de la route menant au Bas-Congo ainsi que vers l'est, vers l'aéroport de N'djili et au delà. L'urbanisation à Kinshasa consiste en un phénomène non planifié, radio-concentrique, depuis le noyau colonial urbain jusqu'aux franges pionnières péri-urbaines de plus en plus éloignées de la plupart des réseaux et équipements urbains (Delis & Girard, 1985 ; Delbart & Wolff, 2002 ; Kayembe *et al.*, 2010).
- 24 Les chefs coutumiers ont joué un rôle important dans cette urbanisation spontanée ; en effet, ayant repris possession des terres après l'indépendance, ils les ont revendues sous la forme de petits lopins, quelle que soit leur localisation (Delis & Girard, 1985). Ainsi, les collines, considérées à l'époque coloniale comme impropres à la construction, se sont vues divisées suivant une trame orthogonale comme pendant la colonisation. Les pentes les plus fortes sont pour la plupart aménagées en terrasse et donc logiquement soumises à des phénomènes de ravinement important (Delis & Girard, 1985).
- 25 En République Démocratique du Congo, l'apparition de mécanismes de dégradation des sols suite à l'urbanisation rapide et souvent incontrôlée n'est cependant pas uniquement restreinte à la seule ville de Kinshasa. La ville de Kikwit, localisée dans la province du Bandundu, serait également fortement touchée par l'érosion ; la perte de sol étant estimée, dans certains quartiers, à 1 cm par an et ce, sur des pentes inférieures à 5 %. D'autres villes du Congo, telles que Bukavu ou encore Kolwezi rencontrent également le même problème (Van Caillie, 1983). De nombreuses villes à travers le monde sont également touchées. Prat et Sayago (2003) relatent, par exemple, le problème de ravinement lié à une mauvaise utilisation du sol dans la ville de San Miguel de Tucuman en Argentine. De récentes recherches ont démontré que les chemins créés de manière spontanée ou artificielle sont à l'origine d'une plus grande perte de sédiments que les

terres dites arables (Sidle *et al.*, 2006). D'où l'importance d'améliorer les techniques de détection, de suivi et d'analyse de l'évolution des têtes d'érosions afin d'améliorer la connaissance et le contrôle du phénomène en zone urbaine.

Apport de la télédétection

- 26 L'analyse de photographies aériennes et plus récemment d'images satellitaires a contribué à la cartographie, au suivi et à l'évaluation des processus érosifs (Vrieling, 2006). Au cours de ces trente dernières années, de multiples études sur le sujet ont été publiées (Barnes *et al.*, 2002 ; Bocco *et al.*, 1993 ; Dhakal *et al.*, 2002 ; Gay *et al.*, 2002 ; Nachtergaele et Poesen, 1999). La photo-interprétation fut mise de côté suite à l'apparition et à l'engouement pour les données et traitements numériques.
- 27 Cependant, depuis 1999, l'existence d'images de résolution métrique a réhabilité les anciennes pratiques d'interprétation visuelle (Provencher et Dubois, 2006) ; une combinaison des analyses numériques d'images satellitaires aux méthodes d'interprétation visuelle, basées sur l'élaboration de clefs d'interprétation, permettra probablement d'aboutir à une plus grande objectivité au niveau de l'identification des objets ainsi que de certains phénomènes physiques, que constitue notamment le processus d'érosion régressive. Peu de travaux sur ce sujet ont à ce jour été publiés dans la littérature scientifique.

Objectifs

- 28 Les deux objectifs de cette étude sont d'améliorer la compréhension de l'érosion en milieu urbain. Le premier vise non seulement à identifier les paramètres d'interprétation visuelle des ravins, actifs et inactifs, sur une image satellitaire à très haute résolution spatiale, mais également de pouvoir par interprétation visuelle du contexte urbain, identifier l'origine des différents ravins. Le deuxième tend à retracer l'histoire et l'évolution de l'ensemble des ravins présents au niveau du bassin versant de la rivière Funa ainsi que les différents facteurs responsables de leur formation.

Description du bassin-versant de la rivière Funa

- 29 Le site d'étude (figure 1) est situé dans la zone des collines, à l'extrême sud de Kinshasa. Localisée géographiquement par 4°42' de latitude sud et 15°30' de longitude est, la région prospectée consiste en une partie du bassin versant de la rivière Funa, affluent du fleuve Congo, prenant sa source dans la commune de Lemba. D'une surface approximative de 4 km², le site se trouve en aval du plateau sableux des Bateke, connu comme étant l'une des multiples terrasses délimitant la cuvette centrale d'origine alluviale du pays (Vanden Weghe, 2005). Cette zone particulière fut sélectionnée principalement pour sa haute densité en têtes d'érosion (Lelo Nzuzi, 2008) ainsi que pour son développement urbain spontané (figure 2), ce dernier se traduisant le plus souvent par une acquisition des terres sans réel schéma urbanistique, favorable à une déstabilisation du substrat de nature sableuse.

Figure 1. Localisation du bassin versant de la rivière Funa, commune de Lemba, Kinshasa.



Figure 2. Ravin apparu suite à l'inachèvement d'un collecteur (a) Aménagement urbain en terrasse sur site sensible à l'érosion (b).



Nature du substrat

- 30 Selon la classification pédologique WRB (*World Reference Base for soil resources*), les sols de la ville de Kinshasa font partie du groupe des arénosols. Caractérisés comme étant l'une des classes de sol les plus répandues au monde avec une superficie de 900 millions d'hectares, correspondant à 7% de la surface terrestre totale, les arénosols sont typiquement azonaux. On les retrouve dans tous les types de climat. Les dépôts de sables dits kalahariens datant du Tertiaire atteignent des épaisseurs importantes, jusqu'à 30 mètres au sommet des versants et 10 mètres au fond des bassins à fort colluvionnement. Le tout repose sur un socle de grès tendre d'altération variable, datant du Secondaire, lui-même installé sur un substrat de nature gréseuse formé au Précambrien (Van Caillie X.,

1976-78 ; 1987). Ces sols ont une faible capacité d'échange cationique ainsi qu'une faible capacité de rétention en eau. Ils sont, contrairement aux andosols et vertisols, peu propices à toute mise en valeur culturale sans apport d'engrais organiques extérieurs (Vande Weghe, 2005).

Climat et couverture végétale

- 31 La province de Kinshasa présente un climat de savane tropicale à saison sèche de type (Aw4)_s. La température moyenne du mois le moins chaud est toujours supérieure à 18°C. Le mois le plus sec reçoit en moyenne moins de 60 mm d'eau (Fournier, 1960). La saison sèche s'étale sur plus ou moins 117 jours, de mi-mai à mi-septembre. La saison des pluies, caractérisée par une pluviométrie nettement plus importante, occupe le reste de l'année, avec de plus faibles précipitations pour la période s'étalant de septembre à février (Van Caillie, 1983 ; Vigneau, 2000).
- 32 Les alentours de Kinshasa sont caractérisés par une forêt dense humide, semi-décidue subéquatoriale et péri-guinéenne, de vallée ou à l'état de massifs isolés dans la savane, constituée par une végétation herbacée comprenant notamment des graminées xérophiles (Van Caillie X., 1976-1978 ; 1987). Cette végétation a été modifiée par l'homme récemment notamment par le défrichement, la récolte de bois de chauffe ou encore l'urbanisation massive non contrôlée ; la végétation actuelle de la zone de collines correspond à une savane ouverte sub-steppique dégradée (Miti Tseta & Aloni Komanda, communication personnelle). Certains vestiges de forêts primaires restent néanmoins encore visibles, par exemple autour du monastère, situé en contrebas de l'Université de Kinshasa.

Données

- 33 Deux images satellitaires à très haute résolution spatiale-THRS (Quickbird panchromatique et Quickbird multi-spectrale), acquises en 2008, permirent à la fois la mise en place d'une approche visuelle d'interprétation des ravins actifs et inactifs ainsi que l'identification de leur origine. Les images furent enregistrées en dehors de la saison sèche en vue d'éviter une couverture nuageuse trop importante, caractéristique de cette époque de l'année. Le risque de présence de cumulus est néanmoins également élevé au cours de la saison des pluies.
- 34 Un inventaire exhaustif de l'ensemble des ravins et des infrastructures de collecte des eaux de pluies présentes au niveau du bassin versant de la rivière Funa a été réalisé sur le terrain entre octobre 2007 et septembre 2008. Il avait pour objectif de valider l'interprétation visuelle mais aussi d'identifier les différents facteurs responsables du ravinement en milieu urbain. Les données obtenues par GPS différentiel ont été récoltées à pied à cause de la faible accessibilité des différentes zones prospectées. Toutes les infrastructures de récolte des eaux de pluie, telles que les collecteurs ou encore les caniveaux, ont été levées. D'autres données, telles que la largeur, la longueur, l'orientation, la pente ainsi que l'état général, ont également été relevées en remplissant systématiquement des fiches de terrain. Elles représentent un apport d'information non négligeable pour la compréhension du processus de dégradation superficielle des sols de la ville de Kinshasa.

Méthodologie

Prétraitements

- 35 Afin de minimiser les erreurs d'observation et de mesure lors de l'interprétation visuelle des images panchromatique et multi spectrale, ces dernières ont subi une correction géométrique via le programme informatique Geomatica 10.1. Les coordonnées X et Y de 12 points de calage ont été relevés sur le terrain par GPS différentiel. Leurs coordonnées Z ont été fournies par un modèle numérique de terrain établi sur la quasi-totalité de la ville de Kinshasa, par la méthode dite RST (Regularized Spline Tension), l'interpolation ayant été réalisée à partir de la digitalisation systématique des courbes de niveau, équidistantes de 5 mètres, d'une carte topographique de la ville de Kinshasa, au 1/10 000, réalisée par l'IGCB (*Institut Géographique du Congo Belge*). La correction géométrique prend en compte les points de calage mais également les caractéristiques associées au satellite ainsi qu'au capteur lors de l'enregistrement de l'image.
- 36 Pour améliorer l'interprétation visuelle détaillée des ravins et de leurs caractéristiques, l'image panchromatique d'une résolution de 0,6 m a été fusionnée avec les bandes bleue, verte, rouge et proche infrarouge de l'image multi-spectrale d'une résolution de 2,4 m à l'aide de la commande "Pan-sharpening" d'ArcMap 9.2.©. Cette étape suppose une parfaite co-registation des images. L'interprétation visuelle des ravins a été réalisée sur une composition colorée en vraies couleurs et une en infrarouge fausses couleurs.
- 37 Ensuite, la zone à interpréter fut limitée aux plus fortes pentes comprises au sein du bassin versant de la rivière Funa. Van Caillie (1983), dans ses recherches sur l'érosion des sols en République Démocratique du Congo, affirme que la grande majorité des ravins se situe pour la ville de Kinshasa sur des pentes estimées à 10, 15, voire 20 % au grand maximum. Les pentes ont été calculées à partir du modèle numérique de terrain dans d'ArcMap 9.2.©. La carte des pentes a été seuillée pour isoler les pentes supérieures à 10 % et constituer ainsi un masque réduisant l'interprétation visuelle aux fortes pentes.
- 38 Enfin, les crêtes du bassin-versant de la rivière Funa ont été délimitées sur base du modèle numérique de terrain à l'aide de la fonction "Basin" d'ArcMap 9.2.©. Cette fonction repose sur le calcul préalable du sens d'écoulement des eaux.

Interprétation visuelle

- 39 Les paramètres d'interprétation visuelle des ravins ont été analysés sur les images THRS et ont été organisés dans une clef d'interprétation. Deux types de clefs d'interprétation sont identifiés dans la littérature scientifique (Lillesand et al., 1994). L'une, dite "sélective", vise à simplement décrire l'apparence des objets sur l'image par l'utilisation d'une combinaison de critères estimés comme les plus utiles à l'interprétation. L'autre, qualifiée de "clef d'élimination", se base, quant à elle, sur une clef dichotomique évoluant par étape du général au particulier. Cependant, même si cette dernière présente l'avantage d'être plus simple d'utilisation, elle aboutit à des erreurs dans la détermination de la nature des objets et ce surtout lorsque l'interprète doit faire un choix entre deux caractéristiques de l'image qu'il ne connaît pas (Lillesand et al., 2004). Pour cette raison, la clef d'interprétation dite sélective fut choisie.

Levés DGPS

- 40 Les données enregistrées par le récepteur utilisé sur le terrain et par la base ont été extraites via "Terrasync". Par la suite, l'ensemble des données récoltées a subi une correction différentielle à l'aide du programme "Pathfinder".
- 41 D'autres manipulations ont également été effectuées et ce afin d'améliorer la visualisation de l'ensemble des résultats, au sein d'un système d'information géographique. Le fait est que de nombreuses données se sont retrouvées sous la forme d'un ensemble de points et de fragments de lignes et ce faute de pouvoir garder sur de longues périodes une constellation de quatre satellites, nécessaire à la mesure en continu des ravins et autres objets. Pour remédier à cela, différentes fonctions du programme ArcMap 9.2© ont dès lors été employées, le but étant de rassembler les données similaires dans de nouveaux fichiers et d'assurer la reconstruction de l'ensemble des infrastructures de récolte des eaux de pluie ainsi que la mise en place d'une zone tampon le long des routes, caniveaux et collecteurs.

Résultats et analyses

Interprétation visuelle

- 42 L'interprétation visuelle sur les images THRS aboutit à une clef d'interprétation originale rassemblant les critères essentiels pour interpréter les ravins (tableau 1). La limitation de la zone à interpréter grâce au masque des fortes pentes et du bassin de la Funa s'est révélée très efficace. Le seuillage des pentes à 10 % n'a pas conduit à l'omission de ravins ; néanmoins, le masque aurait pu être dilaté afin d'éliminer les petites zones.

Tableau 1. Clé d'interprétation visuelle utile à la détection des ravins, à l'échelle 1/3 000.

Forme		Texture (en panchromatique)		Couleur			
2D	Ombre et déviation radiale	Ravin actif	Ravin inactif	Fusion d'images			
				Vraies couleurs		IR Fausses couleurs	
				Actif	Inactif	Actif	Inactif

Allongée dans le sens de la pente	En creux	Hétérogène				Sol nu	Végétation herbacée
	En "V" ou en "U"	Grenue et constituée d'éléments de taille variable	Homogène	Jaune clair associé au sable	Vert	Turquoise et blanc	Versants à l'ombre vert très foncé
Serpente le long du versant	Ligne de fond visible et parallèle au bord du ravin	Présence d'arbres et d'herbes et de sols nus	Fine et grenue			Parfois présence d'arbres	Versants exposés vert à reflets rouges
					Présence de taches rouges	Arbres Rouge vif	

- 43 La forme est l'élément le plus important dans l'interprétation des ravins. Analysée sur l'image panchromatique, elle permet d'identifier les bords des ravins car ils sont allongés dans le sens de la pente (comparaison avec le modèle numérique de terrain). La forme ondule le long de la pente au fur et à mesure de la remontée vers la tête d'érosion ; une explication plausible consisterait à invoquer l'hétérogénéité de la partie superficielle du sol, notamment déterminée par la végétation et/ou la topographie des lieux. En effet, une végétation arbustive, possédant un système racinaire important, influencera probablement plus le devenir de la forme qu'une fine couverture herbeuse.
- 44 L'ombre et la déviation radiale donnent une impression de relief. Celles-ci jouent un rôle important dans l'interprétation puisque contrairement à d'autres éléments qui s'élèvent à partir de la surface du sol, tels que les arbres ou encore les bâtiments, les ravins s'y enfoncent. La ligne de fond est toujours visible grâce à l'ombre ; elle suit le tracé du bord du ravin. L'ombre et la déviation radiale nous informent sur l'incision que forme le ravin dans le sol ainsi que sur sa forme en "U" ou en "V".
- 45 La texture en panchromatique permet de discriminer les ravins actifs (texture hétérogène grenue et constituée d'éléments de taille variable) des ravins inactifs (texture homogène fine et grenue). La texture hétérogène des ravins actifs est causée par l'alternance, entre une végétation herbacée, d'un sol nu de nature sableuse, et d'arbres de taille variable.
- 46 Il apparaît, sur la composition colorée en vraies couleurs, que la végétation est fortement présente au sein des ravins inactifs sur versant peu ou pas urbanisé. Il semble dès lors possible, grâce à ce paramètre, d'identifier directement les ravins stabilisés et ce par leur couleur verte très prononcée ; le sable, de teinte jaune clair, non présent au niveau de ces derniers, constitue, quant à lui, un critère en faveur de l'activité.
- 47 La composition colorée en infrarouge fausses couleurs a, quant à elle, permis de confirmer l'importance de la couverture végétale observée au niveau des ravins stabilisés, les ravins actifs étant caractérisés par une couleur turquoise voire blanche traduisant l'absence de végétation.
- 48 La structure, correspondant à l'association des objets les uns par rapport aux autres, ne semble pas ici d'une grande utilité. En effet, comme l'origine des ravins dépend exclusivement de l'action de l'homme sur son milieu, notamment par la construction

d'infrastructures telles que les collecteurs ou les routes, il semble très difficile de définir une structure généralisable à l'ensemble des bassins versants de la région des collines.

- 49 Par contre, le contexte est très utile pour identifier l'origine des ravins (tableau 2). L'origine des ravins a été interprétée systématiquement sur la zone d'étude à partir de l'image satellitaire et commentée à l'aide des connaissances accumulées lors de la mission de terrain. En effet, la proximité d'une route macadamisée permet de faire l'hypothèse que les caniveaux longeant la route ne sont plus opérationnels et sont probablement rompus à l'amont de la tête d'érosion.

Tableau 2. Origine et activité des différents ravins (Réalisation : T. Wouters, 2008).

Ravins	Actif / Inactif	Origine	Remarques complémentaires
1	A	Rupture d'un "puits perdu"	
2	A	Fin d'une canalisation	L'eau sortant de la canalisation a continué son chemin le long de la pente.
3	A	Fin d'un collecteur	Construction du collecteur jusqu'au milieu du versant (1992). L'eau continue sa route jusqu'au bas du bassin.
4	A	Rupture de l'une des deux canalisations reliées à l'un des puits perdus de l'ISTEM (Ecole supérieure)	L'eau ne s'accumulant plus dans le puits s'écoule sur le sol présentant une faible couverture végétation. Ravin récent (2006-2007).
5	I	Rupture d'un puits perdu	Un nouveau puits perdu a été construit à côté du précédent, permettant ainsi au ravin de se stabiliser par la végétation.
6	I	Rupture d'un bassin de rétention	
7	I	Rupture d'un bassin de rétention	Ravin formé lors du débordement des eaux contenues dans le bassin de rétention.
8	I	Rupture d'un bassin de rétention	Débordement d'un bassin de rétention responsable de la formation des ravins 10 et 11.
9	A	Rupture d'un collecteur	Le collecteur construit, après remblaiement du bassin en 1970, fut sapé par le ruissellement de surface. Ce dernier devait probablement récolter les eaux provenant du centre hospitalier universitaire situé en amont. La reprise de l'érosion est liée à la mise en culture du fond du ravin.

10	I	Rupture d'un bassin de rétention	
11	I	Fin de canalisation	Formé par le déversement des eaux provenant de l'hôpital universitaire.
12	A	Rupture d'un bassin de rétention	Ravin stabilisé par le remblaiement du bassin de rétention situé en amont. L'écoulement des eaux, provenant probablement de la canalisation, responsable du ravin n°13, a relancé la formation de petits ravins.
13	A	Rupture d'un collecteur	Le collecteur, construit en travers du sens d'écoulement des eaux de surface, a fini par être désensablé jusqu'à se retrouver suspendu. Il se rompit finalement sous son propre poids en 2002 - 2003.
14	I	Rupture d'un bassin de rétention	Le bassin de rétention n'a pas pu contenir les eaux accumulées lors d'une forte pluie. Ce dernier a finalement été bouché avant 1970 et remplacé par un collecteur.
15	A	Sentier	Les étudiants de l'Université de Kinshasa, habitant sur le Mont Ngafula, situé sur le versant opposé à l'Unikin, ont créé des sentiers parallèles à la pente pour se rendre plus rapidement sur le campus.
16	A	Rupture d'un bassin de rétention	
17	A	Débordement du bassin de rétention et rupture d'un caniveau	Le bassin de rétention a, comme les autres, débordé suite à une pluie décennale voire centenaire plus importante que les autres en débit. Le caniveau cassé situé en amont ronge la route menant à Kimwenza, situé plus au sud de l'Unikin et du bassin versant de la rivière Funa.
18	A	Débordement du bassin de rétention et rupture d'un caniveau	Les eaux récoltées par le bassin versant ci-dessus ont débordé en deux endroits différents, générant ainsi deux têtes d'érosion.
19	A	Concentration des eaux s'écoulant le long des versants	Les eaux s'écoulant le long du mont Ngafula, ainsi que celles venant de l'Université de Kinshasa se sont concentrées et ont ensuite probablement suivi un sentier dirigé dans le sens de la pente.
20	A	Sentier	L'eau s'est engouffrée dans le sentier orienté dans le sens de la pente.

- 50 Lorsque l'on distingue sur l'image satellitaire une série de lignes entaillant les versants du bassin, il est fort probable qu'elles correspondent à des sentiers parallèles à la pente. Une analyse plus approfondie permet généralement de mettre en évidence des élargissements correspondant au développement de jeunes ravins. La forme prise par ces derniers, lorsqu'ils sont proches les uns des autres, ressemble à un réseau de chenaux anastomosés, partant d'un même point, situé en aval de la pente.
- 51 Il est également possible, contre toute attente, de déterminer l'origine d'un ravin lorsque celui-ci est lié à la rupture d'un ancien bassin de rétention. En effet, les nombreuses lutttes passées, visant à stabiliser la structure, ont le plus souvent laissé une végétation dense sur le pourtour de l'ensemble des infrastructures de rétention. En conséquence une image infrarouge fausse couleur peut être utilisée pour visualiser le haut des différents ravins et ce, en vue d'y retrouver une ligne de végétation (figure 3).

Figure 3. Vestiges de lutte anti – érosive au niveau des bassins de rétention sur une image Quick Bird IR fausses couleurs.

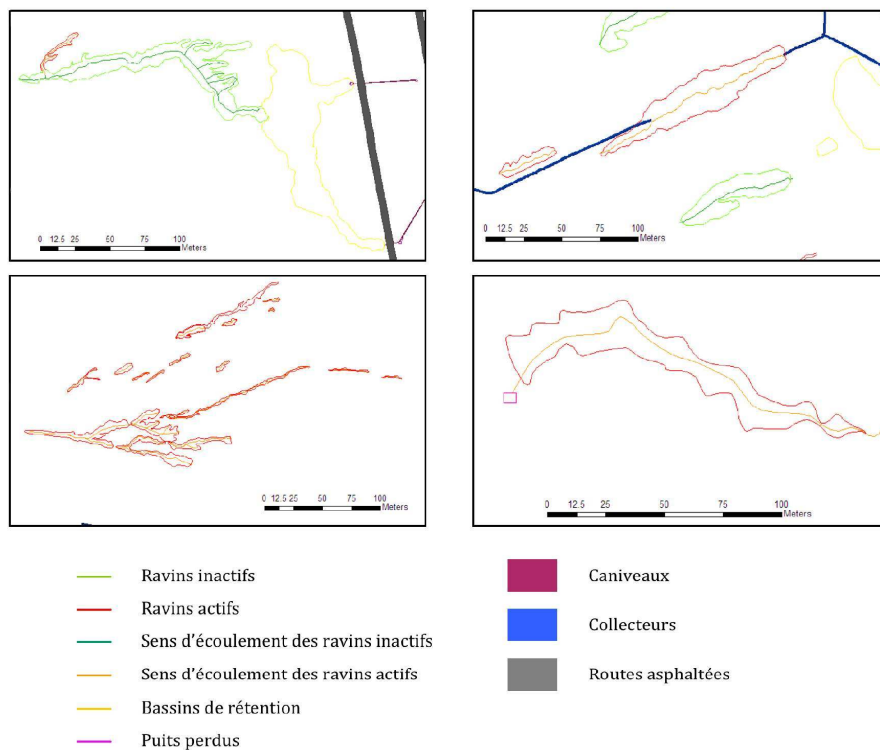


- 52 Lorsque l'on aperçoit sur l'image un ravin localisé sur ou à proximité d'une ligne de plusieurs dizaines voire centaines de mètres de long, partant du sommet du bassin jusqu'au point le plus bas, l'origine du ravinement est liée à la présence d'un collecteur ayant été bouché par manque d'entretien ou cassé par affouillement (tableau 2).
- 53 Quand aucun des cas cités ci-dessus ne correspond à ce que l'on voit sur l'image, il est alors fort probable que l'origine soit liée à la rupture d'un caniveau ou d'un puits perdu, la proximité d'une route étant toutefois nécessaire au développement de ce genre de ravins. Malheureusement, suite à la faible taille de ces deux types d'infrastructures, il semble difficile de pouvoir trancher entre les deux possibilités.

Inventaire des ravins par DGPS

- 54 L'analyse et la mise à jour des résultats DGPS récoltés sur le terrain ont permis de valider l'interprétation visuelle et de mettre en évidence quatre origines possibles de développement des ravins dans la région des collines et plus particulièrement au niveau du bassin versant de la rivière Funa.
- 55 La première origine concerne les bassins de rétention et fut, de 1954 jusqu'à la fin des années 1960, considérée comme l'une des principales causes du mécanisme de ravinement (communication personnelle, Miti Tseta et Aloni Komanda). En effet, lors de la construction de l'université surplombant le bassin versant, le système d'évacuation des eaux de pluie était basé sur un ensemble de canalisations externes dont l'exutoire final consistait en de grands bassins situés juste en aval du plateau et en amont du versant et ayant pour principale fonction de permettre une infiltration des précipitations sans ruissellement préalable à la surface du sol (figure 4 – a).

Figure 4. Relevés DGPS montrant les différentes origines possibles du développement des ravins au niveau du bassin versant de la rivière Funa : débordement d'un bassin de rétention (a), rupture d'un collecteur (b), sentier établi par le passage répété de la population locale (c), ensablement et rupture d'un puits perdu (d).



- 56 Cependant, le manque d'entretien par curage du fond, colmaté notamment par l'accumulation d'argiles transportées par les eaux de pluie, ainsi que l'accumulation de déchets en tout genre, lié à l'absence totale d'infrastructures pouvant les accueillir, ont rapidement rendu le fond imperméable. Une succession de fortes pluies a par la suite provoqué le débordement de l'ensemble de ces infrastructures construites pour réguler le débit des eaux. Malgré les réparations successives des zones de faiblesse présentes sur le pourtour de ces bassins par une végétation à croissance rapide et système racinaire

important capable de fixer convenablement le sol, tels que les bambous, les bassins furent finalement rebouchés et remplacés, entre 1969 et 1971, par différents collecteurs. Ces derniers présentent l'avantage d'acheminer les eaux directement vers la rivière Funa.

- 57 Toutefois, une mauvaise orientation, un mauvais dimensionnement ainsi qu'un manque d'entretien de ces collecteurs n'ont pas tardé à relancer le problème du ravinement. C'est la deuxième origine du ravinement dans la région (figure 4 - b, figure 5). En effet, lorsque le collecteur est construit en travers du sens d'écoulement des eaux de surface, il en résulte le plus souvent une concentration du ruissellement le long d'un des côtés, externe à l'infrastructure. La conséquence consiste à terme en un sapement de la base de cette dernière, pouvant aboutir en une suspension et une rupture du collecteur sous son propre poids ; l'ensablement et l'obstruction par divers déchets ainsi qu'un sous-dimensionnement peuvent amener au même résultat par le débordement des eaux ainsi récoltées.

Figure 5. Collecteurs d'eau de pluies construits entre 1969 et 1971 en remplacement des bassins de rétention.



- 58 Une troisième origine possible, ayant pu être observée grâce aux données de terrain, est la concentration des eaux de ruissellement le long des sentiers, dessinés dans le sens de la plus grande pente suite au passage répété, en un même endroit, de la population locale. Il ne suffit alors parfois que d'une seule saison des pluies pour générer un début de ravinement (figure 4 - c, figure 6).

Figure 6. Sentiers établis par la population locale et jouant un rôle dans la concentration des eaux de pluies.



- 59 La quatrième et dernière source de développement des ravins consiste finalement en la rupture ou le débordement de caniveaux et puits perdus par affouillement ou accumulation de déchets et sédiments (figure 4 - d, figure 7). Ce dernier consiste, comme le nom l'indique, en de grandes fosses jouant un rôle d'accumulation des eaux usées en vue d'une infiltration *a posteriori* dans le sol de nature sableuse et la nappe phréatique.

Figure 7. Rupture d'un puits perdu ayant engendré en contrebas la formation d'un ravin.



- 60 D'autres causes, elles aussi de nature anthropique, n'ayant pu être directement mises en évidence dans ce bassin, peuvent également être à l'origine du développement de nouvelles têtes d'érosion (communication personnelle, Miti Tseta et Aloni Komanda). On

peut parler de la présence des cultures vivrières intra-urbaines positionnées sur les versants (figure 8 – b) et dégradant la partie superficielle des sols ainsi que des parcelles résidentielles totalement dénudées de végétation en signe d'appartenance (figure 8 – a), sur lesquelles reposent des maisons constituées de toits bétonnés, goudronnés ou tout simplement en tôles. L'orientation des toits selon une direction préférentielle et la concentration des eaux de pluie en une même zone accentuent généralement le processus de ravinement au pied des habitations.

Figure 8. Parcelle résidentielle accélérant la perte de sol en aval de la pente (a). Cultures vivrières intra-urbaines dégradant la partie superficielle du sol (b).



- 61 Il est ainsi paradoxal de voir que les installations établies en vue de combattre l'érosion deviennent à leur tour, par manque d'entretien ou suite à une erreur de dimensionnement, le point de départ du problème.

Lutte anti-érosive

- 62 Face à cette situation, certaines organisations non gouvernementales, en place en République Démocratique du Congo, ont décidé depuis peu de combattre le phénomène en réinventant les méthodes de lutte anti-érosive, l'idée étant de combiner les techniques de construction des différentes infrastructures connues jusqu'à ce jour avec une végétation à croissance rapide et système racinaire important (Courtaud, 2007 ; Lelo Nzuzi, 2008). Lelo Nzuzi (2008) recense des techniques de lutte anti-érosive et met particulièrement en évidence l'usage de techniques simples (digues, drains, plantation,...) basées sur l'utilisation de matériaux peu coûteux ou de récupération (sacs de sable, fûts, pneus, carcasse de voiture, ordures,...). Malgré toutes ces attentions portées à la mise en place et l'élaboration de nouvelles méthodes de lutte, il semble néanmoins important de sensibiliser la population au problème en l'informant des gestes à appliquer en vue de minimiser ou tout simplement d'éviter la formation et le développement des ravins ; l'une des premières choses à faire est bien évidemment de réduire au maximum la dégradation du couvert végétal naturel. Plusieurs gestes aisément réalisables par tout un chacun, au sein de sa parcelle, permettraient de réduire au maximum le risque de glissement. On

entend par là : semer du gazon afin de constituer une surface homogène et dense jouant un rôle protecteur face à l'impact des gouttes de pluie ; creuser un trou de 1 m³ permettant une retenue des eaux au sein même de la parcelle afin d'éviter tout ruissellement ; élever tout autour du terrain une fine bande de terre pouvant accueillir du vétiver, une graminée originaire d'Asie, à croissance rapide et à système racinaire important pouvant aller jusqu'à trois mètres de profondeur. Elle est aujourd'hui testée sur de nombreux sites d'érosion et plus particulièrement le long des infrastructures chargées d'acheminer les eaux de pluie vers le fond des bassins versants.

- 63 Reste bien évidemment que la base du problème consiste en l'absence de plans d'aménagement de la ville de Kinshasa, qui permettraient d'organiser au mieux les espaces déjà urbanisés ainsi que ceux en devenir, le manque incontesté de canalisations le long des routes ainsi que l'absence d'entretien de celles déjà établies, cet entretien devant faire partie des priorités en termes d'aménagement des quartiers.

Conclusion

- 64 Cette étude analyse l'érosion intra-urbaine à partir d'une étude sur le bassin-versant de la rivière Funa, localisé à Kinshasa, proche de l'université située au sud de la ville. Elle démontre qu'il est possible de réaliser un inventaire des ravins actifs et inactifs par interprétation visuelle d'images à très haute résolution spatiale. La méthode devrait être appliquée sur des zones plus vastes. Cependant, même si le succès de l'interprétation visuelle, défini en termes de qualité et de quantité de données extraites (Denègre, 1994), est lié à l'entraînement ainsi qu'à l'expérience de l'interprète, nous disposons d'une technique d'inventaire permettant de localiser les ravins et d'identifier les causes du ravinement pour la totalité de la ville de Kinshasa tout en s'affranchissant des problèmes d'accessibilité et des interactions parfois difficiles avec les populations défavorisées et menacées par le ravinement.
- 65 Les paramètres d'interprétation utiles ont été rassemblés dans une clef d'interprétation des ravins actifs et inactifs sur sol de nature sableuse. En effet, la forme et la déviation radiale visibles sur l'image panchromatique permettent de localiser les ravins, de tracer leurs contours et leur ligne de fond. La texture sur l'image panchromatique et la couleur sur des compositions en vraies couleurs ou en infrarouge fausses couleurs appuient la discrimination entre les ravins actifs et inactifs. Le contexte quant à lui autorise l'expert en érosion intra-urbaine d'identifier les causes du ravinement.
- 66 La cause du ravinement peut être pour chaque ravin déduite d'une analyse contextuelle de l'image THRS et commentée à l'aide d'une analyse de terrain. Les causes sont confirmées par le relevé exhaustif des ravins par levé DGPS. Dans la zone d'étude, on observe quatre causes principales du ravinement : le débordement des bassins de rétention, la rupture de collecteurs, les sentiers créés dans le sens de la pente et l'ensablement puis la rupture de puits perdus. Nombreuses ont été les infrastructures qui n'ont pas supporté la nature érosive des précipitations ainsi que l'instabilité de la partie superficielle des sols dits sableux. Le manque d'entretien ainsi que l'absence de sites pouvant accueillir les diverses immondices de la population kinoise ont aussi joué un rôle certain dans l'échec de lutte contre le ravinement.
- 67 Cependant, les recherches effectuées en la matière, visant à rompre l'impuissance régnant autour du problème, poussent chaque jour à de nouvelles innovations. Les

techniques de lutte développées tentent de mettre au point des infrastructures plus performantes grâce principalement à une combinaison judicieuse de l'expérience acquise dans le passé et des connaissances récentes sur le sujet.

BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE P. (1991), "Croissance urbaine et insertion des migrants dans les villes africaines. L'exemple de Dakar", in *Pratiques sociales et travail en milieu urbain, Les Cahiers n° 16*, Orstom/Sud, Paris, 16 p.
- ANTOINE P. (1997), "L'urbanisation en Afrique et ses perspectives", *Aliments dans les villes*, DT/12-97F.
- BARNES E.M., BAKER M.G. (2000), "Multispectral data for mapping soil texture : possibilities and limitations", *Applied Engineering in Agriculture*, 16 (6), pp. 731-741.
- BIROT P. (1981), *Les processus d'érosion à la surface des continents*, Masson, Paris, 605 p.
- BOCCO G., VALENZUELA C. R. (1993), "Integrating satellite remote sensing and geographic information systems technologies in gully erosion research", *Remote sensing reviews*, 7, pp. 233-240.
- BOCHET E., RUBIO J.L., POESEN J. (1998), "Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain)", *Geomorphology*, 23, pp. 139-150.
- BRANDT J.S., TOWNSEND P.A. (2006), "Land use – land cover conversion, regeneration and degradation in the high elevation Bolivian Andes", *Landscape Ecology*, 21, pp. 607-623.
- COURTAUD M., MACCAFERRI F. (2007), "Traitement des griffes d'érosion sur les plateaux batékés", *Travaux n° 841*, ISSN 0041-1906 CODEN TRAVAJ, pp. 22-73.
- COTLER H., ORTEGA-LARROCEA M.P. (2006), "Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico", *Catena*, 65, pp. 107-117.
- DELBART V., WOLFF E. (2002), "Extension urbaine et densité de la population à Kinshasa : contribution de la télédétection satellitaire", *Belgeo*, 3, 1, pp. 45-59.
- DELIS P., GIRARD C. (1985), "L'immobilisation privée du sol à Kinshasa", *Les Annales de la recherche urbaine*, 25, 20 p.
- DENÈGRE J. (1994), *Cartographie thématique dérivée des images satellitaires*, Elsevier Science Ltd, 1^{ère} édition, Grande Bretagne, 269 p.
- DE PLOEY J. (1998), "Enkele bevindingen betreffende erosieprocessen in hellingsevolutie op zandig substrat", *Bull. SOBEG*, XLI, 1, pp. 43-67.
- DHAKAL A.S., AMADA T., ANIYA M., SHARMA R.R. (2002), "Detection of areas associated with flood and erosion caused by a heavy rainfall using multitemporal Landsat TM data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (3), pp. 233-239.

- EPEMA G.F., RIEZEBOS H.T. (1983), "Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing the erosivity of simulated rain", *Catena*, Suppl. 4, pp. 1-17.
- FITZJOHN C., TERNAN J.L., WILLIAMS A.G. (1998), "Soil moisture variability in semi-arid gully catchment : implication for runoff and erosion. control", *Catena*, 32, pp. 55-70.
- FOURNIER F. (1960), *Climat et érosion ; la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. Presses universitaires de France, Paris, 201 p.
- GAUCHER G. (1968), *Traité de pédologie agricole : le sol*, Dunod, Paris, 578 p.
- GAY M., CHERET V., DENUX J-P. (2002), "Apport de la télédétection dans l'identification du risque d'érosion", *La Houille Blanche*, 1, pp. 81-86.
- GRECO J. (1978), *La défense des sols contre l'érosion*, La maison rustique, Paris, 183 p.
- KAYEMBE M. et al. (2009), "Cartographie de la croissance urbaine de Kinshasa (R.D.Congo) entre 1995 et 2005 par télédétection satellitaire à haute résolution", *Belgeo*, 10, 3-4, pp. 439-455.
- KIRKBY M.J., MORGAN R.P.C. (1980), *Soil erosion*, John Wiley et Sons, Chichester, 316 p.
- KNAPEN A., POESEN J., GOVERS G., GYSSELS G., NACHTERGAELE J. (2007), "Resistance of soils to concentrated flow erosion : A review", *Earth-Science Review*, 80, pp. 75-109.
- LARNEY F.J., JANZEN H.H., OLSON B.M., OLSON A.F. (2009), "Erosion – productivity – soil amendment relationships for wheat over 16 years", *Soil et Tillage Research*, 103, pp. 73-83.
- LILLESAND T.M., KIEFFER R.W., CHIPMAN J.W. (2004), *Remote sensing and image interpretation*, 5^e édition, Wiley International Edition, New York, 763 p.
- LELO NZUZI (2008), *Kinshasa. Ville et environnement*, Paris, l'Harmattan, 282 p.
- MERMUT A.R., LUK S.H., RÖMKENS M.J.M., POESEN J.W.A. (1997), "Splash loss by splash and wash during rainfall from two loess soils", *Geoderma*, 75, pp. 203-214.
- MORGAN R.P.C. (2005), *Soil Erosion and Conservation*, Blackwell Publishing, 3^e édition, Oxford, 304 p.
- MUAMBA A. (2007), *Expérience de la FOLECO en matière d'assainissement du milieu urbain*, Atelier sur la définition d'une approche structurée sur la gestion des déchets solides à Kinshasa du 7 au 8 février 2007 au centre Nganda de Kinshasa, 8 p.
- NACHTERGAELE J., POESEN J. (1999), "Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. Earth Surf. Process", *Landforms*, 24, pp. 693-706.
- PEDERSEN H.S., HASHOLT B. (1995), "Influence of wind speed on rainsplash erosion", *Catena* 24, pp. 39-54.
- PRAT M-C., SAYAGO J.M. (2003), "Risques naturels, actions anthropiques et enjeux à San Miguel de Tucuman (Nord-Ouest Argentine)", *Les cahiers d'Outre-Mer : Pression anthropique et environnement en Amérique latine*, 223.
- PROVENCHER L., DUBOIS J.M. (2006), "La photointerprétation au Québec : Histoire et perspectives", *Télédétection*, 6, 1, pp. 57-70.
- SALOMON N. (1998), "Les phénomènes d'érosion accélérée du plateau du Kwango (RDC)", *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, 16, Bordeaux, pp. 45-63.
- SHAINBERG I., GOLDSTEIN D., LEVY G.J. (1996), "Rill erosion dependence on soil water content aging, and temperature", *Soil Science Society of America Journal*, 60 (3), pp. 916-922.

- SHAMSHAD A., AZHARI M.N., ISA M.H., WAN HUSSIN W.M.A., PARIDA B.P. (2008), "Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia", *Catena*, 72, pp. 423-432.
- SIDLE R.C., ZIEGLER A.D., NEGESHI J.N. *et al.* (2006), "Erosion processes in steep terrain – Truth, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia", *Forest Ecology and Management*, 224 (1-2), pp. 199-225.
- VAN CAILLIE X.D. (1976-78, 1987), *Notice de présentation de la carte géomorphologique et géotechnique de Kinshasa au 1/20 000*, Bureau d'étude d'aménagement urbain, 17 p.
- VAN CAILLIE X.D. (1983), *Hydrologie et érosion dans la région de Kinshasa. Analyse des interactions entre les conditions du milieu, les érosions et le bilan hydrologique*, Ohain, Bruxelles, Belgique, 554 p.
- VAN DE N., DOUGLAS I., McMORROW J., LINDLEY S., THUY BINH D.K.N., THI VAN T., THANH L.H., THO N. (2008), "Erosion and Nutrient Loss on Sloping Land under Intense Cultivation in Southern Vietnam", *Geographical Research*, 46 (1), pp. 4-16.
- VANDEN WEGHE J.P., FRANSSSEN J., KALAMBAY G., KRAMKIMEL J-D., MUSIBONO D. (2005), *République Démocratique du Congo, Profil Environnemental*, Contrat n° 2005/105393.
- VIGNEAU J-P. (2000), *Géoclimatologie*, Ellipses Edition Marketing S.A., Paris, 288 p.
- VRIELING A. (2006), "Satellite remote sensing for water erosion assessment : A review", *Catena*, 65 (1), pp. 2-18.
- WAINWRIGHT J., PARSONS A.J., ABRAHAMS A.D. (1999), "Rainfall energy under Croesotebush", *Journal of Arid Environments*, 43, pp. 111-120.
- WEI L., ZHANG B., WANG M. (2007), "Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in valley cropping systems", *Agriculture water management*, 94, pp. 54-62.
- XU X-L., MA K-M., FU B-J., SONG C-J., LIU W. (2008), "Influence of three plant species with different morphologies on water runoff and soil loss in a dry-warm river valley, SW China", *Forest Ecology and Management*, 256, pp. 656-663.

RÉSUMÉS

Cette étude contribue à améliorer la compréhension de l'érosion en milieu urbain. Elle propose une clef d'interprétation visuelle des ravins actifs ou non sur une image satellitaire à très haute résolution spatiale. Les ravins étant délimités, le contexte urbain est analysé afin d'identifier sur l'image l'origine du ravinement. Ces résultats sont confrontés à un levé de terrain exhaustif effectué par DGPS sur le terrain.

This study contributes to improve the understanding of the erosion process in an urban context. It proposes a visual interpretation key of the gullies, be they active or not, on a very high resolution satellite image. While the gullies are delineated, the urban context is analyzed on the image to identify the origin of each gully. These results are confronted with an exhaustive ground survey achieved by DGPS.

INDEX

Mots-clés : ravins, érosion, urbain, Kinshasa, télédétection, très haute résolution spatiale, interprétation visuelle, DGPS

Keywords : gullies, erosion, urban, Kinshasa, remote sensing, very high resolution, visual interpretation, DGPS

AUTEURS

THOMAS WOUTERS

Bio-ingénieur, SANA (Saving Africa's NATure in Tanzania), sanabio@karibusana.com

ELÉONORE WOLFF

Université Libre de Bruxelles, Analyse Géospatiale, Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire, ewolff@ulb.ac.be