

---

## Preuve et impact d'un auto-aménagement urbain dans le bassin versant de la Lukunga à Kinshasa

Fils Makanzu Imwangana<sup>1,2</sup>, Christian Kiangebeni<sup>3</sup>, Patrick Daddy Ilito<sup>1,2</sup>, Juvenal Matungila Juve<sup>1,2</sup>

<sup>(1)</sup>Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention : Géosciences. Unité de Recherches et de Formation en Gestion des Risques Naturels (URF-GRN). BP 190 Kinshasa XI (RDC). E-mail : [filmsmakanzu@yahoo.fr](mailto:filmsmakanzu@yahoo.fr)

<sup>(2)</sup>Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM). Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection. BP 898 Kinshasa I (RDC)

<sup>(3)</sup>Université Loyola du Congo. Faculté des Sciences agronomiques et vétérinaires. Département de Gestion de ressources naturelles et renouvelables/Agroforesterie. BP 7245 Kinshasa I, Kinshasa/Kimwenza (RDC).

Reçu le 15 août 2022, accepté le 19 octobre 2022, publié en ligne le 29 octobre 2022

---

### RESUME

**Description du sujet.** Le bassin versant de la Lukunga s'étend sur 34 km<sup>2</sup> à l'Ouest de Kinshasa. Au cours des six dernières décennies, ce bassin a subi une périurbanisation intense qui a transformé son paysage naturel en plusieurs bidonvilles au mépris de toutes règles d'urbanisation. Cette mutation a fini par décimer la végétation naturelle qui naguère maintenait l'équilibre hydrogéomorphologique de ces terrains constitués essentiellement des profondes altérites sableuses. Cela justifie l'importance du suivi de la dynamique de l'utilisation du sol de ce secteur de la ville.

**Objectif.** Cette recherche s'est proposée de mener une analyse diachronique de l'utilisation du sol basée sur l'évolution du couvert végétal.

**Méthodes.** L'extraction de l'information relative à l'utilisation du sol a été obtenue par la classification supervisée puis, la cartographie du couvert végétal en utilisant les photographies aériennes de 1957 et l'imagerie satellitaire Landsat de 1987, 2001 et 2013. Le traitement des images a été réalisé à l'aide des logiciels Envi 4.5 et ArcGis 10. Ce suivi a permis de déterminer la nature et le mode d'intervention des communautés qui ont présidé à la modification des formes d'utilisation globale des sols guidée par l'évolution de leurs besoins.

**Résultats.** Cette étude révèle un fort recul du couvert végétal, soit une perte de 24 km<sup>2</sup> de 1987 à 2013, avec une vitesse moyenne de disparition de la végétation de 0,9 km<sup>2</sup>/an. En conséquence, la zone anthropisée est passée de 6 à 22 puis, de 22 à 30 km<sup>2</sup> soit 87 % du bassin, respectivement en 1987, 2001 et 2013. Pourtant, cette zone ne s'étendait que sur à peine 40 ha en 1957. Il se dégage une urbanisation incontrôlée se traduisant, entre autres, par des espaces imperméabilisés sur des pentes supérieures 8,0 % exposées aux pluies d'au moins 24,9 mm avec une intensité moyenne critique de 21,8 mm/h. Il s'en suit une dégradation de l'espace, qui fragilise ainsi le milieu de vie au profit de l'érosion ravinante. L'inventaire a relevé 24 ravins d'au moins 5 m de large avec une densité de drainage de 0,14 km/km<sup>2</sup> en 2007. Cette érosion crée la sédimentation au bas des pentes et l'envasement de petits cours d'eau qui se soldent par des inondations.

**Conclusion.** Le bassin de la Lukunga a subi un développement urbain par auto-aménagement au détriment de la protection des sols et des eaux. La prolifération des quartiers d'autoconstruction qui ont gravement dégradé l'espace et le cadre vie, est la conséquence du déficit de logements auquel est confrontée la ville de Kinshasa à la suite de sa démographie toujours galopante.

**Mots clés :** Bassin versant, périurbanisation, recul du couvert végétal, érosion ravinante, Lukunga - Kinshasa.

### ABSTRACT

#### Evidence and impacts of unregulated urbanization of the catchment of Lukunga in Kinshasa

**Description of the subject.** The catchment of Lukunga extends over 34 sqkm in West Kinshasa. Over last six decades, this basin has undergone intense suburbanization, which has transformed its natural landscape into several slums in defiance of all urbanization rules. This mutation has ended up decimating natural vegetation, which once maintained hydro-geomorphological balance of these lands essentially made of deep sandy alterites. This justifies importance of monitoring the land use dynamics in this city sector.

**Objective.** This research aimed to conduct a diachronic land use analysis based on the evolution of vegetation cover.

**Methods.** The extraction of land use information was obtained by supervised classification and then mapping of land cover using aerial photographs from 1957 and Landsat satellite imagery from 1987, 2001 and 2013. Images processing was carried out using Envi 4.5 and ArcGis 10 softwares. This monitoring facilitated nature and mode determination of communities' intervention which presided over global land use form of modification guided by their changing needs.

**Results.** This study reveals a strong decline in land cover, i.e. a vegetation loss of 24 sqkm from 1987 to 2013, with an average rate of vegetation disappearance near 0.9 sqkm/year. As a result, entropized area increased from 6 to 22, and then, from 22 to 30 sqkm, respectively in 1987, 2001 and 2013. When this area barely extended over 40 ha or 0.4 sqkm in 1957. It Uncontrolled urbanization is emerging, resulting, among other things, in impermeable spaces on slopes greater than 8.0 % exposed to rainfalls of at least 24.9 mm with a critical average intensity of 21.8 mm/h. This results in a land degradation, which thus weakens living environment to the benefit of gully erosion. The inventory revealed 24 ravines at least 5 m wide with a drainage density of 0.14 km/sqkm in 2007. This erosion creates sedimentation at slopes bottom and siltation of small streams which result in flooding.

**Conclusion.** Lukunga basin has undergone urban development by self-development to detriment of soil and water protection. Proliferation of self-built neighborhoods which have seriously degraded space and the living environment is the consequence of housing deficit faced by Kinshasa city, a result of its ever-increasing demography.

**Keywords:** Catchment, suburbanization, land cover loss, gully erosion, Lukunga-Kinshasa

## 1. INTRODUCTION

L'occupation du sol est une thématique qui a fait l'objet de plusieurs recherches, programmes et rapports. L'un de plus importants est le rapport présenté par la communauté scientifique du programme international LUCC « Land Use and Cover Changes », soit "Changements d'occupation et d'utilisation des sols" (Podaire, 2003). Ce programme insiste sur l'importance d'un effort international pour mieux comprendre les effets découlant de la gestion des sols, ainsi que leurs impacts sur la variabilité spatiale et temporelle de leur utilisation. On sait que les recherches et les analyses menées sur l'occupation du sol forment une base d'informations nécessaires au planificateur et à l'aménageur (Samaali, 2011).

Aussi, les recherches dans ce domaine facilitent la gestion durable des terres et peuvent être utilisées à titre d'exemple pour la planification, la surveillance et l'évaluation du déploiement de l'activité industrielle. La détection des changements d'occupation du sol peut aboutir à des modifications des conditions climatiques locales ou régionales (Dubreuil *et al.*, 2010) mais pas au niveau global ; car on sait notamment que les contributions directes du réchauffement urbain aux climats mondiaux sont faibles (Grimmond, 2007). Même si les termes "occupation du sol" et "utilisation du sol" ont des traits communs, leurs définitions ne sont pas semblables. L'occupation du sol fait référence à la couverture de la surface du sol indifféremment par la végétation, des infrastructures, de l'eau ou autres y compris le sol nu. Selon Joly (1976), l'occupation du sol, c'est la manière dont le territoire est couvert et organisé : c'est la manière dont l'homme a pris possession de l'espace géographique et l'a façonné pour y vivre. Cette définition comporte une notion

de répartition et d'organisation. L'occupation du sol peut être définie comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées (FAO, 1994) qui désignera les aspects génétiques ou morphologiques (Steinberg, 1996). La carte d'occupation du sol tente donc de mettre en valeur la relation entre l'homme et son milieu à l'aide de différents procédés cartographiques (Omrane, 1977). Tandis que l'utilisation du sol fait référence à l'affectation du sol, par exemple pour les besoins de loisirs, l'habitat ou l'agriculture. Selon Joly (1976), l'utilisation du sol, c'est la manière dont le territoire est employé et exploité ; c'est la manière dont l'homme a su tirer parti de l'espace géographique et le marquer par son activité. L'utilisation du sol fait intervenir des aspects fonctionnels : exploitation forestière, industrie, activités tertiaires, etc. Quand il s'agit d'un espace urbain, on parle d'organisation de l'espace, dans le cadre de la répartition des implantations d'activités, de services et de résidence (George et Verger, 1970).

Entre l'occupation et l'utilisation du sol, il existe des corrélations physiques qui se traduisent par les fortes relations entre la distribution des habitants, des aménagements, du bâti d'une part et les caractéristiques du milieu naturel surtout d'autre part. Or, il existe aussi une forte corrélation entre le comportement des acteurs (groupe social) et les données économiques. Ainsi, il existe une corrélation majeure entre l'utilisation du sol et son occupation (Ben Salem, 1996). Toujours selon Joly (1976), les cartes d'occupation et d'utilisation du sol sont des cartes physiologiques qui décrivent un paysage dans ses rapports avec l'environnement physique et humain. En télédétection, les propriétés mesurées se rapportent à la couverture du sol (occupation), à partir de laquelle l'utilisation du sol

peut être déduite à l'aide de données auxiliaires ou de connaissances préalables du terrain.

Par ailleurs, il est connu que les facteurs d'érosion hydrique influençant l'intensité des processus de détachement, de transport et de dépôt sont le type de sol, l'occupation du sol, la topographie, le climat et les techniques culturales (El Hadraoui, 2013). Mais ce qui inquiète le plus est que le phénomène d'érosion hydrique est devenu principalement un résultat direct de l'activité humaine qui représente maintenant un facteur de dégradation des sols. De même, les aménagements urbains augmentent les surfaces imperméables, ce qui favorise l'intensité du ruissellement, et contribue par la suite, à l'entraînement du sol (Valentin *et al.*, 2005 ; Moeyersons et Trefois, 2008 ; Benabdesselam et Hammar, 2009 ; Moeyersons *et al.*, 2010 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2015 ; Moeyersons *et al.*, 2015). A Kinshasa, la dégradation du paysage collinaire n'est pas due à un quelconque changement climatique mais bien à un manque d'aménagement durable des bassins versants.

Malheureusement, les travaux sur l'étude spatio-temporelle de l'occupation/utilisation du sol basée sur l'évolution du couvert végétal de ces bassins sont rares ou, n'ont pas encore été menés. Le choix a été porté sur le bassin versant de la Lukunga qui subit une périurbanisation intense transformant son paysage naturel en une prolifération des bidonvilles sur des sites souvent inappropriés. Cette mutation s'est opérée au détriment de la végétation naturelle qui maintenait l'équilibre hydrogéomorphologique sur ces terrains constitués essentiellement des profondes altérites sableuses. Aussi, le suivi de l'évolution de l'utilisation du sol paraît-il très important dans l'étude des problèmes environnementaux de ce bassin versant intra-urbain. Comme l'a constaté El Garouani *et al.*, (2008), il permet de déterminer la nature et le mode d'intervention des communautés humaines qui modifient les formes d'utilisation globale des sols selon l'évolution de leurs besoins.

Dans cette optique, la présente étude a voulu explorer la vitesse de la disparition du couvert végétal naturel dans le bassin versant de la Lukunga, une des zones périurbaines de Kinshasa. Cette étude poursuit deux objectifs ; à savoir : (i) mener une étude spatio-temporelle de l'occupation du sol basée sur l'évolution du couvert végétal dans le bassin versant de la Lukunga sur ces 60 dernières années et (ii) proposer un plan d'aménagement agroforestier du bassin versant pour une gestion durable de ses ressources environnementales.

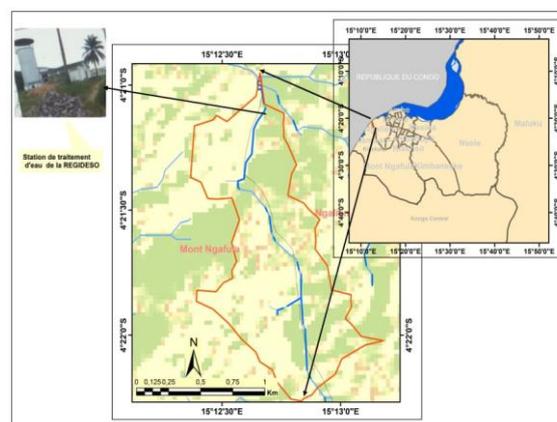
L'intérêt de l'agroforesterie repose sur sa capacité à renverser le phénomène de dégradation des écosystèmes due au déboisement qui est aussi lié aux agrosystèmes extensifs et la récolte du bois de feu. Cette technique est utilisée à beaucoup d'endroits

pour restaurer les zones dégradées en reconstituant le couvert végétal. Elle se place à l'interface des questions d'agriculture, d'environnement et d'économie sociale. En intégrant les arbres dans les exploitations agricoles, elle permet de diversifier la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales d'une communauté. Les planificateurs et décideurs pourront se servir de l'aménagement agroforestier comme outil écosystémique de la réduction des risques d'érosion ravinante qui ravagent le bassin versant de la Lukunga.

## 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 2.1. Zone d'étude

Le bassin versant de la Lukunga se situe à l'Ouest de la ville-province de Kinshasa et s'étend sur 34 Km<sup>2</sup> (Fig.1). La rivière Lukunga, longue de 11,7 Km, prend sa source à 500 m d'altitude et se jette dans le fleuve Congo (Ntombi et Tumwaka, 2004 ; Ntombi et Makanzu Imwangana, 2006). L'usine de traitement d'eau de la Régideso est une importante unité industrielle se trouvant dans ce bassin (Fig.1) et qui assure l'approvisionnement en eau potable d'une bonne partie de la population de l'Ouest de la ville.



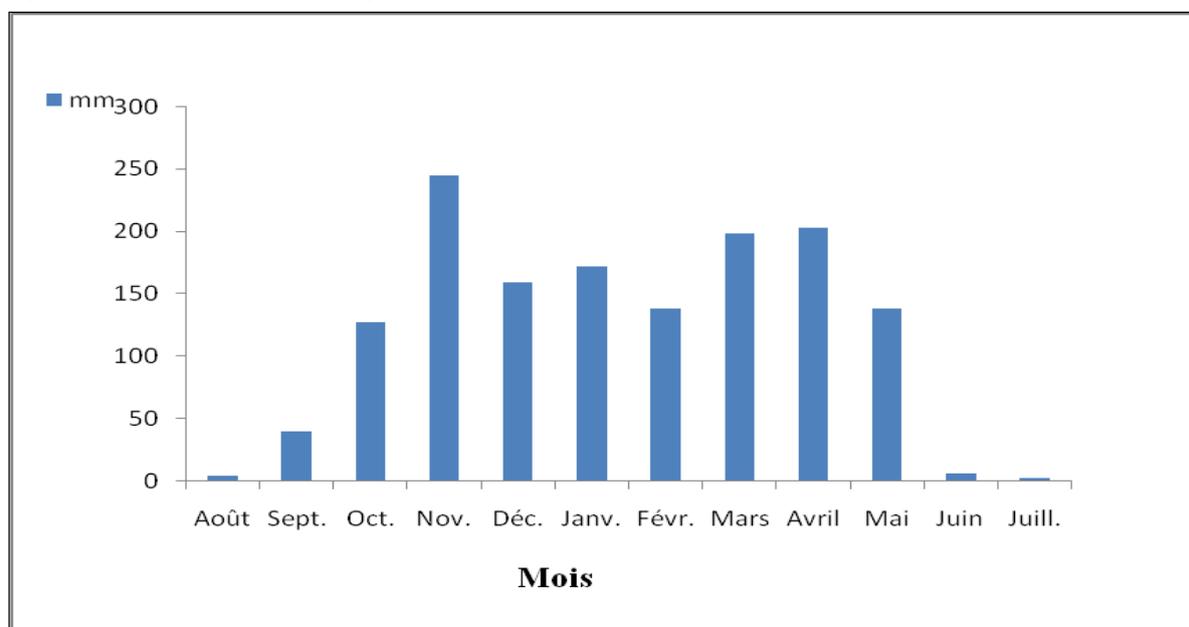
**Figure 1.** Localisation du bassin versant de la Lukunga dans la zone urbaine de la région de Kinshasa

Les formations géologiques de ce bassin versant sont marquées par la dominance de grès. Toute l'étendue du secteur est constituée des collines qui sont recouvertes par des formations d'origine sédimentaire comprenant les sables remaniés, les sables plus ou moins argileux, l'argile sableuse, l'argile et le grès tendre (Ntombi et Tumwaka, 2004 ; Ntombi et Makanzu Imwangana, 2006 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2014). Les sables remaniés qui constituent le terrain de couverture du bassin versant sont facilement érodables dans les zones de collines lorsqu'ils ne sont plus protégés par la couverture végétale. Ils peuvent accentuer l'érosion par le simple fait que leurs éléments se trouvant en surface, sont très exposés au ruissellement de l'eau des pluies.

Les sols du bassin versant de la Lukunga sont sableux. Les sables étant des matériaux non-cohérents, ce sont des particules facilement dispersées, victimes du splash (De Ploey et Savat, 1968 ; Makanzu Imwanagana *et al.*, 2014 et 2015). Un sol sableux est poreux et très perméable (Moeyersons *et al.*, 2015 ; Makanzu Imwanagana *et al.*, 2014, 2015), donc susceptible de minimiser la capacité de ruissellement. Pourtant, cet équilibre hydro-géomorphologique change avec le changement d'occupation du sol. On sait aussi qu'un sol argilo-sableux tel que celui de ce bassin est fortement érodable et décomposable sous l'action des eaux de ruissellement sur des pentes de plus de 9 à 12 voire 13 %. Ces pentes correspondent à la valeur limite de l'infiltration aisée des eaux et au début de la concentration du ruissellement (Van Caillie, 1990).

Le bassin versant de la Lukunga connaît un climat tropical chaud et humide du type Aw<sub>4</sub> selon la

classification de Köppen. Il affiche une température annuelle moyenne de 25,1°C. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 1500 mm (Ntombi *et al.*, 2004 et 2006 ; Makanzu Imwanagana *et al.*, 2014). D'après Bultot (1971), le régime pluvial de la région de Kinshasa jouit d'une double périodicité : la première période pluvieuse s'étant de septembre à janvier avec novembre comme mois le plus pluvieux qui plus de 200 mm et la deuxième période pluvieuse s'étant de mars à mai avec un maximum observé en avril ; ces deux périodes sont intercalées par deux saisons sèches dont la plus courte et la moins sèche va de janvier à février et la seconde, plus sèche s'étend de mai à septembre avec juillet comme le mois le plus sec avec moins de 2 mm (Fig.2).



**Figure 2.** Variation mensuelle des pluies à Kinshasa Ouest de 1961 à 2005. Données rangées en année hydrologique sur la base des relevés obtenus à la station METTELSAT de Kinshasa/Binza (Makanzu Imwanagana, 2010).

Jusqu'aux années 1970, ce bassin versant était naturellement protégé par une couverture forestière dense sèche et savanicole arbustive. La strate arbustive était constituée des *Loudezia* sp, *Syzygium macrocarpus*, *Hymenocardia acida*, *Anona caryophyllas* et celle herbacée inférieure était composée de *Sporobolus* sp, *Rhynchalytrum roseum*, *Digitaria brazzae*, etc. A ce jour, la forêt naturelle a complètement disparu laissant place au défrichement des forêts, à l'expansion agricole aléatoire et aux habitations informelles. C'est autour de ces dernières qu'on retrouve quelques arbres fruitiers (*Mangifera indica*, *Dacryodes edulis*, *Persea Americana*, etc.) ainsi que diverses espèces

de la famille de *Poaceae* (*Pueraria javanica* et *Panicum maximum*) utilisées comme plante antiérosive.

## 2.2. Matériels utilisés

Le bassin versant de la Lukunga a été étudié d'abord en l'extrayant de la mosaïque des photographies aériennes de 1957 de la région de Kinshasa (Ex-Léopoldville). L'échelle de ces photographies est d'environ 1/20.000. Un stéréoscope à miroir de marque Sökkisha, Tokyo 8426, doté des oculaires grossissant permet de distinguer des objets de l'ordre de 2 m.

Il a fallu ensuite acquérir un certain nombre d'images satellitaires de la ville province de Kinshasa de haute résolution spatiale prises par un satellite à capteur passif. Ayant du mal à acquérir des images de bonne qualité, c'est-à-dire sans rayure ni plage de nuages, l'étude s'est contentée de trois images satellitaires Landsat TM de 1987, 2001 et 2013. Le Modèle numérique de terrain (MNT), extrait de deux images SPOT 5 panchromatiques de 5 m de résolution spatiale de la région de Kinshasa en 2006/2007 (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014), a été ajouté à la liste afin d'extraire les thalwegs.

### 2.3. Approche méthodologique

Par la photo-interprétation de l'extrait des photographies aériennes, il a été possible de numériser les zones anthropisées présentes dans le bassin versant (Godet et Thomas, 2013 ; Provencher-Provencher-Nolet *et al.*, 2014). Le reste de l'espace est occupé par la forêt dense sèche et la savane

boisée. L'interprétation des images satellitaires est une discipline toute entière ; les différents principes et théories sont décrits dans la littérature classique (Van der Meer et de Jong, 2001).

La méthodologie utilisée se base sur la classification supervisée (Canty, 2014,) et la cartographie du couvert végétal par l'extraction de l'information relative à l'utilisation du sol avec les logiciels Envi 4.5 et ArcGis 10. La classification supervisée est la méthode la plus utilisée dans la réalisation des études spatio-temporelles. La composition colorée en vraie couleur donnant des images illisibles, une composition colorée fausse couleur a été réalisée à partir des bandes 7, 4 et 2 pour les images Landsat de Kinshasa 1987 et 2001 (Tableau 1). Pour l'image Landsat 2013, la composition colorée en vraie couleur a été faite en rassemblant les bandes 1 et 2 (Tableau 2).

**Tableau 1.** Composition colorée réalisée à partir de différentes bandes des images Landsat de 1987 et 2001

Couleurs/Bandes			Caractéristiques			
Infrarouge	Rouge	Vert	Eau	Végétation	Sol nu, bâti et parcelles agricoles	Nuage
7	4	2	Sombre clair	La végétation apparait en vert	Ces zones apparaissent en rouge, brun	Blanc et sombre pour son ombre

**Tableau 2.** Composition colorée réalisée à partir de différentes bandes de l'image Landsat de 2013

Couleurs/Bandes			Caractéristiques			
Rouge	Vert	Bleu	Eau	Végétation	Sol nu, bâti et parcelles agricoles	Nuage

Le constat est que les caractéristiques de ces deux tableaux sont presque inchangées. Ce qui serait dû à la présence des bandes 2 et 4 (ou bande 3 dans le Tableau 2) représentant respectivement la couleur verte et la couleur rouge. Toutes ces compositions ont été réalisées à l'aide du logiciel Envi 4.5. L'extraction du bassin versant de la Lukunga a été faite sur chacune de ces 3 images avec ArcMap 10. Pour chaque classe d'occupation du sol, on a réalisé 20 points représentatifs de différents pixels sur l'image. Ainsi, le logiciel a mené de manière automatique une analyse des pixels inclus dans les parcelles d'entraînement et à réaliser à la fin un fichier de signatures spectrales plus proches pour chaque catégorie d'occupation du sol. La rivière Lukunga étant moins large, la résolution spatiale n'a pas permis de générer la classe « eau ». Elle a été numérisée à l'aide du Modèle Numérique de Terrain 2010. Pour les autres classes, les images n'ont pas permis de distinguer la « savane », les « parcelles agricoles » car elles n'apparaissent pas nettement. Face à une telle difficulté, l'étude est limitée à trois

classes d'occupation du sol à partir de la classification supervisée : zone anthropisée (urbanisée, agricole), zone couverte par la végétation (forêt dense sèche, savane) et les nuages. Après la classification supervisée, la réalisation de la cartographie d'occupation du sol a été faite en attribuant à chacune des classes une couleur (la végétation en vert, la zone anthropisée en rouge, les nuages en blanc et le réseau hydrographique en bleu).

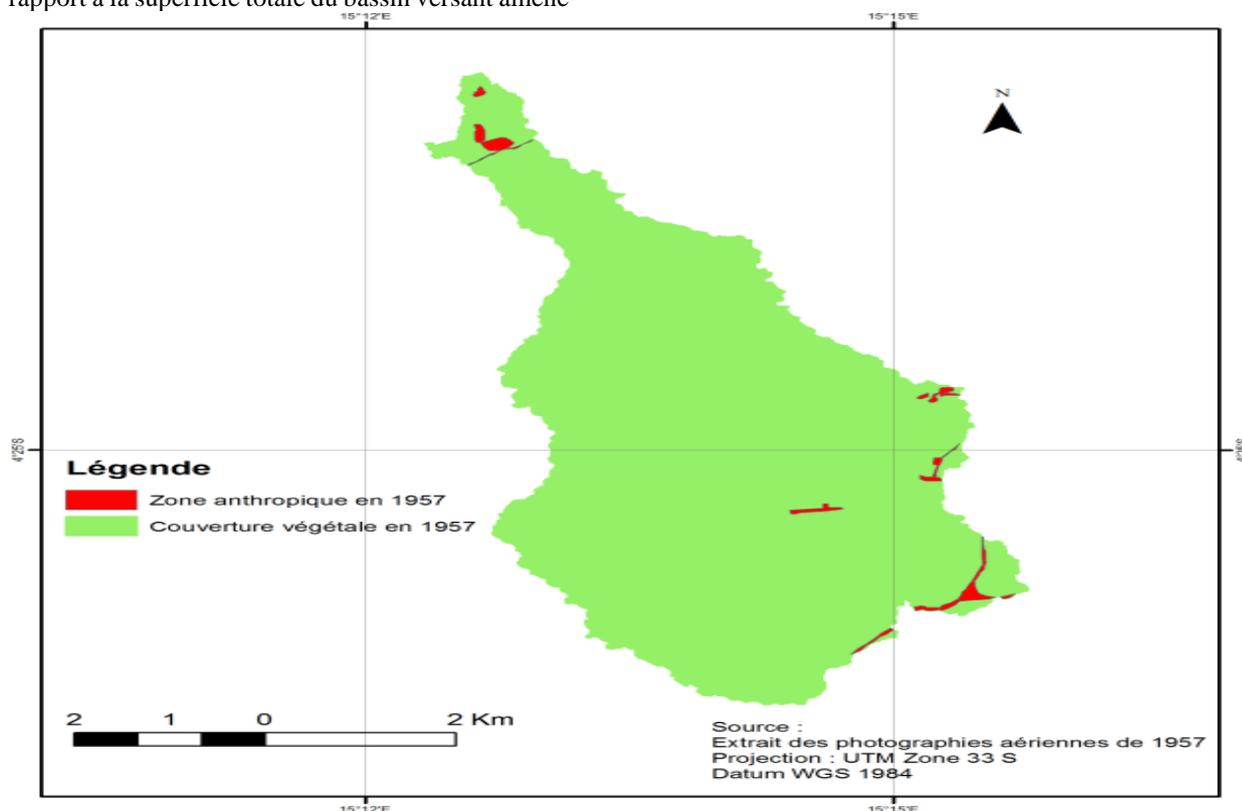
## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1. Cartographie de l'occupation de sols et Taux de disparition de la végétation

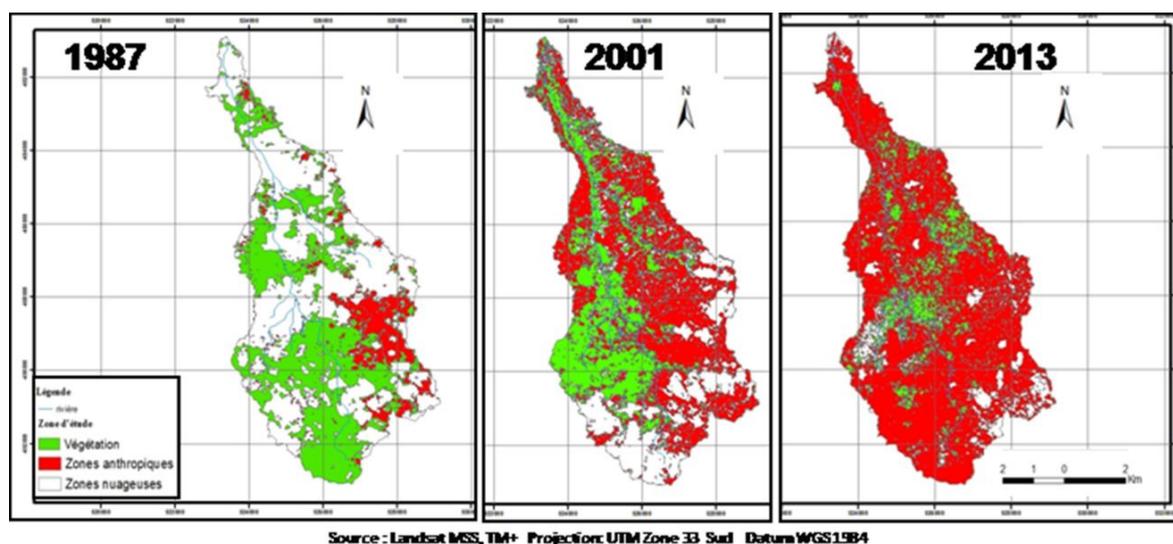
Les figures 3 et 4 présentent les cartes d'occupation de sol du bassin versant de la Lukunga réalisées respectivement pour 1957, 1987, 2001 et 2013. Pour ce qui est de l'imagerie satellitaire, le bassin versant étant dans une zone sub-équatoriale, la permanence de la couverture nuageuse altère la qualité des images et donne une répartition biaisée des

affectations (Tableau 3). La soustraction de la superficie occupée par la couverture nuageuse conduit à l'estimation de la répartition des affectations dans le bassin versant (Tableau 4). L'intégration de résultats contenus au Tableau 4 par rapport à la superficie totale du bassin versant amène

à la répartition probable de l'occupation du sol (Tableau 5). Des Tableaux 3 à 5, en soustrayant les nuages, la répartition obtenue en pourcentage de l'occupation du sol est extrapolée à la totalité du bassin versant.



**Figure 3.** Etat du bassin versant de la Lukunga en 1957 : l'occupation humaine est presque négligeable et insérée avec le maximum de respect urbanistique dans le paysage.



**Figure 4.** Evolution de l'occupation du bassin versant de la Lukunga de 1987 à 2013.

Sur la carte de 2013, la partie centrale qui résiste à l'occupation humaine est constituée d'une propriété privée appartenant à une association sans but lucratif d'une part et, d'autre part, des symphonies naturelles qui sont un espace récréatif, toujours privé.

**Tableau 3.** Répartition des affectations de l'occupation du sol

Occupation de sol	1957		1987		2001		2013	
	Superficie (km <sup>2</sup> )	%						
Végétation	33,6	98,8	13,0	38,0	9,0	26,5	4,0	12,0
Zone anthropisée	0,4	1,2	3,0	9,0	16,0	47,0	27,0	79,0
Nuages	0,0	0,0	18,0	53,0	9,0	26,5	3,0	9,0
Total	34,0	100,0	34,0	100,0	34,0	100,0	34,0	100,0

**Tableau 4.** Estimation de la répartition des affectations de l'occupation du sol

Occupation de sol	1957		1987		2001		2013	
	Superficie (km <sup>2</sup> )	%						
Végétation	33,6	98,8	13,0	81,0	9,0	36,0	4,0	13,0
Zone anthropisée	0,4	1,2	3,0	19,0	16,0	64,0	27,0	87,0
Total	34,0	100,0	16,0	100,0	25,0	100,0	31,0	100,0

L'examen de la Figure 3 et du Tableau 5 montre une occupation du sol qui se traduit déjà par une l'activité anthropique dans le bassin versant de la Lukunga. Ces données corroborent avec l'affirmation avancée par Ntombi et Tumwaka (2004) selon laquelle, la dégradation du couvert végétal infligée par l'agriculture et l'urbanisme, aurait débuté dans ce bassin versant vers les années 70. Les valeurs de l'année 2001 contenues dans le Tableau 5 montrent une forte pression anthropique exercée sur la végétation du bassin versant de la Lukunga. On note une transformation rapide de l'espace urbain et un déploiement de la ville sur les espaces périurbains, soutenu par la forte croissance naturelle de la population urbaine et de l'exode rural dans la ville province de Kinshasa. Du reste, ce sont des conclusions auxquelles avait abouti Makanzu Imwangana (2004) qui parle des ¾ de la superficie du bassin occupés par des habitations et des travaux champêtres tandis que la couverture végétale n'occupait que le quart. La situation de 2013 montre la très forte pression anthropique continue exercée par l'urbanisation dans le bassin. Ntombi et Tumwaka (2004) parlent d'une situation de rhexistasie sectorielle et d'un élan régressif du tapis végétal. La première table-ronde sur l'urbanisme et l'habitat en RDC tenue à Kinshasa en octobre 2012, indique que les villes congolaises sont confrontées à un déficit en logement. Ce déficit constaté, a pour conséquence, la prolifération des bidonvilles caractérisés par l'auto-construction même sur les sites inappropriés suivi d'une dégradation d'espace du milieu rural et périurbain fragilisant ainsi le milieu de vie.

**Tableau 5.** Répartition probable des affectations de l'occupation du sol

Occupation de sol	1957		1987		2001		2013	
	%	Superficie (km <sup>2</sup> )						
Végétation	98,8	33,6	81,0	28,0	36,0	12	13,0	4,0
Zone anthropisée	1,2	0,4	19,0	6,0	64,0	22	87,0	30,0
Total	100,0	34,0	100,0	34,0	100,0	34,0	100,0	34,0

Le calcul du taux de dégradation donne une perte de la couverture végétale de 5,6, 16 et 8 km<sup>2</sup> respectivement de 1957 à 1987, de 1987 à 2001 et de 2001 à 2013 soit une vitesse moyenne de la disparition de la végétation qui serait égale à ~ 0,19 km<sup>2</sup>/an de 1957 à 1987 et 0,92 km<sup>2</sup>/an de 1987 à 2013. La moyenne obtenue dans la seconde période de cette étude montre tout simplement l'exposition au risque d'érosion dans le bassin versant de la Lukunga. L'étude menée par Ntombi et Tumwaka (2004) montre que la densité de drainage dans le bassin versant de la Lukunga est très forte. Cette densité sous-entend que l'écoulement superficiel l'emporte sur l'infiltration. Dans ce contexte, l'enquête menée par Moeyersons *et al.* (2015) a fourni les données de 23 pluies actives de 1975 à 2010 qui ont servi au calcul des coefficients de ruissellement. De cette enquête, il s'avère que la pluie critique du ravinement est d'une hauteur de 24,9 mm et d'une intensité moyenne de 21,8 mm h<sup>-1</sup>. Bien que ce soient les intensités de pluie qui causent l'érosion hydrique, il faut savoir que la hauteur de la pluie devient beaucoup plus caractéristique à un certain degré sur l'importance de coefficient de ruissellement érosif (Moeyersons *et al.*, 2015). A Kinshasa Ouest, Makanzu Imwangana (2014) signale que le  $I_{30}$  livre des intensités des pluies allant de 12 à 100 mm/h avec une moyenne de 51 mm/h pour des pluies quotidiennes d'environ 25 à 119 mm et une moyenne journalière de 66 mm. La moitié des pluies qui ont été à la base de l'érosion ravinante ont une intensité variant de 21 à 50 mm/h, et un quart procède de celles comprises entre 51 à 70 mm/h.

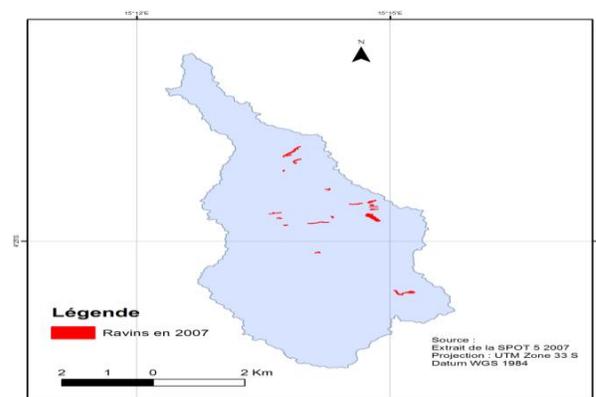
L'étude menée par Makanzu Imwangana (2014) montre que les surfaces de sols nus moyennement compacts et en général les surfaces de sol nu, ne produisent un grand coefficient de ruissellement que pour les pentes supérieures à 0,08 m m<sup>-1</sup>. D'ores et déjà, il faut retenir que les grandes pluies augmentent sensiblement les coefficients de ruissellement des autres utilisations du sol. Si les pluies évoluaient dans le sens de l'augmentation en hauteur et en intensité dans l'avenir (Ntombi *et al.*, 2004 ; GIEC, 2007 et 2013), l'apport de ruissellement par ces autres usages deviendra plus important que les routes et les sols nus. Dans ce cas, le risque de ravinement ne reste plus restreint à la zone urbaine. Les zones dépourvues d'infrastructures routières seront alors également affectées par le ravinement. Tous les paysages sableux du bord méridional de la cuvette congolaise, de Kinshasa-Kikwit-Mbuji-Mayi, seraient alors affectés par l'érosion ravinante. Ce phénomène aboutirait à la disparition des pentes convexes sur les sables kalahariens. Les changements de régime des pluies peuvent induire des changements dans l'alimentation des ravins et en général dans le cycle hydrologique (infiltration, ruissellement, ...). Quoi de plus normal

qu'un régime de plus grandes pluies et d'intensité moyenne supérieure puisse créer plus de ruissellement (Bouzou Moussa *et al.*, 2009). Or, dans le contexte actuel de ce bassin versant, plus de ruissellement, c'est plus d'érosion des sols.

Par ailleurs, cette étude montre que la stabilité du bassin versant de la Lukunga est précaire. Cette précarité signifie que toute perturbation de son faciès naturel est préjudiciable à son équilibre morphologique. Dans un tel contexte, toute portion d'aire dénudée dans ce bassin constituerait une zone de forte sensibilité à l'érosion. Le bassin versant de la Lukunga repose sur une roche meuble essentiellement constituée de sable. Par conséquent, tant qu'une étendue de son sol n'y est pas protégée par la végétation, même une pluie de faible intensité serait capable d'y déclencher sévèrement et indéfiniment une agression et à court terme, une dégradation significative du sol.

### 3.2. Péri-urbanisation et Erosion ravinante

Comme on peut le constater à la Figure 5, l'apparition de l'érosion ravinante ne s'est pas faite attendre. La forte pression exercée par l'anthropisation du paysage s'est traduite par une péri-urbanisation caractérisée par l'auto-construction même sur les sites inappropriés (Ntombi et Tumwaka, 2004). Cette urbanisation incontrôlée s'est traduite par la création des espaces imperméabilisés en forte pente et exposés aux pluies intenses. Il s'en suit une dégradation de l'espace, qui fragilise ainsi le milieu de vie au profit de l'érosion ravinante. L'inventaire donne 24 ravins d'au moins 5 m de large, de 39 à 710 m de long, d'une profondeur moyenne de 4 m et une densité de drainage de 0,14 km/km<sup>2</sup> en 2007 (Makanzu Imwangana, 2014). Pourtant, il n'y a pas d'érosion ravinante sur l'extrait de la photographie aérienne de 1957, ni moins sur la carte géomorphologique de 1976 de Van Caillie (1983).



**Figure 5.** Inventaire des ravins dans le bassin versant de la Lukunga sur l'image SPOT 5 de 2007.

L'échelle de la carte étant petite, les ravins ont subi un grossissement pour être visible. On pourra en compter jusque 69, avec une densité de drainage de 0,34 km/km<sup>2</sup>, si l'on y ajoute le sous-bassin de la Binza (Makanzu Imwangana et al., 2015). Cette érosion des sols crée la sédimentation, l'ensablement au bas des pentes, et par conséquent des inondations de petits cours d'eau mais aussi la détérioration des ressources en eau. Dans ce bassin versant, l'érosion des sols cause la diminution de la qualité de l'eau potable mobilisée par la Régideso. En effet, une eau chargée de sédiments devient impropre à la consommation, ce qui augmente les frais de traitement des eaux (Ntombi et Tumwaka, 2004).

### 3.3. Conditions topographiques et Proposition d'éco-aménagement durable

Sur le plan topographique, Van Caillie (1983) regroupe les pentes en cinq zones ci-après : (i) 0 à 4 % : sites aisément urbanisables ou zone de bonne constructibilité ; (ii) 4 à 8 % : sites urbanisables à faible coût mais fragiles dans les zones d'auto-construction ; (iii) 8 à 12 % : sites urbanisables à coût élevé, nécessitant d'énormes travaux de soutènement et d'évacuation des eaux pluviales ; (iv) 12 à 20 % : sites urbanisables à coût très élevé puisque difficilement constructibles et (v) au-delà de 20 % : sites *non aedificandi* (inconstructibles). L'administration coloniale avait classé les zones collinaires comme *non aedificandi* et où la végétation était protégée et le développement urbain interdit (Stevens, 2006).

Cependant, sur le plan urbanistique, toutes les zones délimitées par des pentes allant de 0 à 15 % sont propres à la construction et appelées zones constructibles tandis que les zones de pente supérieure à 15 % sont des zones susceptibles d'être érodées en cas d'absence d'équipement de drainage. Ainsi, on note que techniquement, toute zone est constructible dans le tissu urbain, à condition qu'il y ait le déploiement de techniques appropriées et de moyens conséquents pour la sauvegarde de l'environnement et pour la préservation des populations riveraines contre des catastrophes. D'ailleurs, Makanzu Imwangana (2010) a fait une cartographie des ravins sur des pentes d'au moins 5 % dans la haute ville de Kinshasa contrairement à Van Caillie (1987) qui les prévoit à partir de 12,5 %. Ce qui signifierait un changement dans les conditions de genèse de l'érosion hydrique dans ce milieu.

Pour une gestion durable de l'espace péri-urbain, un plan de zonage du bassin est proposé et appuyé par une approche écologique afin de réduire les risques d'érosion ravinante. Il s'agit d'un aménagement

agroforestier. L'agroforesterie constitue une alternative pouvant aider dans la lutte contre divers problèmes environnementaux (Nelson *et al.*, 1998 ; Dupraz, 2005). Ce plan de zonage permet d'évaluer le type de système agroforestier à implanter et propose les sites constructibles dans les conditions socioéconomiques actuelles (Osei-Bonsu *et al.*, 2002 ; Orlando Declaration, 2004). Cet aménagement se base sur les classes contenues dans la carte de pentes (Fig.6) et la Figure 7 reprend les zones où peuvent être placés certains éco-aménagements.

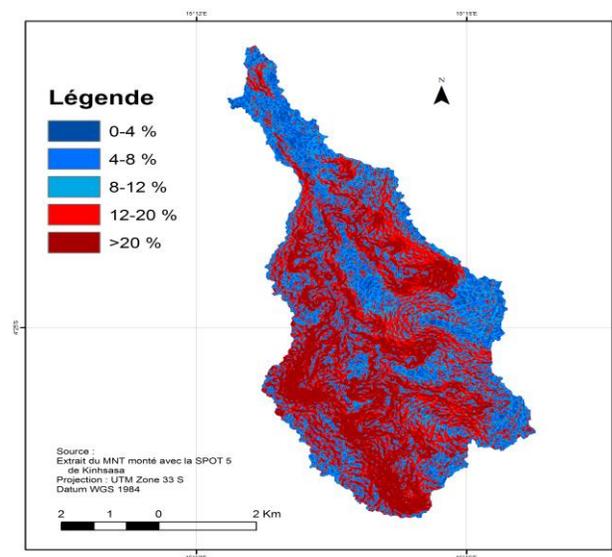


Figure 6. Carte des pentes du bassin versant de la Lukunga

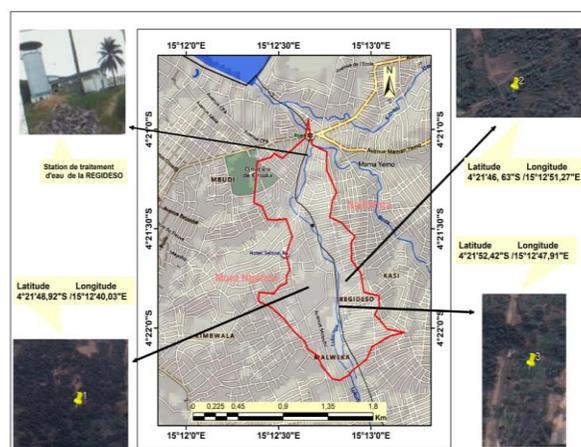


Figure 7. Sites susceptibles de recevoir des éco-aménagements

Ainsi, dans les zones constructibles et plus ou moins constructibles, c'est-à-dire allant de 0 à 12 % pour réduire les surfaces imperméables au niveau des habitations (toits, béton, sols endurcis, etc.) qui favorisent un fort ruissellement et une faible

infiltration, il suffit de rediriger l'eau de pluie vers un milieu perméable. Ce dernier équivaut à un aménagement agroforestier basé sur le système jardin de case faisant référence à des associations denses qui se trouvent à proximité des maisons familiales, et qui regroupent une grande variété de plantes ligneuses et non-ligneuses, constituées d'un assemblage d'arbres, d'arbustes, d'herbacées et de lianes entretenues aux alentours de la maison par les ménages. Ce système serait équipé d'un puits d'infiltration qui consiste en un réservoir de cailloux grossiers enfouis sous-sol et qui permet d'accumuler l'eau pluviale et de la laisser s'infiltrer après la pluie. Il est conseillé de revégétaliser tout autour de puits afin de couvrir le sol. Tout aménagement d'un terrain en pente se ramène à la réalisation de plate-forme horizontale, qu'il s'agisse d'urbanisation ou d'agriculture. L'art réside dans la manière dont sont conçues, dimensionnées, reliées et utilisées ces plates-formes dans l'adaptation de la réalisation à son environnement. Quant aux berges de la rivière Lukunga, elles doivent être protégées en utilisant des arbustes et des plantes buissonnantes qui les stabiliseront grâce à leur surface racinaire et qui pourront se régénérer si elles sont endommagées.

Dans les zones difficilement urbanisables ou non constructibles, l'aménagement agroforestier devrait être basé sur l'entomoforesterie, qui est un système agroforestier faisant référence à l'association apisyliculture et arbres à chenilles. Mais à cela, on pourrait ajouter les arbres antiérosifs pour stabiliser les surfaces dénudées en réalisant plusieurs terrassements et plançons après chaque terrassement des lits de plants et plançons avec rejets. A cela, il faudrait ajouter un enherbement complémentaire au niveau du talus et de lits afin d'obtenir un recouvrement complet du sol. Avant l'installation de lits, il faudrait au préalable procéder à un enherbement afin de protéger le versant le temps que les arbres se développent. Quant au choix des espèces, il est préférable d'utiliser des espèces à croissance rapide. Pour cela, on préconise l'installation d'espèces exotiques même si certaines de ces espèces posent des problèmes d'assèchement du sol, affectation de la recharge des nappes et de mortalité excessive (Dussault, 2008) et une réinsertion progressive des espèces locales. Les produits issus de ce système, comme les produits forestiers non ligneux (PFNL, par exemple les chenilles, les champignons, le miel, les fruits) constitueront d'importants filets de sécurité et feront partie de la stratégie de diversification des revenus pour les populations riveraines. Au niveau de ces zones, il serait préférable d'éviter toute construction informelle.

#### 4. CONCLUSION

La recherche spatio-temporelle de l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de la Lukunga s'est assignée un double objectif ; à savoir : mener une étude diachronique sur l'évolution du changement du couvert végétal entre 1957 et 2013 et tenter de proposer à la fin de l'étude un plan d'aménagement agroforestier du bassin versant pour une gestion durable de ses ressources environnementales. La méthodologie utilisée se base sur la classification supervisée et la cartographie du couvert végétal avec les logiciels Envi 4.5 et ArcGis 10. Les photographies aériennes de 1957 et l'imagerie satellitaire Landsat de 1987, 2001 et 2013 a servi pour l'extraction de l'information relative à l'utilisation du sol.

L'analyse des résultats révèle un fort recul du couvert végétal, soit une perte de 24 km<sup>2</sup> de 1987 à 2013 dans un bassin versant qui s'étend sur 34 km<sup>2</sup>, avec une vitesse moyenne de disparition de la végétation de 0,92 km<sup>2</sup>/an. Entretemps, la zone anthropisée est passée de 6 à 22 et à 30 km<sup>2</sup> respectivement en 1987, 2001 et 2013. Pourtant, elle représente qu'à peine 1,2 % du bassin versant en 1957. Cette utilisation se traduit par une urbanisation incontrôlée, des espaces imperméabilisés sur des pentes de 8 à 20 % pourtant très fragiles même lorsqu'ils sont exposés aux petites pluies de moyenne intensité. Il s'en suit une dégradation de l'espace, qui fragilise ainsi le milieu de vie au profit de l'érosion ravinante. L'inventaire donne 24 ravins d'au moins de 5 m de large avec une densité de drainage de 0,14 km/km<sup>2</sup> en 2007. Face à cette situation désastreuse, il est exclu que le couvert végétal du sol restant puisse assurer la protection du site contre l'action du ruissellement des eaux des pluies. Voilà pourquoi une proposition de réaménagement du site est faite en prônant l'installation d'une approche agroforestière. Lors de l'élaboration du plan de réaménagement du bassin versant que l'on puisse tenir compte tant des caractéristiques du sol et des ressources hydriques que des facteurs socio-économiques qui se répercutent sur le développement des êtres humains dans l'hinterland de Kinshasa en général, et sur l'utilisation des terres en particulier. Il faut également prévoir un appui opérationnel permanent et que l'utilisation des ressources foncières et hydriques soit régie par un contrôle social adéquat, car leur surexploitation peut aboutir, à long terme, à la dégradation complète des ressources naturelles du bassin versant.

Par ailleurs, l'érosion ravinante dans le bassin crée la sédimentation, l'ensablement au bas des pentes, et par conséquent des *inondations* provoquées par la rivière Lukunga et ses tributaires. Le bassin de la Lukunga subit un développement urbain qui se fait par l'auto-

aménagement au détriment de la conservation des sols et des eaux. La ville de Kinshasa est donc confrontée à un déficit de logements, ainsi prolifèrent des bidonvilles caractérisés par l'auto-construction suivie d'une dégradation de l'espace fragilisant ainsi le milieu de vie.

## Références

Ben Salem, M., 1996. *Le Sahel de Bizerte : cartographie de l'occupation du sol et de sa dynamique*. Thèse de D.R.A, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 238 p.

Benabdesselam T. & Hammar Y., 2009. Estimation de la réponse hydrologique d'un bassin versant urbanisé. *European Journal of Scientific Research*, 29, 334 – 348.

Bouzou Moussa I., Faran Maïga O., Karimou Ambouta J.M., Sarr B., Descroix L. & Moustapha Adamou M., 2009. Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien. *Sécheresse*, 20(1), 145-152.

Bultot F., 1971. *Statistiques des pluies intensives en un point dans une aire du Congo belge et du Ruanda – Urundi*. B.C.C.V 11, 136 p.

Canty M.J., 2014. Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing: with Algorithms for ENVI/IDL. 3rd Ed., CRS Press, Taylor & Francis Group, pp. 285-322.

Dubreuil V., Delahaye C. & Le Strat A., 2010. Changements d'occupation du sol et leurs impacts climatiques au Mato Grosso, Brésil. *Confins* 10, DOI : 10.4000/confins.6845

Dupraz C., 2005. *Le fonctionnement d'une parcelle agroforestière*, INRA. Papier présenté à la conférence de SAFE-APCA-Paris, 26 janvier 2006 Disponible sur <http://www.montpellier.inra.fr/safe/conferences/Paris/3>

Dussault F., 2008. *L'agroforesterie comme outil de développement durable dans les pays en voie de développement*. Essai présenté au Département de biologie en vue de l'obtention du grade de maître en écologie internationale, Faculté des Sciences, Université de Sherbrooke, Canada, 118 p.

El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A. & Abharour M., 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au nord-est du Maroc. *Revue Télédétection*, 8(3), 193-201.

El Hadraoui Y., 2013. *Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre*. Mémoire présenté en vue d'obtenir le Diplôme d'ingénieur CNAM, 88 p.

FAO (Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture), 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (CGES). *Bulletin Pédologique de la FAO*, n°70, 420 p.

George P. & Verger F., 1970. *Dictionnaire de la géographie*. Editions PUF, 499 p.

GIEC, 2007 : *Equipe de rédaction, R. K. Pachauri et A. Reisinger, Changement Climatique 2007 : Rapport synthèse. Contribution des Groupes de Travail I, II et III au Quatrième Rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts en Changement Climatique*, GIEC, Genève, Suisse.

GIEC, 2013 : *Changement Climatique 2013 : Les Bases des Sciences Physiques. Contribution du Groupe de Travail I au Cinquième Rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts en Changement Climatique*, GIEC. Genève, Suisse. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Godet L. & Thomas A., 2013. Three centuries of land cover changes in the largest French Atlantic wetland provide new insights for wetland conservation. *Applied Geography*, 42, 133-139.

Grimmond S., 2007. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *Geographical Journal*, 173, 83–88. doi:10.1111/j.1475-4959.2007.232\_3.x

Joly F., 1976. *La cartographie*. PUF, Paris, 271 p.

Makanzu Imwangana F., 2004. Etude de l'ensablement du canal d'amenée de la Régideso sur la rivière Lukunga. In : *Actes du séminaire - Atelier en Evaluation environnementale, Kinshasa*, 66-72.

Makanzu Imwangana F., 2010. Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa entre 1957 et 2007 par télédétection et SIG. Mémoire de Master complémentaire, GRN/DSGE, Faculté des Sciences, ULg, 76 p.

Makanzu Imwangana F., 2014. *Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa. Dynamisme Pluvio-Morphogénique et Développement d'un Outil de Prévission*. Thèse de doctorat en Sciences, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, 193 p.

Makanzu Imwangana F., Dewitte O., Ntombi M. & Moeyersons J., 2014. Topographic and road control of megagullies in Kinshasa (DR. Congo). *Geomorphology*, 217, 131-139. DOI 10.1016/j.geomorph.2014.04.021.

Makanzu Imwangana F., Vandecasteele I., Ozer P., Trefois P. & Moeyersons J., 2015. The origin and control of megagullies in Kinshasa (DR. Congo). *Catena*, 125, 38-49. DOI 10.1016/j.catena.2014.09.019

Moeyersons J., Makanzu Imwangana F. & Dewitte O., 2015. Site-and rainfall-specific runoff coefficients and megagully development in Kinshasa (DR Congo). *Natural Hazards*, 79(1), 203-233. DOI10.1007/s11069-015-1870-z.

Moeyersons J., Poesen J., Nyssen J., Deckers J. & Mitiku H., 2010. Reconstructing environmental changes since the last Glacial Maximum (LGM) in the Geba basin, northern Ethiopia, by geomorphic process interpretation and land management evaluation. Runge, J. (Ed.). *African palaeoenvironments and geomorphic landscape evolution*.

*Palaeoecology of Africa: International yearbook of landscape evolution and palaeoenvironments*, 30, 9-26.

Moeyersons J. & Trefois Ph., 2008. Desertification and changes in river regime in Central Africa : possible ways to prevention and remediation. In: *Gabriels, D., Cornelis, W., Eyletters, M., Hollebosch, P., Combating desertification? Assessment, adaptation and mitigation strategies. Proceedings of the Conference on Desertification, Ghent, 23 January 2008*. UNESCO Centre for Eremology, Ghent University, Belgium, 144 - 156.

Nelson RA., Cramb RA., Menz K.M. & Mamicpic M.A., 1998. Cost-Benefit analysis of alternative forms of hedgerow intercropping in the Philippine uplands. *Agroforestry Systems* 39, 241-262.

Ntombi M.K. & Tumwaka NG., 2004. Influence du bassin hydrologique de la Lukunga à Kinshasa sur le fonctionnement de l'usine de captage d'eau de la Régideso. *Bull. du CRGM* 5 (1), 22 - 27.

Ntombi M.K. & Makanzu Imwangana F., 2006. Réponse du bilan hydrométrique à la dégradation spécifique du bassin versant de la Lukunga à Kinshasa. *Ann. Fac. Sc.*, 1, 67-77.

Omrane M.N., 1977. *Photo-interprétation et cartographie de la morphologie des activités de Hammam-lif*. Thèse de 3è cycle, Paris VII, 245 p.

Orlando Declaration, 2004. 1st World Congress of Agroforestry. *Working Together for Sustainable Land-use Systems. 27 June au 02 July 2004, Orlando Florida, USA*. Disponible sur <http://conference.ifas.ufl.edu/WCA/orlando.pdf>.

Osei-Bonsu K., Opoku-Ameyaw K., Amoah F.M. & Oppong F.K., 2002. Cacao-coconut intercropping in Ghana: agronomic and economic perspectives. *Agroforestry Systems*, 55(1), 1-8.

Podaire A., 2003. *Informations sur le projet Changement d'Utilisation et de Couverture des Sols (Land-Use and Land-Cover Change : LUCC)*. CYBERGEO180, 6 p.

Provencher-Nolet L., Bernier M. & Lévesque E., 2014. Quantification des changements récents à l'écotone forêt-toundra à partir de l'analyse numérique de photographies aériennes. *Écoscience*, 21(3-4). [http://dx.doi.org/10.2980/21-\(3-4\)-3715](http://dx.doi.org/10.2980/21-(3-4)-3715).

Samaali H. 2011. *Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et systèmes d'informations géographiques*. Thèse de Doctorat en Géographie. Université de Tunis, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, 337 p.

Steinberg J., 1996. *Cartographie : pratique pour la géographie et l'aménagement*. Ed. SEDES, 130 p.

Stevens C., 2006. *Offre de coopération internationale en matière de lutte anti-érosive à Kinshasa*. Mémoire de D.E.S, EGSS/ULg, inédit, 70 p.

Valentin C., Poesen J. & Li Y., 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. Gully erosion: A Global. *Catena*, 63(2-3), 132-153.

Van Caillie X., 1983. *Hydrologie et érosion dans la région de Kinshasa : Analyse des interactions entre les conditions du milieu, les érosions et le bilan hydrologique*. Thèse de doctorat, Dpt de Geografie Geologie, KUL, 554 p.

Van Caillie X., 1987. L'érosion pluviale – cas du domaine tropical sableux (Exposé). *Réseau Erosion-ORSTOM*, 6-10.

Van Caillie X., 1990. Erodabilité des terrains sableux du Zaïre et contrôle de l'érosion. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, 25, 197-208.

Van der Meer F.D. & de Jong S.M., 2001. *Imaging Spectrometry*. Kluwer Academic Publishers. Printed in Netherlands, 403p