



Université de Liège

Faculté des Sciences

Collège de doctorat en Géographie

Le contexte urbain et climatique des risques hydrologiques de la ville de Butembo (Nord-Kivu /RDC)



Thèse présentée par

Muhindo Sahani

En vue de l'obtention du Grade de
Docteur en Sciences

Année académique 2011-2012

Composition du Jury :

Prof. Alain Demoulin (Université de Liège, BELGIQUE)	: Président
Dr. aggr. Jan Moeyersons (Royal Museum for Central Africa, Tervuren, BELGIUM)	: Promoteur
Prof. Michel Erpicum (Université de Liège, BELGIQUE)	: Co Promoteur
Dr. Pierre Ozer (Université de Liège, BELGIQUE)	: Co Promoteur
Prof. Jean Marie Godeau (Prof. ordinaire émérite, Université de Liège, BELGIQUE)	: Membre
Prof. Morgan De Dapper (Universiteit Gent, BELGIUM)	: Membre
Prof. Vincent Hallet (Fondation Universitaire Notre Dame de la Paix, Namur, BELGIQUE)	: Membre

Novembre 2011

Université de Liège

Faculté des Sciences

Collège de doctorat en Géographie

Le contexte urbain et climatique des risques hydrologiques de la ville de Butembo (Nord-Kivu /RDC)

**Thèse présentée par
Muhindo Sahani**

**En vue de l'obtention du Grade de
Docteur en Sciences**

Année académique 2011-2012

Dédicace

A ma mère feu Masika Mathe Joséphine

A mon père feu Nzuva Muhindo Athanase

A ma très chère épouse Kahambu Matimbya Hintou

A nos enfants :

Jean Claude Musubao Sahani

Mylène Sahani Mathe

Désiré Sahani Masole

Judith Sahani Amani

Jan Ozer Sahani

A Monseigneur Emmanuel Kataliko

Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Dr. Aggr. Jan MOEYERSONS, Chef de la section de Géomorphologie et Télédétection au Musée Royal de l'Afrique Centrale et promoteur de cette thèse. Son appui scientifique, son suivi permanent, sa compréhension et ses qualités humaines m'ont fort marqué et je lui en suis infiniment reconnaissant. Il m'a fait bénéficier de sa grande expérience dans le domaine des risques hydrologiques.

Je suis particulièrement reconnaissant envers le Professeur Michel ERPICUM, Co-promoteur de cette thèse pour toutes les approches méthodologiques qu'il m'a proposées dès le début de ces recherches doctorales. Il n'a cessé de m'encourager en proposant des orientations scientifiques utiles. Merci pour les aspects administratifs qui cadrent avec cette thèse.

Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance et mon profond respect au Dr. Pierre OZER, Co-promoteur de cette thèse. Sa détermination dès le déclenchement du processus jusqu'à l'aboutissement de cette thèse reste gravée dans mon cœur. De l'encadrement, du partage de l'expérience à la participation active aux activités scientifiques, il m'a tout simplement modelé, et j'ai pris le goût à la carrière qui m'attend.

Je remercie sincèrement du fond de mon cœur le Professeur Alain DEMOULIN pour avoir accepté de présider mon jury et pour le temps qu'il a consacré pour évaluer cette dissertation. Je suis resté reconnaissant envers la disponibilité qu'il m'a toujours réservée pour discuter de cette thèse dès le début.

Les professeurs Morgan DE DAPPER, Vincent HALLET et Jean-Marie GODEAU ont accepté de faire partie du jury de cette thèse. Je les remercie d'avoir pris le temps de lire et d'évaluer ce travail, très capital pour ma ville natale qui a besoin de votre expérience scientifique.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur André OZER. Sa détermination, son dévouement et sa vocation d'homme de sciences conciliant savoir, savoir être et savoir faire dans un amour du prochain ont fait que nous puissions entreprendre cette thèse. Merci pour votre confiance et surtout pour m'avoir mis en contact avec Dr. Aggr. J. MOEYERSONS. Ce choix est d'or pour moi et pour ma ville.

Ma gratitude va au Directeur Général du Musée Royal d'Afrique Centrale (MRAC), Monsieur Guido GRYSEELS pour m'avoir accordé l'autorisation de mener mes recherches pendant plus d'une année dans la section de Géomorphologie et Télédétection.

Marc SALMON, de tout mon cœur, je te dois beaucoup de respect pour m'avoir formé en télédétection et surtout pour tes qualités humaines dont une disponibilité jamais démentie. Que le Programme ISIS/CNES trouve ici l'expression de ma gratitude pour les images SPOT et que la Région Wallonne trouve ici l'expression de ma reconnaissance en particulier, la cellule sous-sol qui s'occupe de l'établissement des cartes géologiques de toute la région.

Philippe TREFOIS et Ine VANDECASTEELE, merci pour tout l'encadrement que j'ai reçu de votre part. Vous avez fait preuve d'une collaboration scientifique d'excellente qualité.

Toute ma reconnaissance à Papa KAMBILO qui a consacré toute sa vie à la collecte des données météorologiques au niveau de la station de l'ITAV. Son dévouement et sa

volonté de récolter ces données quotidiennement, nous ont marqué depuis que nous l'avons côtoyé.

Je suis particulièrement reconnaissant envers la CTB qui m'a octroyé cette bourse dans le cadre de son programme de bourse de doctorat mixte depuis 2007. Ce travail est d'une grande utilité pour la ville de Butembo et les approches sont transposables pour d'autres villes. Merci à Madame Liesbet VASTENAVONDT et à Nicolas BRECHT pour avoir bien géré ma bourse ainsi qu'à Madame Angèle MOWA KAPUNDU et à Jean-Claude KAKUDJI.

Ma reconnaissance à mon université d'origine (UCG), à son fondateur, Mgr. Emmanuel KATALIKO, au Grand Chancelier Mgr. Melchisédech SIKULI, à son Président du Conseil d'Administration Mgr. Janvier KATAKA ainsi qu'au Président de la Fondation Universitaire du Graben, Prof. Abbé Apollinaire MALU MALU et au premier recteur de l'UCG, Mgr. SOKONI Lusenge Bernard. Que les pères Célestin KASAVOLO, Grégoire KAPORALE et Wilfrid KIBANDA ainsi que les autres pères assomptionnistes trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance. Ma gratitude à Monsieur Edmond GEORGES pour le toilettage de cette dissertation.

Que mon Oncle Phanuel Katembo Kasereka, PDG de la pharmacie vétérinaire SECUREX trouve ici l'expression de ma reconnaissance envers tout ce qu'il est pour toute notre famille. Désiré KAWALINA nous a quitté mais reste un être cher pour moi à travers sa volonté de me voir grandir sur le plan scientifique et en sagesse.

Que mes sœurs Fabiola SAHANI, Anita SAHANI, Mbakwiravyo ainsi que mon frère cadet Kasereka KIMBUTWE trouvent ici l'amour fraternel que nous continuerons à rendre de plus en plus chaleureux. Que nos parents Athanase Nzuva MUHINDO et Joséphine Masika MATHE exultent de joie dans le royaume de Dieu où ils se reposent. Toute ma reconnaissance aux beaux frères ZACHARIE et DORIS.

A ma belle famille, je dois beaucoup de respect. A mon beau père feu Jean BASWAGHA Matimbya ainsi qu'à ma belle mère Verena KALUNGERO, merci pour l'éducation de ma très chère épouse ; sa sagesse fait la grandeur de notre foyer. Encore une fois merci. Merci aussi pour le rôle qu'a joué Papa Joachim et que maman Christine continue à faire avec enthousiasme.

Ma reconnaissance à mes cousins et cousines, à mes neveux et nièces et petits fils. Ma reconnaissance à Eustache NZOLI, à Richard MAKELELE, à TOZITO et feu Ladyslas MUNYALYALO. Aux familles des Professeurs Mboko Vutala, Mandiki Robert, Mafikiri Tsongo pour tout ce que vous avez fait à notre fils aîné Jean Claude ainsi qu'à sa maman. Aux familles de Papa Vilimumbalo, Kambere Lambert, Mbale Syasaka, Mukokoma, Mughunda, John Mbulula pour votre hospitalité et votre bonté. Merci à tous les anciens joueurs de Kitenge, à l'attente de football de Butembo ainsi qu'aux amis du Camp David. Merci à Madame Valérie Wambersy, au Professeur Jean Luc HORNICK et à Xavier DETIENNE pour toutes les actions de développement que vous menez à Butembo par le biais d'UniverSud Liège.

Merci à FUB (France Université Butembo), à Monsieur et Madame FOURNIER pour tous les bienfaits que vous faites en faveur de la ville de Butembo et de la région entière.

A nos cinq enfants, Jean Claude Musubao Sahani, Mylène Sahani Mathe, Désiré Sahani Masole, Judith Sahani Amani et Jan Ozer Sahani qui ont souffert de l'absence ou du silence de Papa pendant ces périodes de recherche ; Papa vous embrasse affectueusement. Et surtout merci à toi, C.T. Ir. Hintou Kahambu MATIMBYA, ma très chère épouse pour tout ce que tu es pour moi.

Résumé

La ville de Butembo constitue un cas typique en région tropicale humide qui a connu une explosion démographique exceptionnelle. La concentration spontanée des populations, due à l'exode incontrôlé sur un territoire assez restreint, a conduit à une urbanisation sans cesse croissante. L'imperméabilisation des vastes étendues de terres consécutive à une expansion spatiale rapide de la ville a généré des problèmes environnementaux qui affectent la structure urbaine. La ville, en effet, est confrontée à des risques hydrologiques diversifiés. Les ravinements progressif et régressif ne cessent de s'amplifier et influent sur la disponibilité en eau. La zone urbaine est aux prises, ces dernières années, avec des inondations perçues localement comme exceptionnelles. On assiste actuellement à des remobilisations des anciens glissements de terrain qui génèrent localement la désolation consécutive aux dommages causés.

Depuis sa création, la ville de Butembo n'a jamais été dotée d'une carte géographique de référence objective. Les seules sources cartographiques disponibles sont faites à main levée. Il est connu que la maîtrise de l'urbanisation permet de lutter efficacement contre la plupart des risques majeurs pour autant que les éléments qui président à leur survenance soient connus et que la délimitation des périmètres d'aléas ait été réalisée sur base de critères objectifs et scientifiques.

C'est pourquoi l'objectif principal de cette thèse est de produire la carte de la ville de Butembo avec comme vocation l'aide à la décision ou au moins à la compréhension des phénomènes environnementaux rencontrés au niveau du territoire urbain. Cette thèse aboutit notamment à la production d'une carte des risques hydrologiques sur base des approches combinant la télédétection et les descentes sur terrain. Une analyse détaillée des événements pluviométriques est faite pour voir si les pluies n'ont pas influencé ces problèmes environnementaux dans la ville de Butembo.

Les résultats révèlent une expansion urbaine exceptionnelle. L'emprise urbaine de la ville de Butembo est passée de 2,39 km² en 1957 à 85,83 km² en 2008 sur 158,95 km². Son accroissement est consécutif à l'augmentation de la population qui est passée de 9 653 en 1957 à 581 449 habitants en 2008. Cette urbanisation a abouti à une nouvelle affectation du sol avec des conséquences sur le paysage urbain. Depuis 1957 le ravinement de fond de vallée ainsi que celui sur les versants sont toujours restés confinés à l'intérieur des extensions urbaines respectives. L'urbanisation précède le développement des ravins et ceux-ci sont confinés dans les zones où le coefficient d'écoulement est accentué par elle. A l'heure actuelle, il n'existe pas de fusion entre les ravinements progressifs et régressifs. Les inondations pourraient s'étendre sur tous les fonds plats de vallées, dans le futur, en cas d'inaction. Les glissements de terrain sont actifs et se trouvent dans la phase de creep. 11 des 16 glissements répertoriés sont partiellement co-engendrés par le séisme. La pluie n'est pas à la base de l'accentuation des problèmes environnementaux qui perturbent la structure urbaine de Butembo. C'est l'urbanisation qui en est la principale cause. Les pluies de ces dernières années sont normales pour la ville, leur récurrence étant de moins de 6 ans.

Les méthodes de remédiation exigent une intervention au niveau de l'évacuation du ruissellement. Mais le problème doit être attaqué en amont, sur les versants, par toutes les techniques susceptibles d'annihiler la genèse du ruissellement.

Mots clés : Urbanisation ; risques hydrologiques ; ravinement ; inondation ; glissements de terrain ; disponibilité en eau ; événements pluviométriques ; bassin versant.

Summary

Butembo, a small town in the humid tropical region, is a typical case of, a city with an exceptionally rapid population growth. The spontaneous concentration of populations due to uncontrolled migration on a relatively small territory has led to urban sprawl. Soil sealing of large areas caused by a rapid spatial expansion of the town has generated environmental problems that affect the urban structure. The city is facing diverse hydrological risks. Progressive and regressive gully development accelerates and increasingly affects water availability. In recent years, the urban area faces floods, perceived locally as exceptional. The remobilization of old landslides locally causes damage.

Since its inception, Butembo has never had an objective reference map. The only ones which are available are manually drawn. It is known that land use planning can fight effectively against most major risks in so far as the elements that govern their occurrence are known and that the areas at risk can be located and defined on the basis of objective and scientific criteria.

The main goal of this thesis is to produce a map of and for the city of Butembo which can help to support decision making or at least to understand the reasons of the environmental degradation in the urban area. In that direction, this thesis leads to editing a map of hydrological risks. It is based on approaches combining remote sensing and terrain activities. A detailed analysis of rainfall events is made to see if the rains did influence the environmental problems in the town of Butembo.

The results reveal an exceptional urban expansion. The urban sprawl of Butembo increased from 2,39 km² in 1957 to 85,83 km² in 2008, approximately 54 % of 158,95 km². This increase in urban area is the result of exceptional population growth in the town. Indeed, the population rose from 9 653 in 1957 to 581 449 inhabitants in 2008. This urbanization has resulted in a new land use with all the consequences on the urban landscape.

Since 1957 valley and hillslope gullying remained all the time confined spatially within the diachronic urbanized expansions. Urbanization precedes the development of gullies and these are confined to areas where the runoff coefficient increased by urbanization. For the time being, there is not yet fusion between progressive and regressive gullies. In the future, flooding threatens all the flat valley bottoms in the case nothing is done. Landslides are active and are in the creep phase. 11 of the 16 landslides inventoried are partially co-triggered by seismic.

Finally, the damage to the urban structure cannot be ascribed to changes in the rainfall pattern over the 30 last years. All the rains of recent years are normal for the city as their recurrence time is under 6 years. The main cause of environmental problems within the city is urbanization.

Remediation methods require intervention not only in the field of runoff evacuation. The problems must also be tackled upstream, on the slopes, using all the techniques that can prevent or reduce the generation of runoff.

Keywords: Urbanization; hydrological hazards; gully erosion; floods; landslides; water availability; rainfall events; catchment.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements.....	ii
Résumé	iv
Summary	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
Liste des annexes.....	xvi
Table des symboles et acronymes:	xvii
1. Introduction générale	1
1.1. Problématique scientifique	1
1.2. Objectifs de la thèse	7
1.3. Structure de la thèse	8
Chapitre I : La cartographie de la ville de Butembo et de son expansion spatiale entre 1957 et 2008	13
1.1. Introduction.....	13
1.1.1. Situation géographique	13
1.1.2. Spécificité et dynamisme de la ville de Butembo	14
1.2. Approche méthodologique pour la production des cartes	20
1.2.1. Données de terrain	20
1.2.2. Données spatiales et approches utilisées pour reconstituer la trame urbaine de façon diachronique.....	21
1.2.3. Un projet SIG	25
1.3. Résultats	28
1.3.1. La carte planimétrique et topographique de la ville de Butembo.....	28
1.3.2. Analyse comparée de l'évolution de la trame urbaine et de l'anthropisation de la zone urbaine de Butembo	31
1.4. Conclusions partielles.....	41
Chapitre II : Cadre physique et contexte phytosociologique	45
2.1. Cadre physique.....	45
2.1.1. Contexte oro-hydrographique.....	45
2.1.2. Contexte géologique et lithologique	48
2.1.3. Morphotectonique et failles.....	53
2.1.4. Contexte hydrogéologique	56

2.2.	Climat, sols et végétation	59
2.2.1.	Contexte climatique	59
2.2.2.	Sols.....	59
2.2.3.	Contexte phytosociologique	61
Chapitre III. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo de 1957 à 2010.		68
3.1.	Introduction.....	68
3.2.	Matériels et méthodes.....	70
3.2.1.	Données.....	70
3.2.2.	Analyses des données pluviométriques annuelles et quotidiennes.....	71
3.2.3.	Détermination de la saison des pluies : début, fin et longueur.....	72
3.2.4.	Caractérisation des périodes de retour (Loi de Gumbel)	73
3.3.	Résultats	74
3.3.1.	Détection de la persistance des périodes sèches ou humides	74
3.3.2.	Tendances des indices pluviométriques	76
3.3.3.	Début, fin et longueur de la saison des pluies	79
3.3.4.	Estimation de la récurrence des événements pluvieux à Butembo.....	82
3.4.	Discussion.....	83
3.5.	Conclusions partielles.....	85
Chapitre IV. Genèse et effets érosifs des écoulements sur les versants		90
4.1.	Introduction.....	90
4.1.1.	L'importance du ravinement collinaire en Afrique	90
4.1.2.	La recrudescence du ruissellement en ville de Butembo	91
4.1.3.	L'augmentation des débits du ruissellement : une tendance générale en Afrique centrale.....	92
4.1.4.	Objectifs de ce chapitre :.....	96
4.2.	Matériel et méthodes	97
4.2.1	Classification par maximum de vraisemblance.....	98
4.2.2.	Méthode de l'indice normalisé de végétation	100
4.3.	Résultats	102
4.3.1.	Changements d'occupation du sol à l'échelle du territoire urbain	102
4.3.2.	Etude de l'organisation de l'écoulement à Kisingiri	107
4.3.3.	Axes routiers de torrencialité potentielle	112
4.4.	Conclusions partielles.....	112
4.4.1.	Les causes fondamentales de l'augmentation du ruissellement	112
4.4.2.	L'effet de l'urbanisation sur la disponibilité en eau sur les collines	113
4.4.3.	L'effet de l'urbanisation sur l'érosion par le ruissellement des versants.....	113
4.4.4.	Prévisions et carte des risques	114
4.4.5.	Interventions possibles.....	114

Chapitre V : Ravinement de fond de vallée à Butembo : Causes et conséquences118

5.1. Introduction.....	118
5.1.1. Problème de ravinement de fond de vallée à Butembo.....	118
5.1.2. Contexte général du ravinement en Afrique centrale	120
5.1.3. Objectifs de ce chapitre.....	121
5.2. Matériels et méthodes.....	122
5.2.1. Cartographie diachronique des réseaux de ravins de fond de vallée en ville de Butembo.....	122
5.2.2. Collecte de données au niveau des sources.....	124
5.2.3 Collecte des données au niveau des puits	127
5.3. Résultats	129
5.3.1. Synchronisation entre développement des ravins de fond de vallée et urbanisation	129
5.3.2. Evolution en longueurs de neuf principales ravines dans la zone urbaine.....	133
5.3.3. Analyse de l'évolution en surface et en volume pour les neuf ravines les plus spectaculaires dans la zone urbaine de Butembo	134
5.3.4. Dynamique de la nappe phréatique dans la vallée de la Wayimirya	137
5.4. Conclusions partielles et discussions	140

Chapitre VI : Les inondations catastrophiques du 6 octobre 2009. Inventaire, causes et perspectives d'avenir146

6.1. Introduction.....	146
6.1.1. Des risques hydrologiques relativement récents : les inondations	146
6.1.2. Etat de nos connaissances sur les inondations des villes en Afrique centrale	150
6.1.3. Objectifs de cette étude	151
6.2. Matériel et méthodes	151
6.2.1. Caractères physiques du bassin versant de la Kimemi qui favorisent les inondations	151
6.2.2. Evaluation de l'évolution de l'imperméabilisation du sol dans le bassin de la Kimemi	153
6.2.3. Délimitation des zones inondées des fonds de vallées en date du 6 octobre 2009.	153
6.3. Résultats	156
6.3.1. Facteurs de la recrudescence des inondations	156
6.3.2. Localisation des zones inondées en date du 6 octobre, 2009.....	159
6.4. Conclusion partielle	164
6.4.1. Les causes fondamentales des inondations	164
6.4.2. Evolution de la pluie seuil créant des inondations	164
6.4.3. Prévisions et carte des risques	165
6.4.5. Interventions possibles.....	165

Chapitre VII. Seuils topographiques des glissements de terrain à Butembo	168
7.1. Introduction.....	168
7.1.3. Le contexte du glissement de terrain en Afrique	168
7.1.1. Problèmes de glissements de terrain à Butembo	170
7.1.2. Objectifs de cette étude	175
7.2. Matériels et méthodes.....	176
7.2.1. Contrôle topographique des glissements de terrain	176
7.2.2. Profil longitudinal du glissement de Kavitero.....	179
7.2.3. Méthode de cartographie des glissements de terrain	180
7.2.4. Critère de classification des glissements de terrain affectant la ville de Butembo	185
7.3. Résultats et discussions	187
7.3.1. La remobilisation du glissement de Kavitero.....	187
7.3.2. Les autres glissements à Butembo.....	193
7.4. Conclusions partielles.....	202
7.4.1. La réactivation du glissement de Kavitero.....	202
7.4.2. Les autres glissements de terrain	202
Conclusions générales et perspectives.....	206
1. Une carte topographique et géoréférencée à l'échelle de 1/25.000.	206
2. La perturbation de la croissance spontanée de la zone urbaine de Butembo de 1957-2008	206
3. Une perception des risques hydrologiques liés au changement d'affectation des sols dans le cas d'urbanisation	207
3.1 Cause de l'augmentation des débits de pic du ruissellement	208
3.2. Une réorganisation du ruissellement et une augmentation de la connectivité hydrologique à la suite de l'urbanisation.....	209
4. L'effet de l'urbanisation sur les réserves d'eau souterraines	209
5. Les mouvements de masse	212
6. Mesures à conseiller	212
Bibliographie	218

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Superficies et périmètres de la ville de Butembo et de ses communes.....	29
Tableau 1.2. Caractéristiques de la croissance spatiale et démographique par période considérée à Butembo.....	34
Tableau 1.3. Taux moyen de variation annuelle de la population et taux d'accroissement de la surface bâtie de la ville de Butembo entre 1957 et 2008.....	36
Tableau 2.1. Quelques données relatives aux tremblements de terre ressentis en ville de Butembo.....	53
Tableau 3. 1. Liste de neuf indices utilisés dans l'analyse des événements extrêmes.....	71
Tableau 3.2. Caractéristiques des précipitations à la station météorologique de l'ITAV de Butembo. Moyennes $\pm$ écart type calculées sur la période 1957-2010.....	74
Tableau 3.3. Tendances linéaires (exprimées en % par décennie) calculées pour les neuf indices pluviométriques à la station de Butembo.....	78
Tableau 3.4. Caractéristiques des saisons pluvieuses à la station de l'ITAV/Butembo pour la période allant de 1957 à 2010.....	80
Tableau 3.5. Evolution des amplitudes et des longueurs de saisons pluvieuses (LSP) et (PSP) pour les périodes allant de 1957 à 1983 et 1984 à 2010.....	80
Tableau 4. 1. Occupation du sol en ville de Butembo en 1987 et 2004.....	104
Tableau 5.1. Analyse diachronique et volumétrique de 9 principaux ravins les plus spectaculaires de Butembo (Surface, longueur, volume, profondeur).....	131
Tableau 6. 1. Infrastructures ayant été affectées par les inondations du 6 octobre 2009.....	146
Tableau 6.2. Gradient de pente des principaux cours d'eau du bassin versant de la Kimemi....	151
Tableau 6. 3. Superficies affectées par les inondations du 6 octobre 2009.....	160
Tableau 7.1. Mouvement sismique en région de Butembo.....	188
Tableau 7.2. Précipitation allant du mois de mai au mois de septembre 2007 à Butembo...	189
Tableau 7.3. Caractéristiques morphologiques et topographiques des glissements de terrain à Butembo.....	193

Liste des figures

Figure 1.1. Localisation de la ville de Butembo: (a) Topographie de la dorsale occidentale du Rift Albertin; (b) Extrait de l'image ASTER en 3D de la ville de Butembo prise le 23 mai 2006.....	13
Figure 1.2. Carte de la ville de Butembo faite à main levée.....	14
Figure 1.3. Butembo en 1968.....	16
Figure 1.4. Structure urbaine de la ville de Butembo.....	18
Figure 1.5. Carte de la ville de Butembo et ses quatre communes.....	29
Figure 1.6. Relief de la ville de Butembo.....	30
Figure 1.7. Carte de la ville de Butembo avec les principaux axes routiers et quelques points de repère.....	31
Figure 1.8. Nouvelles surfaces bâties entre 2001 et 2007 dans la ville de Butembo reconnaissables par les tôles nouvelles brillantes.....	34
Figure 1.9. Evolution de l'emprise urbaine de la ville de Butembo de 1957 à 2008.....	37
Figure 1.10. Evolution de l'emprise urbaine de la ville de Butembo de 1957 à 2008.....	38
Figure 1.11. Bâti urbain de la ville de Butembo en 2005.....	39
Figure 1.12. Relation entre l'évolution de la population et l'emprise urbaine de la ville de Butembo.....	40
Figure 2.1. Relief de la ville de Butembo illustrée par l'estompage du MNT.....	46
Figure 2. 2. Pentes de la ville de Butembo.....	47
Figure 2.3. Orientation des pentes et thalwegs de la ville de Butembo.....	47
Figure 2.4. Carte géologique de la ville de Butembo.....	50
Figure 2.5. Légende de la carte géologique de la ville de Butembo.....	51
Figure 2.6. Quelques unités lithologiques	52
Figure 2.7. Structures linéaires dans la ville de Butembo.....	56
Figure 2.8. Hydrologie de la ville de Butembo.....	58
Figure 2.9. Diagramme ombrothermique de la ville de Butembo de 1957 à 2010	59
Figure 2.10. Quelques formations végétales dans la ville de Butembo.....	62
Figure 2.11. Pratique agroforestière à Butembo (association maïs-haricot- <i>Eucalyptus</i>	65
Figure 3.1. Evolution annuelle des précipitations exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique développé par Lamb (1982).....	74
Figure 3.2. Tendance de la pluviométrie annuelle à Butembo de 1957 à 2010.....	76
Figure 3.3. Tendance du nombre de jours de pluie à Butembo de 1957 à 2010.....	76
Figure 3.4. Tendance de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie à Butembo.....	77
Figure 3.5. Tendances du nombre de jours avec des précipitations ≥ 10 mm à Butembo.....	77
Figure 3.6. Tendance du nombre de jours avec des précipitations ≥ 20 mm à Butembo.....	77
Figure 3.7. Tendance du nombre de jours de pluie supérieurs au 95 ^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.....	78
Figure 3.8. Tendance du nombre de jours de pluie supérieurs au 99 ^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.....	78
Figure 3.9. Tendance du nombre de jours de pluie supérieurs au 99,5 ^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.....	78

Figure 3.10. Estimation par pentade de la durée de la saison des pluies à Butembo pour les périodes 1957-2010, 1957-1983 et 1984-2010 selon la méthode d'Epicum <i>et al.</i> (1988).....	80
Figure 3.11. Période de retour des pluies journalières à Butembo.....	82
Figure 4.1. Villes durement touchées par des ravinements sévères en Afrique Centrale (Vandecasteele <i>et al.</i> , 2011).....	91
Figure 4. 2. Hydrographe présentant le changement du régime fluvial selon Moeyersons et Trefois (2008).....	93
Figure 4. 3. Les risques naturels dus au changement du régime du ruissellement au niveau du territoire urbain.....	93
Figure 4.4. Les eaux de ruissellement, venant parfois d'une surface considérable, sont d'abord concentrées dans le fossé et puis relâchées en quelques points où elles s'incisent très vite (Moeyersons, 1989).....	95
Figure 4.5. Les différentes phases du développement d'un ravin par érosion progressive à partir d'un point où les eaux sont relâchées (Moeyersons, 1989).....	95
Figure 4.6. Les marmites sur les versants de Kisingiri (a) et de Vulumbi, cellule Kikuluba (b), à Butembo.....	96
Figure 4. 7. Manifestation des écoulements torrentiels sur les versants à l'abattoir public de Butembo.....	96
Figure 4.8. Méthodologie appliquée pour la cartographie de l'occupation du sol à Butembo en 1987 et 2004 par classification supervisée par maximum de vraisemblance.....	99
Figure 4.9. Occupation du sol en territoire urbain de Butembo en 1987 et en 2004.....	104
Figure 4.10. Evolution de la zone urbaine rendue imperméable dans la ville de Butembo en utilisant la méthode de NDVI avec une valeur seuil de -0,1.....	106
Figure 4.11. Influence du réaménagement de la route de Manguredjipa et modification de la direction du ruissellement.....	108
Figure 4.12. Réorganisation du ruissellement par les routes dans le bassin versant de Kisingiri à Butembo.....	109
Figure 4. 13. Route Kisingiri-Mukuna : point de débordement de la route fonctionnant en corniche.....	112
Figure 4.14. Ravines collinaires liées au ruissellement torrentiel. a). Colline de Ngere ; b). Axe routier Abattoir-Katsya à la latitude de Kasongomi.....	112
Figure 5. 1. Réseau hydrographique et systèmes des dambos en ville de Butembo.....	119
Figure 5. 2. Quelques exemples de ravinements rencontrés dans les dambos à Butembo.....	119
Figure 5.3. Dambos en Afrique.....	121
Figure 5. 4. Anaglyphes de l'image SPOT5 (2008) centrée sur la ville de Butembo (Cyan à l'œil droit).....	123
Figure 5. 5. Anaglyphes de l'Image ASTER (2006) centrée sur la ville de Butembo (Cyan œil droit).....	123
Figure 5.6. Localisation des sources investiguées le long des ravins dans les dambos de la Wayimirya et de Kimemi à Butembo.....	125
Figure 5.7. Esquisse de la situation générale des puits et des sources dans la vallée de la Wayimirya.....	126
Figure 5.8. Influence du ravinement sur le rabattement de la nappe phréatique dans le dambo de la Wayimirya à la source de Vutetse-Wayimirya.....	127

Figure 5.9. Localisation des puits investigués le long des ravins dans les dambos du bassin versant de la Wayimirya.....	128
Figure 5.10. Localisation de neuf ravins les plus spectaculaires de Butembo.....	129
Figure 5.11. Rivière Lwirwa sans incision importante constituant la limite Est de la ville de Butembo	130
Figure 5.12. Lit et berges de la Mususa très faiblement incisée.....	131
Figure 5.13. Incisions verticale et horizontale (urbanisation).....	131
Figure 5.14. Evolution en longueur des neuf ravines les plus spectaculaires dans la ville de Butembo.....	133
Figure 5.15. Evolution de la surface de neuf ravines les plus spectaculaires de Butembo.....	134
Figure 5.16. Evolution du volume des ravins dans le temps versus explosion démographique dans la ville de Butembo.....	136
Figure 5. 17. Abaissement du niveau de l'eau dans les 31 puits de la vallée de la Wayimirya entre 2002 et 2009.....	137
Figure 5.18. Représentation de descente topographique des points de puisage des sources.....	138
Figure 5.19. Evolution des débits des sources dans les dambos de Wayimirya et de Kimemi.....	139
Figure 6. 1. Manifestations des inondations dans la ville de Butembo.....	148
Figure 6. 2. Début d'étiage après une forte inondation de la Kimemi et dépôt des limons dans les champs de colocases le long du cours d'eau.....	149
Figure 6. 3. Zones confrontées aux inondations en République Démocratique du Congo et dans la région du rift albertin (Vandecasteele <i>et al.</i> , 2009).....	150
Figure 6. 4. Relief, zone inondée le 29 octobre 2009 et principaux cours d'eau du bassin versant de la Kimemi. Traitement de l'image SPOT de 2008.....	152
Figure 6. 5. Exemples d'échantillonnage par transects. Les points rouges représentent les stations de mesures. Fond, Image Quickbird du 18 avril, 2005.....	155
Figure 6.6. Evolution de l'occupation du sol au sein du bassin versant de la Kimemi à Butembo entre 1987 et 2004. Traitement des images SPOT.....	156
Figure 6.7. Evolution de la composition de l'occupation du sol entre 1987 et 2004 (en km ²) au sein du bassin versant de la Kimemi. L'exutoire est considéré ici comme le point aval excentré de la zone qui s'est inondée en 2009.....	158
Figure 6.8. Evolution comparée de la spatialisation des zones artificialisées, des zones boisées et champs au sein du bassin versant de la Kimemi à Butembo entre 1987 et 2004.....	158
Figure 6. 9. Profil longitudinal de la rivière Kimemi circonscrite dans la zone inondée en date du 6 octobre 2009.....	160
Figure 6. 10. Localisation des zones inondées en date du 6 octobre 2009 en fonction de la juridiction administrative de la ville de Butembo.....	161
Figure 6. 11. Carte de risque d'inondation dans les bas fonds de la ville de Butembo.....	162
Figure 7.1. Distribution spatiale des mouvements de masses le long du Rift Albertin (Vandecasteele <i>et al.</i> , 2009).....	169
Figure 7.2. Représentation du phénomène du glissement de terrain de Kavitero.....	172
Figure 7.3. Différentes caractéristiques de manifestations du glissement de terrain	

de Kavitero.....	173
Figure 7.4. Glissement des terres le long des berges des cours d'eau dans la vallée de la Wayimirya.....	174
Figure 7.5. Processus de glissement de terrain le long des berges des cours d'eau à Butembo.....	174
Figure 7.6. Glissement des terrains le long des ravins de Kisingiri.....	174
Figure 7.7. Enveloppe linéaire de Coos Bay, (Montgomery et Dietrich, 1994).....	176
Figure 7.8. Enveloppes régionales pour les Etats de l'Orégon, Californie et Névada (Montgomery et Dietrich, 1994).....	177
Figure 7.9. Enveloppe de combinaison de seuil topographique au sud du Rwanda (Moeyersons, 2003).....	178
Figure 7.10. Principe de cartographie des glissements de terrain : mesure de surface drainée et de la pente.....	179
Figure 7.11. Conceptualisation du principe de Montgomery et Dietrich (1994).....	179
Figure 7.12. Copie d'écran des anaglyphes des photographies aériennes 5737_253 et 5737_254 (sites de l'ITAV, Vutsundo, Abattoir public (1) et Biasa, Kikyo, Kalemire, Lwamiso, Kitatumba (2)).....	182
Figure 7.13. Procédure de vérification de présence de glissement de terrain.....	184
Figure 7.14. Les caractéristiques morphologiques et topographiques des glissements de terrain (exemple du glissement de Makongobo (au nord de Butembo)). La terminologie proposée par la commission IAEG des glissements de terrain (1990) est utilisée.....	185
Figure 7.15. Profil longitudinal du site affecté par le glissement de terrain de Kavitero à Butembo. Exagération en hauteur : environ 4 fois.....	187
Figure 7.16. Augmentation de la surface drainée par la route vers Manguredjipa.....	191
Figure 7.17. Caractérisation du glissement de Kavitero. Les points A et B représentent consécutivement la situation avant et après les travaux sur la route de Manguredjipa.....	192
Figure 7.18. Distribution spatiale des glissements de terrain à Butembo pour la zone couverte par les photos aériennes de 1957.....	193
Figure 7.19. Distribution spatiale des glissements de terrain en relation avec le relief.....	197
Figure 7.20. Distribution spatiale des glissements de terrain en relation avec la pente, les failles établies et les cours.....	197
Figure 7.21. Distribution spatiale des glissements de terrain en rapport avec l'hydrologie.....	198
Figure 7.22. Enveloppe locale de Butembo sur base du principe de Montgomery Dietrich (1994).....	200
Figure 7.23. Caractéristiques des glissements de terrain de Butembo en fonction de l'enveloppe comparée à celle du sud du Rwanda.....	201
Figure 8.1. Effets de l'urbanisation sur les risques hydrologiques	211
Figure 8.2. Schéma de l'enchaînement du système de drainage superficiel, menant aux risques hydrologiques à Butembo.....	213

Liste des annexes

Annexe I : La délimitation de la ville selon le décret présidentiel et le tracking effectué.....	240
Annexe II : Tableau SIG : Données cartographiques et spatiales utilisées dans le cadre de ce travail.....	241
Annexe III : Carte des risques hydrologiques de Butembo.....	253
Annexe III.1 : La notice explicative de la carte des risques hydrologiques à Butembo.....	253
Annexe III.2 : La carte des risques hydrologiques de Butembo, à l'échelle de 1/25.000.....	255
Annexe IV : Evolution de la population de la ville de Butembo de 1948 à 2008.....	256
Annexe V : Evolution du débit des sources le long des zones ravinées au niveau des dambos de la Wayimirya et de Kimemi entre 2002 et 2009.....	259
Annexe VI: Profondeur de l'eau dans les puits pour la période 2002-2003.....	261
Annexe VII: Profondeur de l'eau dans les puits pour la période 2008-2009.....	262
Annexe VIII : Les sources de la ville de Butembo.....	264

Table des symboles et acronymes:

ACMAD	: African Centre of Meteorological Applications for Development
ARVI	: Atmospherically Resistant Vegetation Index.
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.
AVI	: Atmospherically Vegetation Index.
CAUB	: Consortium de l'Agriculture Urbaine de Butembo
CCFD	: Comité Catholique Contre la Faim et pour le Développement
CIRAD	: Centre de coopération internationale en recherche Agronomique pour le développement
CNES	: Centre National d'Etudes Spatiales (France).
CTB	: Coopération Technique Belge.
CUD	: Coopération Universitaire pour le Développement
DES	: Diplôme d'études spécialisées
DGCD	: Direction générale de la coopération au développement
FUB	: France Université Butembo
GCS	: Geographic Coordinate System.
GEMI	: Global Environmental Monitoring Index.
GLOVIS	: Geological Society Global Visualization Viewer.
GMT	: Greenwich Mean Time.
GPS	: Global Positioning System.
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IGN	: Institut Géographique National.
IR	: Infra-Rouge.
ISEAB	: Institut Supérieur Emmanuel d'Alzon de Butembo
ISIS	: Incitation à l'Utilisation Scientifique des Images Spot.
ITAV	: Institut Technique Agricole et Vétérinaire.
LANDSAT ETM+	: LANDSAT Enhanced Thematic Mapper Plus.
LANDSAT MSS	: LANDSAT Multispectral Scanner.
LANDSAT TM	: LANDSAT Thematic Mapper.
MNT	: Modèle Numérique de Terrain.
MRAC	: Musée Royal d'Afrique Centrale
MSAVI	: Modified Soil-Adjusted Vegetation Index.
NASA	: National Aeronautics and Space Administration.
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index.

NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration.
OVG	: Observatoire Volcanologique de Goma.
PVI	: Perpendicular Vegetation Index.
R	: Rouge.
RéCO	: Réseau des correspondants de chercheurs sur les risques hydrologiques naturels en Afrique Centrale
RMSE	: Root Mean Square Error.
RVI	: Ratio Vegetation Index.
SAPH	: Station Agro-Pastorale Horizon
SAVI	: Soil-Adjusted Vegetation Index.
SIG	: Système d'Information Géographique.
SPOT	: Satellite Pour l'Observation de la Terre.
TIN	: Triangulated Irregular Network.
TSARVI	: Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index.
UCG	: Université Catholique du Graben.
ULg	: Université de Liège.
UREFV	: Unité de Recherches sur les espèces Fruitières et la Vigne
UTM	: Universal Transverse Mercator.
WGS84	: World Geodesic System, Systèmes de coordonnées terrestres.
XS	: Multispectrale

Introduction générale

1. Introduction générale

1.1. Problématique scientifique

Le phénomène urbain est à l'heure actuelle un enjeu important à l'échelle planétaire (Weber *et al.*, 1997). L'urbanisation, tel un phénomène social et une transformation physique des paysages, est la plus puissante, irréversible et visible des transformations humaines sur la terre (Sánchez-Rodriguez *et al.*, 2005). L'urbanisation galopante dans le monde sera un des grands défis du bien-être humain et d'un cadre de vie sain (Redman et Jones, 2004). De nombreuses villes d'Afrique Centrale connaissent à l'heure actuelle une importante expansion territoriale. Cette expansion s'effectue, la plupart du temps, de manière spontanée, au-delà de toute forme de contrôle par les pouvoirs publics, en raison du fait que les villes dépassent leurs propres limites administratives et empiètent sur les zones rurales en absorbant dans ce processus, les villages et les villes charnières situés dans leur trajectoire de croissance.

De nos jours, les taux d'urbanisation élevés indiquent que la population urbaine de l'Afrique Centrale a plus que doublé, partant de 23.741.000 personnes en 1990 à 55.593.000 en 2010 (ONU-Habitat, 2010). La rapide croissance démographique actuelle constatée dans les villes d'Afrique Centrale est le résultat conjugué des 5 facteurs suivants : (a) les taux nationaux de fécondité élevés ; (b) l'exode rural ; (c) la baisse du taux de mortalité en milieu urbain ; (d) les déplacements des populations des suites de conflits ; et (e) la croissance économique dans certains pays de la région qui joue un rôle fondamental dans les migrations transfrontalières. Ces facteurs constituent les causes déterminantes de l'étalement urbain, de la ségrégation spatiale et de la concentration des citadins pauvres dans les zones non desservies ou par-delà les franges urbaines (ONU-Habitat, 2010). Fjeldstad (2005) estime que l'urbanisation de la pauvreté est un développement dramatique sur le continent africain, car elle est génératrice de contrastes alarmants entre la richesse des quartiers d'affaires ou des zones résidentielles pour les couches sociales à revenus élevés, d'une part et la masse de misérables croupissant dans de vastes quartiers informels et les taudis, d'autre part. Ces contrastes sont souvent à la base d'un dysfonctionnement lié aux inégalités sociales dont les conséquences très souvent paradoxales affectent aussi bien les riches que les pauvres. La tendance actuelle se confirmant, l'Afrique Centrale dans son ensemble comptera plus de population urbaine que rurale, dans les années à venir.

La ville de Butembo n'échappe pas à cette tendance. Elle constitue même un cas spécial d'explosion démographique qui est consécutive à l'afflux massif des déplacés des guerres à la suite de l'insécurité générée par des guerres incessantes. La concentration spontanée des populations, inhérente à cet exode incontrôlé sur un territoire assez restreint, a induit une urbanisation sans cesse croissante qui a abouti à un dysfonctionnement des écosystèmes sur le territoire urbain avec des conséquences environnementales désastreuses : dégradation de la végétation, ravinement, inondation, glissement de terrain et pollution. Ces conséquences perturbent la structure urbaine et génèrent localement une paupérisation des citoyens tout en compromettant toute initiative de développement endogène.

Il est connu que l'urbanisation conduit à l'imperméabilisation des espaces avec des conséquences désastreuses sur l'environnement (Moeyersons *et al.*, 2004 ; Vandecasteele *et al.*, 2009, 2010, 2011). Ce phénomène est déclenché par le changement d'affectation du sol. En effet, les changements dans l'utilisation du sol provoquent souvent une augmentation du coefficient d'écoulement. Ainsi, l'effet négatif de la déforestation sur l'infiltration et l'alimentation des sources a été montré pour plusieurs zones forestières au Rwanda (Rwilima, Faugère, 1981). Mais il va de soi que les augmentations du coefficient de ruissellement les plus importants sont à prévoir dans les villes à cause de la création de multiples surfaces durcies (Berthier *et al.*, 2004; Rodriguez *et al.*, 2003). L'urbanisation rapide de la ville de Butembo a conduit à l'endurcissement des superficies considérables de par sa structure routière particulière en forme de damier. Il est aussi connu que l'urbanisation peut changer rapidement l'hydrologie des bassins versants et leur morphologie (Osmar *et al.*, 2010). Les routes et les fossés perturbent le drainage naturel et, par conséquent, peuvent concentrer les eaux de ruissellement dans les endroits où il n'y avait pas de problème avant, mais où, aujourd'hui, les structures urbaines sont gravement endommagées (Croke et Mocker, 2001;.. Osmar C.J. *et al.*, 2010). Dans ce contexte, les ravinements sont devenus un problème environnemental majeur en bordure de route où ils se développent rapidement, essentiellement dans les régions urbaines (Jungerius *et al.* 2002 ; Nyssen *et al.*, 2002).

Le contexte oro-hydrographique de la ville de Butembo la prédispose à l'amplification de ces phénomènes hydrologiques. En effet, la ville est bâtie dans une dépression qui constituait jadis des anciens dambos surplombés par des collines. Moeyersons et Trefois (2008) estiment que l'évolution géomorphologique la plus évidente en cours en Afrique Centrale reste le changement de régime hydrologique des rivières et d'autres cours d'eau

situés dans les zones ayant des caractéristiques morphologiques similaires à ces écosystèmes. Les dambos étaient hydrologiquement compatibles avec les conditions humides en Afrique sub-saharienne au cours de la première moitié de l'Holocène (Moeyersons *et al.*, 2010), mais aujourd'hui, les hydrographes dans le sous-continent montrent des pics beaucoup plus élevés, liés à des crues soudaines, alors que le débit de base est resté plus bas qu'auparavant, voire inexistant. Les zones qui abritaient des anciens dambos à Butembo sont fortement sujettes aux ravinements alors qu'il y a soixante ans, ces ravinements ne présentaient pas un risque majeur. Désormais, ce phénomène s'amplifie d'année en année et génère des problèmes connexes, notamment des pénuries d'eau, des affaissements et d'autres types de mouvements de masse.

Outre les ravinements des fonds de vallées et ceux qui se produisent à la suite de la torrentialité du ruissellement dans les collines, la ville de Butembo reste confrontée aux inondations et aux mouvements de masse. Localement, aucune action concertée n'a jamais fait l'objet d'une mise au point d'une stratégie de remédiation. L'ampleur des dégâts montre que si rien n'est fait dès maintenant, le coût de remédiation sera difficile à couvrir dans le contexte socio-économique actuel de la population urbaine de Butembo. Schuster (1996) estime que les glissements de terrain sont à la base de pertes socio-économiques énormes comparativement à celles qui leur sont imputées. Malgré cela, il faut noter que les renseignements sur ces processus géomorphologiques sont restés, jusqu'à nos jours, beaucoup plus restreints en Afrique, comparativement aux autres continents. En Afrique Centrale, où plusieurs villes sont confrontées à ces processus, des études récentes font état d'une vulnérabilité de plus en plus prégnante induite par des glissements de terrain et des pertes de vies humaines qui excèdent de loin les accidents liés aux mouvements sismiques (Vandecasteele *et al.*, 2009 ; 2010 ; 2011). Un événement soudain de glissement de terrain collinaire s'est déclenché à Kavitero en juillet 2007 : 6 maisons ont été détruites, 16 autres ont été affectées.

Aussi, bien que les cours d'eau dans les fonds des vallées de Butembo montrent une tendance nette à s'inciser, ils ne sont pas toujours capables de véhiculer immédiatement toutes les eaux de ruissellement lors des événements pluvieux d'allure exceptionnelle. Ainsi les débordements des lits de rivière s'étalent dans les vallées à fond plat si bien que la ville est aux prises, ces dernières années, avec des inondations périodiques qui rendent les populations de plus en plus vulnérables. Des décennies dépourvues de crues très importantes ont renforcé

la méconnaissance des possibilités de débordement. Dès lors, à la suite de l'explosion démographique, les lotissements ont envahi très largement les zones inondables et les versants en amont, sans précaution particulière. Hormis les dangers que font courir ces crues à la population, elles provoquent aussi d'importants dégâts aux activités relatives à l'agriculture urbaine et à la voirie par inondations et sapements des berges. Mais les dégâts ne se limitent pas aux bas-fonds de vallées. En fait, ces inondations sont alimentées par un ruissellement venant des collines environnantes. Dans sa trajectoire vers les fonds de vallées, un ruissellement à potentiel érosif considérable se transforme en écoulement sous forme de ruisseaux torrentiels. La vitesse des eaux de ruissellement a provoqué ces dernières années, une amorce de ravinement le long des routes ou à partir des points où le ruissellement déborde latéralement de la route provoquant l'érosion progressive (Moeyersons, 1991). Ces manifestations s'observent également le long des berges ou des maisons qui se déchaussent graduellement. Les dégâts aux routes, champs, maisons et autres infrastructures commencent à s'accumuler.

En fait le ruissellement sur les versants est plus dangereux que les inondations dans les fonds de vallées du fait de son caractère brusque et violent. ONU-Habitat (2010) montre que les inondations récurrentes de plusieurs villes d'Afrique Centrale procèdent de multiples facteurs, mais sont surtout consécutives au comportement humain, notamment la croissance démographique soutenue, associée à l'implantation des populations dans les zones sujettes aux inondations. Des études récentes (Vandecasteele *et al.*, 2010 ; 2011) montrent que de plus en plus de villes en Afrique Centrale et le long du *rift albertin* sont confrontées à des problèmes d'inondation suite à la dégradation de l'environnement et à l'imperméabilisation des terrains urbains. Cette imperméabilisation du terrain se manifeste selon des proportions toujours croissantes à Butembo et conduit à des crues soudaines de rivières de fond des vallées en exacerbant les phénomènes de ravinements au fil du temps avec un éventail considérable de conséquences environnementales.

Le problème se complexifie par les structures linéaires des routes qui suivent la pente et par celles qui présentent des caractéristiques susceptibles d'accentuer la concentration des écoulements superficiels dans certains thalwegs. Bocher *et al.* (2007) estiment qu'en développant les effets des éléments linéaires permanents, la route affecte significativement les processus hydrologiques et géomorphologiques. Elle est souvent identifiée comme la cause de

l'accélération des transferts de surface et de l'augmentation d'évacuation de sédiments vers les cours d'eau.

Malgré les conséquences sur l'environnement urbain de Butembo, tous ces phénomènes supposés extrêmes par la population locale ne sont pas argumentés objectivement sur des bases scientifiques. En guise d'exemple, les ravinements urbains qui ont connu une ampleur considérable dans leurs progressions au cours de ces dernières décennies jusqu'à devenir un problème mondial ne sont pas suffisamment étudiés surtout en Afrique. Dans ce continent, la plupart des études de cas sont issues de la sous-région des savanes ouest-africaines (Ugodulunwa, Laka, 2008; Balzerek *et al.*, 2003) et de l'Afrique Australe (Rowntree *et al.*, 1991). Quant aux glissements de terrain, Petley (2008) suggère, en inventoriant les mouvements de masse, qu'un certain nombre de glissements de terrain mortels en Afrique feraient parties des données manquantes en raison de leur occurrence dans des zones éloignées ou parce qu'ils sont déclarés par des langues locales.

Toutefois, en Afrique Centrale, où plusieurs villes sont confrontées à ces processus, des études récentes font état d'une vulnérabilité de plus en plus prégnante induite par des glissements de terrain et des pertes de vies humaines qui excèdent de loin les accidents liés aux mouvements sismiques (Vandecasteele *et al.*, 2009 ; 2010 ; 2011). De nombreuses recherches focalisées sur les environs proches de Butembo ces dernières années notent des conséquences désastreuses sur l'environnement et spécialement dans le domaine du sol (Jones et Egli, 1984 ; Kasay, 1988 ; Vyakuno, 2006). Tous ces acteurs dénoncent la croissance démographique sans précédent qui est accentuée par l'exode rural et la faible productivité des petits lopins de terre dans les zones périphériques sans concentrer les investigations sur le territoire urbain de Butembo.

De même, tous les bassins versants de la ville de Butembo confrontés à ces problèmes hydrologiques sont alimentés par des pluies dont les caractéristiques pluviométriques n'ont malheureusement pas fait objet d'une analyse détaillée pour voir si elles auraient influencé l'évolution des écosystèmes locaux ou si elles auraient exacerbé les phénomènes environnementaux en perturbant la structure urbaine à Butembo. New *et al.* (2006) et Aguilar *et al.* (2009) stipulent qu'il manque d'informations sur les tendances des variables pluviométriques et des extrêmes climatiques dans beaucoup de régions à travers les pays en développement alors qu'elles donneraient des indications utiles en matière environnementale.

Solomon *et al.* (2007) et Ozer *et al.* (2009) estiment également que les indices pluviométriques sont encore trop peu étudiés en Afrique sub-saharienne. Mahé (1993) précise que la zone équatoriale est un milieu hydrologiquement très contrasté et qu'elle reste liée à la complexité du système océan-atmosphère qui génère les précipitations, complexité due à sa position à cheval sur les deux hémisphères.

Il y a lieu de focaliser l'attention en matière d'alerte précoce au risque potentiel encouru en milieu urbain de Butembo en cas d'amplification de tous ces phénomènes hydrologiques et, par ricochet, des modifications radicales de l'environnement urbain qui imposera une réadaptation des socio-écosystèmes en perpétuelle évolution. Ce constat impose une compréhension de ces phénomènes dans un contexte où l'urbanisation rapide de la ville de Butembo n'est pas accompagnée des aménagements appropriés, notamment dans le domaine de la gestion de l'eau au sens large du terme.

Mais cela exige des approches appropriées et une connaissance parfaite du risque dont le préalable reste la localisation spatiale et temporelle. La maîtrise de l'urbanisation permet de lutter efficacement contre la plupart des risques majeurs pour autant que les éléments qui président à leur survenance soient connus et que la délimitation des périmètres d'aléas ait été réalisée sur base de critères objectifs et scientifiques (Léone *et al.*, 2010). La localisation temporelle et spatiale aboutit souvent à une cartographie qui est d'autant plus utile surtout en raison de sa vocation d'aide à la décision ou du moins d'aide à la compréhension du paysage urbain (Bordin, 2002). Déjà, une étude sur la problématique foncière au Nord-Kivu, RDC (Pélerin, 2010) a suggéré entre autres que les limites des zones urbaines soient clarifiées et que les actions y relatives soient inscrites prioritairement dans les agendas des acteurs politiques. ONU-Habitat (2010) réaffirme que les limites administratives tendent à compliquer l'application de la réglementation de la planification urbaine : les systèmes parallèles de gestion et d'administration de terrains urbains peuvent fonctionner et même coexister sans trop de heurts, mais seulement lorsque les territoires sous leur contrôle respectif sont clairement délimités et séparés.

Le comble est que la ville de Butembo ne dispose même pas d'une carte faite sur des bases scientifiques objectives et authentiques, ce qui rend pénible toute intervention sollicitant une carte de base. On se rend compte dans ces conditions que cette carte qui est un préalable

pour beaucoup d'interventions mérite d'être élaborée. Les risques auxquels est confrontée la ville devront être spatialisés sur base de cette carte.

La remédiation contre tous ces phénomènes exige donc une approche appropriée et des objectifs bien définis.

1.2. Objectifs de la thèse

Cette thèse se fixe comme objectifs globaux :

1. Trouver des moyens de prévision, de prévention et de traitement des risques hydrologiques qui menacent la ville de Butembo
2. Mettre à la disposition des organes décisionnels une carte des risques hydrologiques de Butembo.

A ces fins, les objectifs concrets se libellent en ces termes :

Par rapport à l'analyse diachronique du développement de la ville de Butembo :

1. Etablir la carte topographique de référence de la ville de Butembo et produire la carte planimétrique de l'entité urbaine dans ses limites administratives.
2. Etudier l'évolution de l'emprise urbaine de la ville de Butembo, de 1957 à 2008, alliant photographies aériennes et imagerie satellitaire en décrivant la dynamique territoriale qui accompagne son expansion.

Par rapport aux pluies

Caractériser l'évolution de la pluviométrie entre 1957 à 2010

Par rapport au ruissellement torrentiel sur les versants :

1. Elucider l'effet de l'urbanisation sur l'origine du ruissellement, son organisation spatiale et ses effets érosifs.
2. Etablir une carte de risques de torrentialité.

Par rapport aux problèmes des ravinements de fond de vallée:

1. Etudier la relation entre la dynamique de ravinement dans les fonds de vallée et la dynamique de l'urbanisation.
2. Analyser les effets de l'incision dans les fonds de vallées sur la dynamique de la nappe aquifère.

Par rapport aux inondations :

1. Reconstituer l'inondation du 6 octobre 2009.
2. Elaborer une carte du périmètre inondé en 2009 et une carte de risque d'inondation dans le futur en cas d'absence de mesure de remédiation.

Par rapport aux seuils topographiques des glissements de terrain :

1. Trouver la cause de la remobilisation du glissement de Kavitero.
2. Trouver la cause des autres glissements de terrain.

1.3. Structure de la thèse

Cette dissertation s'articule sur sept chapitres outre l'introduction et la conclusion.

1. Le premier chapitre s'articule sur la cartographie de la ville de Butembo et de son expansion spatiale entre 1957 et 2008. L'élaboration de la carte de la ville de Butembo est une strate de base essentielle pour cette thèse étant donné que la spatialisation de toutes les données traitées et analysées est faite sur base de celle-ci. Déjà à ce niveau l'évolution de l'emprise urbaine ainsi que les calculs relatifs à la densification de la population au sein de la ville se réfèrent à la nouvelle carte faite sur base des démarches scientifiques objectives.
2. Le deuxième chapitre aborde les caractéristiques physiques et donne un aperçu du contexte phytosociologique, essentiellement botanique, dans la ville de Butembo.
3. Le troisième chapitre caractérise les événements pluviométriques à Butembo. Des séries chronologiques à différents pas de temps sont constituées. Le but est de caractériser de la manière la plus nette les événements qui structurent et modulent les cycles annuel, saisonnier et quotidien des pluies à Butembo. Cette analyse minutieuse s'est focalisée sur les événements extrêmes, les anomalies, le nombre de jours de pluies ainsi que les dates de début et de fin des saisons pluvieuses.
4. Le quatrième chapitre cherche à comprendre la genèse et les effets érosifs des écoulements sur les versants. De manière diachronique une analyse détaillée de l'affectation du sol entre 1987 et 2004 essaye de prendre en compte l'artificialisation du paysage urbain contribuant à une croissance du débit de pic des écoulements superficiels, à la réorganisation des ruissellements ainsi qu'au transfert rapide des eaux vers les vallées avec leurs impacts sur les ravinements collinaires.
5. Le cinquième chapitre aborde une analyse diachronique et volumétrique du ravinement de fond de vallée à Butembo en focalisant l'attention sur les causes et les conséquences liées à ces phénomènes. Les incisions verticales et latérales sont

analysées et leur impact sur le rabattement de la nappe sont traités en s'appuyant sur l'évolution du niveau de l'eau dans les puits ainsi que la dynamique du niveau de lieux de puisage de l'eau de source.

6. Le sixième chapitre reconstitue les inondations catastrophiques du 6 octobre 2009 en essayant de déterminer les causes. La caractérisation physique du bassin versant est analysée et l'occupation du sol fait l'objet d'une analyse diachronique sur le bassin versant de la Kimemi. Une carte des risques d'inondations reprend la zone inondée en date du 6 octobre 2009 et délimite les risques d'inondations dans le futur en cas de non remédiation aux causes.
7. Le septième chapitre analyse les seuils topographiques des glissements de terrain à Butembo. Les caractéristiques physiques de glissements de terrain sont analysées et une analyse faite sur base d'un contrôle topographique permet de cerner la cause principale de leur mise en mouvement. Le cas de la réactivation du glissement de Kavitero fait l'objet d'une analyse plus détaillée pour chercher à comprendre les vraies causes en vue de proposer des stratégies de mitigation appropriée et éviter que d'autres remobilisation se produisent à d'autres endroits qui sont dans une configuration morphologique similaire

Chapitre premier

La cartographie de la ville de Butembo et de son expansion spatiale entre 1957 et 2008

Chapitre I : La cartographie de la ville de Butembo et de son expansion spatiale entre 1957 et 2008

1.1. Introduction

1.1.1. Situation géographique

Butembo est une de trois villes du Nord-Kivu située au Nord-est de la République Démocratique du Congo. La circonscription urbaine est située entre $0^{\circ}05'$ et $0^{\circ}10'$ de latitude nord et $29^{\circ}17'$ et $29^{\circ}18'$ de longitude Est. Elle se trouve à 17 km au nord de l'équateur. Elle est située à proximité de la dorsale occidentale du *Rift Albertin* au Nord-Ouest du lac Edouard. La figure 1.1 illustre la localisation de la ville de Butembo.

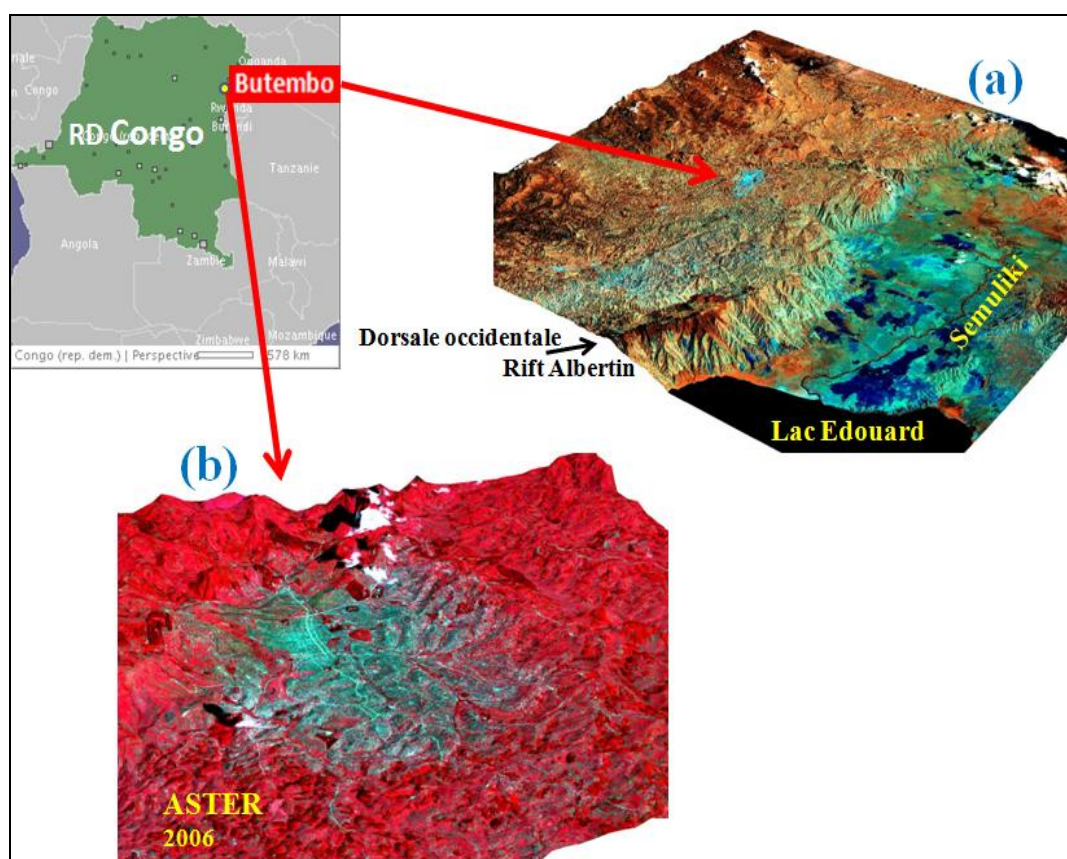


Figure 1.1. Localisation de la ville de Butembo: (a) Topographie de la dorsale occidentale du Rift Albertin; (b) Extrait de l'image ASTER en 3D de la ville de Butembo prise le 23 mai 2006.

Depuis sa création, la ville de Butembo n'a jamais été dotée d'une carte géographique de référence objective. Les seules sources cartographiques disponibles jusqu'à nos jours sont faites à main levée (Fig. 1.2). Selon les rapports de la mairie de Butembo, la superficie de la ville est établie à 190,34 km². Le suivi de l'évolution de cette ville est une nécessité et reste un défi pour les municipalités locales étant donné que les outils cartographiques peu fiables, rares et obsolètes présentent des toponymies et des légendes hétérogènes ne facilitant pas les

démarches scientifiques et toute autre intervention nécessitant une carte géoréférencée en trois dimensions.



Figure 1.2. Carte de la ville de Butembo faite à main levée

1.1.2. Spécificité et dynamisme de la ville de Butembo

1.1.2.1. Historique

Avant 1924, le village de Lusando servait de résidence au Mwami des Bayora. Il était un centre dédié au commerce du sel en provenance de Katwe (Ouganda), du poisson et de « *milumba* », tissus d'écorces battues, en provenance des régions avoisinantes. Les années 1928 à 1930, la compagnie Minière des Grands-Lacs (MGL), installe le siège administratif de la direction Nord de ses exploitations à Butembo qui devient le centre de transit et

d'acclimatation de la main-d'œuvre situé au carrefour des routes. Dans les années 1930 à 1940, un noyau d'Européens constitué essentiellement de commerçants et d'industriels s'installe à 1 km au sud du siège de la direction de la MGL de part et d'autre de la route Congo-Nil, l'actuelle route Nationale 2. C'est la genèse d'une cité indigène entre la colline Kambali et l'avenue Ruwenzori (Kakule Muwiri et Kambalume, 2002).

Dans l'édition de 1943 des codes et lois du Congo-Belge, annotée par Léon Strouvens avec Pierre Piron, l'on trouvait déjà mentionné le nom de Butembo dans l'arrêté n° 47 du 19 août 1937, traitant des circonscriptions urbaines de la province de « Constermansville », le futur Kivu et ensuite morcelé en Nord-Kivu, Sud-Kivu et Maniema. Cet arrêté reconnaît Butembo comme grand village. Par la suite, en 1949 par l'arrêté n° 21/053 du 23 septembre 1949 conformément aux dispositions de l'ordonnance loi n° 170/AIMO du 20 juillet 1945 relative à la création des cités indigènes, Butembo a été reconnu comme cité indigène.

De 1950 à 1959, Butembo a alors atteint l'avenue des écoles, le quartier Congo ya Sika avec respectivement 9653 habitants en 1957 et 11.189 habitants en 1959. L'année 1958 marqua la signature de l'ordonnance n° 97/138 du 15 mai 1956 soumettant Butembo au régime du décret du 21 février 1949 relative à l'urbanisme. Butembo a donc été reconnu comme centre extracoutumier par l'arrêté n° 221/180 du 12 septembre 1958. La décennie suivante, la cité s'étendra sur l'avenue Goma, cellule Vungi, Kimemi, Londo, Muhayirwa et Vihya. Avec une population de 26 065 habitants. En 1962, une loi est votée à l'assemblée du Kivu-Maniema pour élever Butembo au rang de commune (Kakule Muwiri et Kambalume, 2002). La figure 1.3 présente un extrait de la ville de Butembo en 1968.

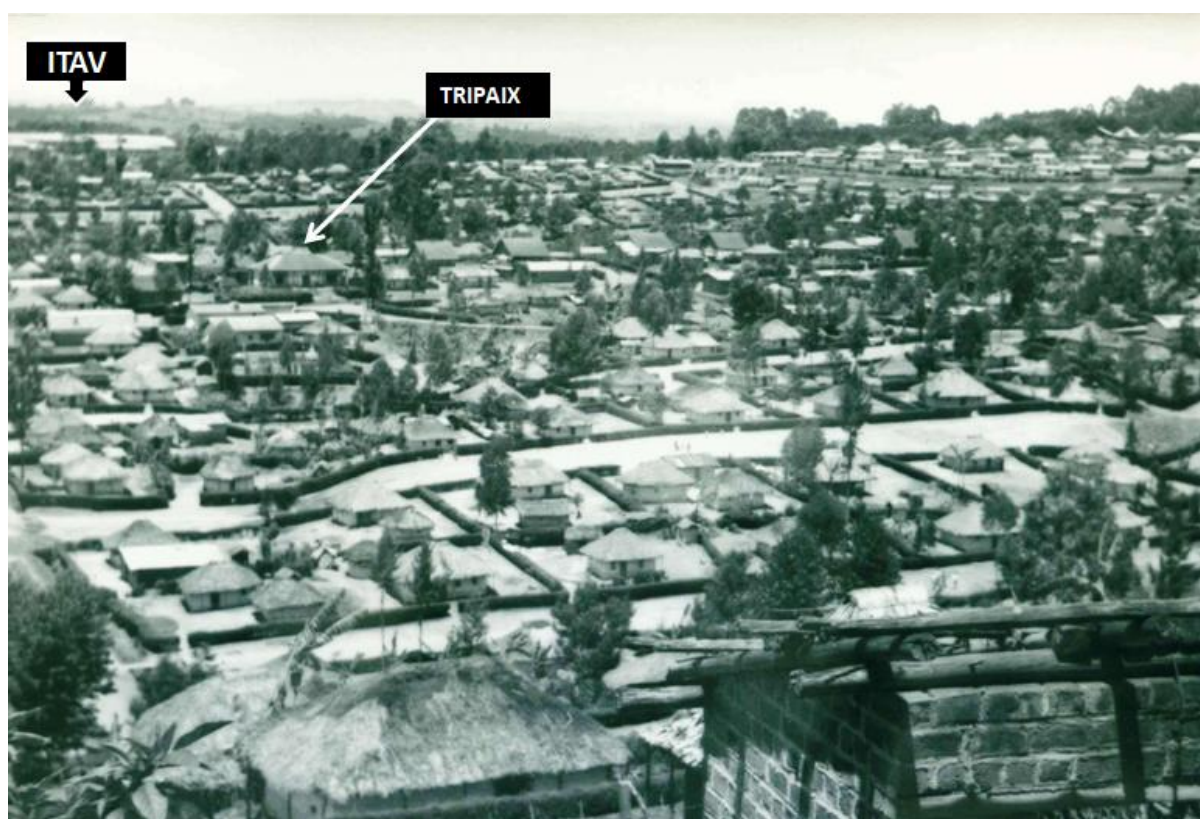


Figure 1.3. Butembo en 1968

Source : Photo d'archives, Pères Assomptionnistes, Procure d'Itterbeek, Bruxelles

Butembo sera ensuite reconnue comme cité parmi les cités créées par les ordonnances présidentielles. Les années 1970 à 1979, la cité de Butembo est constituée de 6 quartiers nommés Kambali, Matanda, Vungi, Lumumba, Congo ya Sika et Président de la République. Plus tard, elle s'étend à l'est vers Kitulu, Kisingiri, au sud vers Kalimbute, Vutetse, Vulumbi, Vulema et Vuhika. La population compte alors 50921 en 1975 et 69 227 habitants en 1979. Vers l'année 1987 quand Butembo comptait 92932 habitants et la période des années 1990, une agglomération voisine, celle de Makerere en collectivité-chefferie de Bashu se développa tandis qu'à la chefferie de Baswagha, les localités de Vohakatwa, Mukuna, Ivatama, Malera, Rughenda, Katsya et Vutsundo connaissent une poussée démographique remarquable faisant passer la population à 141.707 âmes (Urbanisme, 2006). Le Président de la République a signé le décret n° 042/2003 du 28 mars 2003 portant reconnaissance de Butembo comme ville et fixant ses limites. En fonction de cette évolution, nous constatons que Butembo a échappé à l'application des décrets sur l'urbanisme de 1949 et de 1957 ce qui se répercute sur sa trame urbaine.

1.1.1.2. Caractéristique du paysage urbain de Butembo

La reconnaissance et la compréhension de l'espace urbain peuvent être appréhendées au travers des formes urbaines et leurs caractéristiques. Les éléments structurants permettent de repérer des trames d'organisation spatiale successives. Leur caractérisation facilite l'évaluation de leur rôle en tant que facteurs contraignants, perméables et incontournables dans le développement du système urbain. Selon les schémas apparents, les arrangements et les successions, il est possible d'identifier des types de tissus urbains, associés éventuellement à des caractéristiques urbanistiques et architecturales, à des choix politiques de développement ou de réglementation foncière plus ou moins contraignante. La connaissance de telles caractéristiques peut fournir des indications intéressantes sur les éléments, les rythmes, les spécificités du tissu urbain et de son dynamisme (Weber *et al.*, 1995).

L'analyse de l'espace urbain de Butembo est facilitée par les contrastes relativement nets entre l'espace bâti et l'espace agricole et/ou sylvicole. L'image QUICKBIRD offre deux grands ensembles aux contours plus ou moins bien tranchés l'un de l'autre. Quelques espaces vides dans la ville se prêtent bien à l'agriculture urbaine. Dans la ville, les avenues forment les éléments de structure d'un tissu urbain découpé en îlots réguliers de formes rectangulaires assez répétitifs et regroupés selon des ensembles de surface plus ou moins homogène. Sur des collines relativement plus basses, les avenues et les maisons épousent les courbes de niveau et donnent une structure bien particulière au tissu urbain. Certaines avenues suivent littéralement la pente et sont à la base de l'accentuation de la vitesse d'écoulement de l'eau vers les vallées. La figure 1.4 illustre la structure urbaine de la ville de Butembo.

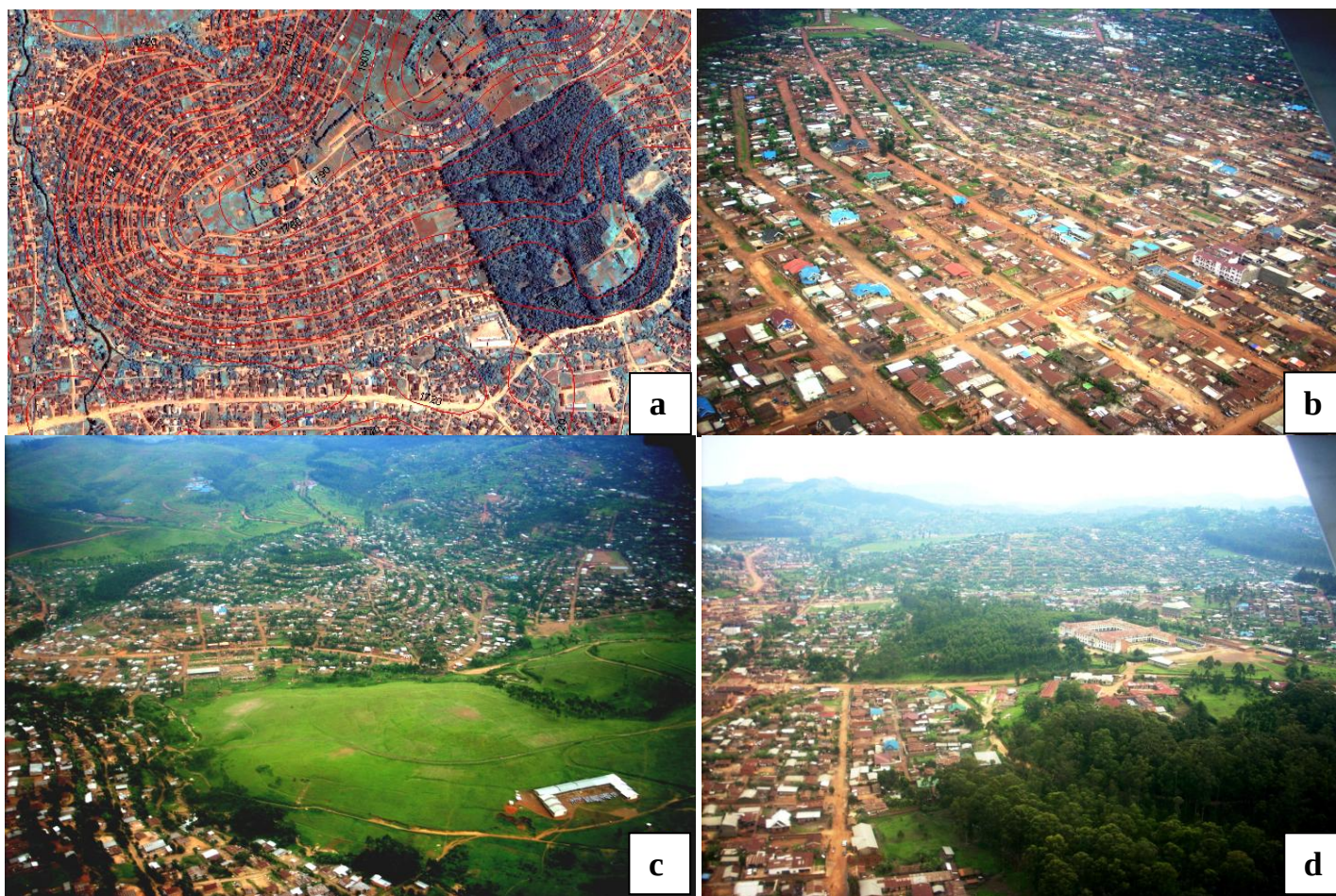


Figure 1.4. Structure urbaine de la ville de Butembo : **a).** Avenues parallèles aux courbes de niveau, croisées par des rues suivant la pente à Kalemire (Extrait de l'image QUICKBIRD du 18 avril 2005) ; **b).** Centre ville : Tissu urbain découpé en îlots réguliers de formes rectangulaires ; **c).** Vusenzero (en arrière plan) : les avenues et les maisons épousent les courbes de niveau ; **d).** Evêché (avant plan), Malkia wa Mbingu (au milieu) et Kalemire (en arrière plan).

Toutes les têtes des ravines sont en aval de ces avenues et par érosion régressive et progressive (Moeyersons, 1991), les structures urbaines sont perturbées d'une façon dramatique. La croissance très rapide de la demande en terrain à bâtir trouve sa réponse dans l'achat des terrains agricoles liant le parcellaire agricole au parcellaire urbain. Il y a une rivalité entre les terres agricoles et les surfaces à bâtir. Constamment, la ville ne cesse de gagner des terrains agricoles et boisés qui sont soit contigus, soit espacés, surtout dans les zones sans accident topographique majeur.

En revanche, les pâturages sur la route Mavono-Kasitu-Bulambo-Isale ont empêché la colonisation des maisons sur des terres plutôt à faible pente. La montagne vers Lwamiso, après le cimetière de Kitatumba bloque au nord-ouest l'avancée de l'extension de la ville de Butembo bien que des agglomérations toutes entières se développent au nord-ouest de cette montagne vers Vuvatsi. On peut toutefois y rencontrer quelques maisons accrochées sur les versants abrupts avec tous les risques qui en découlent. La tendance actuelle de la ville à glisser vers l'est est bien réelle en raison du relief des collines plus basses et arrondies ainsi que de l'éloignement par rapport aux poches d'insécurité. Vers Vukondi, au sud de la ville, on assiste aux transformations des gros noyaux villageois situés à proximité notamment de Musimba. Des terres, jadis gérées par des chefferies y sont incorporées dans la ville. Il en est de même dans les agglomérations situées dans la chefferie des Bashu sur la route de Bunyuka.

1.1.1.3. Objectifs de la représentation cartographique de la ville de Butembo et de son expansion spatiale entre 1957 et 2008

Etant donné la disponibilité d'images de télédétection, allant de 1957 à 2008 (ANNEXE II), ce chapitre veut décrire l'expansion de la ville au fil du temps. Une série de cartes planimétriques géoréférencées de la ville de Butembo sera produite. La dernière carte de cette série (2006-2008) est une carte topographique à 1/25.000 avec des courbes de niveau équidistantes de 20 à 20 m. La description de la délimitation de la ville fait l'objet de l'ANNEXE I. A titre d'information, plus tard dans ce travail, des renseignements relatifs aux risques hydrologiques seront répertoriés sur cette carte. Ceci explique le nom de la carte : « Carte des risques hydrologiques de Butembo ».

Cette étape est un préalable indispensable pour la suite de cette thèse, car c'est cette carte qui servira de base pour toutes les analyses ultérieures. Elle est très utile surtout en

raison de sa vocation d'aide à la décision ou du moins d'aide à la compréhension (Bordin, 2002) du paysage urbain de Butembo au moins dans ses limites administratives. Elle permet de contourner les imperfections qui pourraient subvenir de l'obsolescence des cartes. Elle permet aussi de revisiter les chiffres relatifs à la superficie de la ville repris dans les rapports de la mairie de Butembo.

Les résultats de cette étude pourront être une base indispensable et une strate de départ dans l'exercice de leur métier. La maîtrise de l'urbanisation permet de lutter efficacement contre la plupart des risques majeurs pour autant que les éléments qui président à leur survenance soient connus et que la délimitation des périmètres d'aléas ait été réalisée sur base de critères objectifs et scientifiques (Léone *et al.*, 2010).

1.2. Approche méthodologique pour la production des cartes

1.2.1. Données de terrain

La réalisation de la carte de la ville de Butembo a consisté à prélever des données au moyen du GPSmap60Csx avec une précision en x et y de ± 3 m. Ce GPS contient un altimètre barométrique précis et un compas électronique qui permet de retrouver le nord même à l'arrêt. Il est équipé d'un tout nouveau récepteur GPS ultra sensible (type SiRF III) afin de rendre la réception satellite possible dans les environnements les plus difficiles tels que dans les hauts canyons, sous les feuillages...

Les données ont été prélevées le long des limites qui sont décrites dans le décret présidentiel n° 042/2003 du 28 mars 2003 portant reconnaissance de Butembo comme ville et fixant ses limites. Ce travail s'est effectué en collaboration avec le Chef de l'urbanisme et de l'habitat de la ville de Butembo, Monsieur Jérémie Mundama avec l'autorisation de la mairie.

Les points GPS ponctuels ont été prélevés là où les obstacles naturels nous empêchaient d'accéder systématiquement à la limite naturelle, sans aller au-delà de cent mètres. Pour les zones dégagées, nous procédions au *tracking* le long de la limite, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Toutes ces données ont été intégrées et traitées dans un environnement SIG (Système d'Information Géographique). Dans cet environnement, les coordonnées sont projetées dans la projection Transverse Mercator dans le système

GCS_WGS_1984 ; le DATUM D_WGS_1984 et le sphéroïde WGS_1984, la zone 35N. Denègre et Salgé (1994) rappellent les deux formes d'expression de l'information géographique : [i] le mode vecteur où la géométrie de l'image cartographiée est décrite par des points composant le pourtour de chaque objet, que celui-ci soit ponctuel, linéaire ou zonal ; ces points sont reliés par des segments de droites orientés ou par toute autre ligne définie mathématiquement ; [ii] le maillé ou raster, également appelé matriciel, où la surface de l'image cartographique est décrite selon une logique de balayage ligne par ligne, chaque ligne étant composée de points élémentaires jointifs ou pixels.

Le mode vecteur a été privilégié, mais nous passons sans heurt de l'un à l'autre mode. La superficie ainsi que le périmètre de la ville ont été déduits d'un calcul effectué automatiquement dans l'environnement SIG. Les superficies des quatre communes (Bulengera, Kimemi, Vulamba et Mususa) de la ville de Butembo ont aussi été calculées.

Dans un premier instant, la surface planimétrique telle qu'on peut la lire sur une carte a été calculée. Ensuite, comme le territoire urbain est circonscrit dans une zone à relief accidenté, la surface topographique qui tient compte du modelé du terrain a été calculée en utilisant l'extension ET d'ArcGis, un des ensembles d'outils d'édition pour ArcMap. Ce calcul repose sur le principe selon lequel, si la surface d'entrée est un ensemble des données TIN ou du terrain, chaque triangle est examiné pour déterminer sa contribution à la surface et/ou au volume. La somme de ces parties est utilisée pour la sortie. Si la surface d'entrée est un raster, comme c'est le cas dans cette thèse (MNT couvrant la ville de Butembo dans ses limites administratives), les centres de cellules sont connectés en triangles. Ces derniers sont ensuite traités de la même façon que les triangles TIN.

1.2.2. Données spatiales et approches utilisées pour reconstituer la trame urbaine de façon diachronique

Les techniques classiques de suivi de la croissance urbaine, basées sur des observations effectuées sur le terrain et l'usage des photographies aériennes, permettent de produire des cartographies précises de l'étalement urbain, et d'en reconstituer l'histoire. Cependant, elles présentent un certain nombre d'inconvénients (Jat *et al.*, 2007) : elles ont un coût élevé, sont très consommatrices en temps, et ne sont généralement pas remises à jour régulièrement. En outre, elles ne sont pas disponibles partout. Ceci explique l'intérêt croissant

suscité par la cartographie et le suivi de la croissance urbaine et plus précisément de l'étalement urbain à partir de l'utilisation d'images satellitaires et de Systèmes d'Information Géographiques (Epstein *et al.*, 2002).

Les données enregistrées par les satellites apparaissent aujourd'hui comme un outil incontournable pour détecter des changements d'occupation et d'utilisation des sols sur les surfaces terrestres (Ridd et Liu, 1998). Le suivi de la croissance des espaces urbanisés impose une connaissance périodique de l'occupation du sol avec un niveau de précision spatiale adapté. La télédétection est de plus en plus utilisée pour l'analyse de l'étalement urbain (Sudhira *et al.*, 2004 ; Yang et Liu, 2005 ; Haack et Rafter, 2006) en raison de l'emprise géographique des scènes enregistrées, de la périodicité des prises de vue et de la résolution spatiale de plus en plus élevée des capteurs. Plusieurs études se sont intéressées de surcroît aux conditions environnementales de la ville (Lo *et al.*, 1997 ; Owen *et al.*, 1998 ; Roth *et al.*, 1989 ; Gallo *et al.*, 1993 ; Nowark *et al.*, 2000 ; Wagrowski et Hites, 1997) et à leurs impacts sur la santé (Miller et Small, 2003).

Depuis trente ans environ, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour effectuer un suivi des changements des espaces urbains par télédétection (Gomasca *et al.*, 1993 ; Yeh et Li, 2001 ; Yang *et al.*, 2003 ; Haack et Rafter, 2006).

Bien que ne disposant que d'une seule série des photographies aériennes, les photos aériennes de 1957 nous ont permis d'étendre notre période de recherche et de retracer l'histoire du développement de la ville de Butembo sur une période de 51 ans (un peu plus d'un demi-siècle).

Il existe une grande variété de techniques utilisées pour évaluer ou mesurer les espaces occupés par les surfaces artificialisées à partir d'images satellitaires. La numérisation manuelle des surfaces artificialisées sur l'image par photo-interprétation est la technique la plus précise, mais la plus coûteuse en termes financier et de temps. L'échantillonnage de points peut être une alternative à la numérisation complète des contours, mais cette méthode est moins précise que la précédente et reste coûteuse en temps. Le traitement automatique ou semi-automatique des images de télédétection par des approches supervisées (Greenberg et Gordon, 1997 ; Vogelmann *et al.*, 1998 ; Stuckens *et al.*, 2000 ; Stefanov *et al.*, 2001 ; Lu et Weng, 2005) a été utilisé depuis plusieurs années pour quantifier les surfaces artificialisées et

par conséquent évaluer l'étalement urbain. Cela nécessite d'une part, des images de télédétection à moyenne ou haute résolution et d'autre part, des données de référence pour classer les images et valider les résultats.

La détection des changements d'occupation du sol est un processus fondé sur l'identification des différences d'état d'objets ou de phénomènes à travers des observations à des moments différents (Singh, 1989). Il existe de nombreuses méthodes pour détecter des changements. Elles procèdent soit par une comparaison image par image soit par une comparaison post-classification (Yang et Lo, 2002), comme l'analyse de la différence entre deux images (Ballut et Nguyen, 1984 ; Ridd et Liu, 1998), la soustraction d'images (Fung, 1990 ; Zhang et al., 2002), la régression entre deux images (Ridd et Liu, 1998), la comparaison d'indices de végétation (Masek *et al.*, 2000), l'analyse en composantes principales (Fung et Ledrew, 1988), l'analyse des vecteurs de changement (Malila, 1980 ; Singh, 1989), la classification par réseaux neuronaux (Chen *et al.*, 2005), la classification spectrale/temporelle (Xiao *et al.*, 2005 ; Yin *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 2002), ou encore plus récemment les classifications orientées-objet (Herold *et al.*, 2005). Malgré la diversité des approches et techniques utilisées, quasiment toutes ces études insistent sur l'importance de réaliser correctement le prétraitement des images, essentiellement des corrections radiométriques et géométriques.

Dans le cadre de cette thèse, les démarches utilisées peuvent se résumer en ces termes :

1.2.2.1. Démarche interactive par numérisation manuelle des surfaces urbanisées

La première approche a consisté à déterminer l'entité urbaine existante pour chaque image en fonction de l'approche développée par Pumain *et al.* (1991). Ces auteurs affirment que l'entité urbaine est définie par le domaine de la construction continue autour d'un centre qui bénéficie d'interactions idéales entre les personnes et les différentes activités possibles, et estiment que cette zone est caractérisée par une densité de population d'au moins 50 à 1000 personnes, selon les pays. L'unité urbaine est une commune ou un ensemble de communes qui comporte sur son territoire une zone bâtie d'au moins 2 000 habitants, et ne représente pas de discontinuités de plus de 200 m, hormis celles liées à la présence de terrains servant à des buts publics ou de cours d'eau avec des ponts (Le Jeannic et Vidalenc, 1997). En outre, plus de la moitié de la population de la commune est regroupée dans cette zone bâtie. Si l'unité urbaine s'étend sur plusieurs communes, c'est-à-dire d'une ville-centre et de ses zones

périphériques directes habitées, l'ensemble de ces communes forme une agglomération multi-communale ou agglomération urbaine (Le Jeannic et Vidalenc, 1997). Si l'unité urbaine s'étend sur une seule commune, elle est dénommée ville isolée ou plus communément ville. Les communes hors unités urbaines sont des communes rurales.

L'utilisation de ces principes a facilité la délimitation de l'entité urbaine de Butembo pour les images de très haute résolution. Des descentes sur terrain très fréquentes ont permis d'attester certaines observations sur les images.

1.2.2.2. Détection de l'artificialisation du paysage urbain par la méthode de classification

La détection de l'artificialisation du paysage urbain de Butembo par la méthode de classification s'est faite à deux niveaux. De prime abord, nous avons procédé au décryptage du bâti urbain pour l'année 2005 coïncidant avec l'image Quickbird de très haute résolution. Ensuite, la mise en évidence de l'évolution de l'artificialisation du territoire urbain s'est faite dans l'ensemble pour se rendre compte du changement de l'occupation du sol entre 1987 et 2008 en utilisant les images SPOT. Ce deuxième aspect est traité au niveau du chapitre IV.

Pour décrypter objectivement l'emprise urbaine, il s'est avéré utile d'identifier les différentes caractéristiques des matériaux couvrant les toitures des maisons dans la ville de Butembo. Il s'agissait ainsi, d'extraire les informations spectrales permettant d'aboutir à un partitionnement de l'image sur l'étendue de la ville. Cette approche a permis de faire correspondre à un ensemble de caractéristiques radiométriques, observées sur l'image, une réalité thématique. Quatre classes identifiées en fonction des aires d'entraînement du bâti ont ainsi été constituées : toit en tôle soumis à un éclairage normal, toit en tôle brillant, toit en tôle sous ombre et toit en tuile. Nous avons ensuite omis le toit en tuile, leur réflectance étant proche de celle des sols nus. Ce travail a été fait avec Leica Imagine 9.1.

La méthodologie choisie a priori dans ce cas pour mettre en évidence la trame urbaine exploite l'algorithme du maximum de vraisemblance qui découle de la théorie de la probabilité du théorème de Bayes. Le principe de la classification bayésienne étant de segmenter une image par les calculs de probabilités d'appartenance à une région donnée pour chaque pixel de l'image, il est alors question de calculer l'appartenance d'un pixel à une classe définie par des zones d'apprentissage, par estimation du maximum de vraisemblance

(Robin, 1995). Cette règle du maximum de vraisemblance a été utilisée pour les classifications. Plusieurs réitérations ont permis d'améliorer les résultats. En calculant pour chaque classe, la moyenne et la variance, on procède à l'estimation de la probabilité d'appartenance de chacun des pixels. Le choix est alors porté à la classe qui a la probabilité la plus forte en supposant l'hypothèse d'une distribution gaussienne.

Pour extraire le bâti de la ville de Butembo à partir de l'image (QUICKBIRD), des conditions ont été établies à la fois à l'image classifiée, à l'image de la somme de probabilités et à l'image panchromatique en vue de l'obtention d'un meilleur recoupement de l'information et un résultat visuel satisfaisant. Il s'agissait de limiter le bâti aux seuls pixels qui appartenaient avec une forte probabilité (sur base de l'image de la somme des probabilités) à une des trois classes initiales (reprises dans l'image classifiée) tout en n'ayant pas des nuages (qui provoquent une saturation de l'image panchromatique). Cette bande panchromatique de l'image QUICKBIRD couvrant la zone urbanisée de Butembo a nécessité une classification non-dirigée par clusterisation, donnant ainsi deux classes, non-bâti et bâti.

Les classifications une fois réalisées, le processus de mise en évidence du bâti relève d'une simple opération arithmétique. L'assignation des valeurs 0 et 1 ou signature respective du non-bâti et du bâti fait apparaître un résultat sans ambiguïté représentant le bâti urbain de Butembo (Fig. II.7).

1.2.3. Un projet SIG

Un projet SIG (Système d'Information Géographique) a été développé pour circonscrire des données raster et vectorielle. Ce projet SIG est décrit en détail dans l'Annexe II Les données raster sont constituées des images satellitaires ayant des résolutions spécifiques à chacune des images que nous avons utilisées et dont les informations relatives sont en annexe. Certaines données graphiques sont aussi représentées en mode vectoriel

Cinq ensembles d'images satellitaires, notamment ont été rendus disponibles. Une image ASTER (*Advanced Space Transmission and Reflection Radiometer*) acquise en 2006 au niveau de United States Geological Society (USGS) Global Visualisation Viewer (GLOVIS) a été achetée par le Musée Royal de l'Afrique Centrale grâce au Laboratoire dirigé par le dr. Jan Moeyersons. L'image QUICKBIRD du 18 avril 2005. Cette image a été acquise

grâce au laboratoire conduit par le Professeur Jean-Marie Godeau dans le cadre des activités relatives à l'Agriculture Urbaine de Butembo. Les images satellitaires SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) ont été acquises grâce au financement de la CTB (Coopération Technique Belge) et au moyen du projet n° 182 du programme ISIS (Incitation à l'utilisation Scientifique des Images Spot) du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) (France). Les images LANDSAT ont été obtenues gratuitement, via l'internet, au niveau du Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection de l'Université de Liège. L'image ASTER. Nous avons aussi utilisé une image Orbview et une série des photographies aériennes couvrant une superficie de 72,9 km² correspondant à 48 % de la superficie urbaine.

Toutes les photographies aériennes, images satellitaires et cartes ont d'abord été géoréférencées. Ce géoréférencement a permis de caller ces données spatiales sur un datum de référence cité ci-haut. Mais le relief est accidenté en milieu urbain de Butembo. Les dénivellations peuvent aller au-delà de 200 m à moins de deux kilomètres à vol d'oiseau en certains endroits. Ce relief accentue donc l'erreur due à la parallaxe et complexifie les corrections géométriques. Par ailleurs, ces données spatiales multi-sources et multi-temporelles sont acquises avec des résolutions et des angles différents et présentent des disparités quant aux coordonnées de points externes de leurs scènes respectives. Dans ces conditions, outre l'impossibilité de faire des corrections géométriques, il devient quasiment impossible que les images s'enregistrent au système de projection des photographies aériennes utilisant la déformation unique par transformation polynomiale en coordonnées (x,y). Les images SPOT et ASTER ont donc été orthorectifiées à l'aide de points de contrôle et un modèle numérique de terrain (MNT) a permis d'extraire des courbes de niveau à l'échelle de 1 : 10.000. Ces courbes de niveau ont été générées par stéréophotogrammétrie sur photo aérienne de 1957 au moyen de Leica imagine. Ces courbes ont été comparées à celles issues des images ASTER et SPOT. Un rééchantillonnage épipolaire s'est avéré indispensable étant donné que les images ne sont pas exactement verticales outre les échelles et les orientations qui présentent à leur tour des dissemblables. Le rééchantillonnage épipolaire permet, lorsque au moins l'orientation relative des modèles stéréoscopiques a été réalisée, de passer de l'image initiale à celle qui aurait été obtenue si les axes des images avaient été parallèles entre eux et perpendiculaires à la base (Schenk, 1999 ; Kasser et Egels, 2001). Ce processus permet d'éliminer la parallaxe transversale y et de continuer le traitement avec seulement la parallaxe longitudinale x associée au déplacement vertical dans le stéréomodèle. Ainsi, un point de l'image de gauche dispose de son homologue sur une même ligne de

l'image de droite. Le rééchantillonnage épipolaire améliore non seulement le confort de l'opérateur, mais il accélère aussi le travail des corrélateurs, puisque la zone de recherche des points homologues est réduite à un espace à une dimension (Schenk, 1999 ; Kaeser et Egels, 2001 ; Mikhaïl *et al.*, 2001).

D'autre part, une scène de 7 km x 7 km venue des capteurs Quickbird a été acquise avec une résolution de 2,4 m dans le visible et le proche infrarouge et 0,61 m en panchromatique. L'amélioration de l'image Quickbird a consisté à produire une fusion entre l'image multispectrale et la panchromatique. Une image vraie couleur dont le pixel a une résolution de 0,61 m a été utilisée comme carte de base dans le cadre de ce travail.

Cette approche nous a permis de faire la digitalisation des caractéristiques du paysage urbain sur les couples stéréoscopiques après géoréférencement. Pour les informations nécessitant une vision en 3D, nous avons utilisé des lunettes anaglyphes grâce auxquelles une vue tridimensionnelle du paysage urbain a été mise en évidence. Cette méthode consiste à présenter sur un même document deux angles de vue différents et dissociés grâce à deux couleurs différentes (rouge et cyan). Ainsi, l'analyse photogrammétrique détaillée du relief (linéaments, ravinements, abrupt, failles, glissements de terrain et autres éléments structurels du paysage) de chaque couple stéréoscopique s'effectue sans équivoque. Les anaglyphes permettent au lecteur d'apprécier le relief et d'obtenir une bonne visibilité des phénomènes géomorphologiques exposés. De cette façon, nous avons voulu recréer les conditions qui sont normalement atteintes lorsqu'on travaille à l'aide d'un stéréoscope. Ce double contrôle renforçait notre observation et permettait d'affiner les résultats.

L'interprétation stéréoscopique des photographies aériennes est rendue plus nette en utilisant la stéréoscopie classique. Le stéréoscope à miroir utilisé dans ce travail est un appareil dont la base binoculaire est augmentée par un jeu de miroirs qui coude les chemins optiques. L'image est réduite dans un rapport voisin de 0,8/1 (Henri, 1972). L'appareil possède deux jumelles grossissantes qui diminuent fortement le champ visuel. Le grossissement habituel varie de 3 à 8 fois (Henri, 1972) rendant une vue en relief bien nette.

L'interprétation stéréoscopique des photographies aériennes a été confrontée aux observations faites au moyen des anaglyphes issus des images SPOT et ASTER. Les images

SPOT et ASTER ont déjà été utilisées avec succès par Toutin et Cheng (2001) et Roessner *et al.* (2005) pour extraire ces genres d'information.

1.3. Résultats

1.3.1. La carte planimétrique et topographique de la ville de Butembo

Le premier résultat du projet SIG est la production d'une carte topographique géoréférencée de la ville de Butembo. Cette carte et sa notice explicative font l'objet de l'annexe III. Notons que plus loin dans ce travail, certains risques hydrologiques ont été ajoutés à cette carte. Pour cette raison, la carte est intitulée : « Carte des risques hydrologiques de Butembo ».

La superficie planimétrique de la ville de Butembo calculée sur base de cette démarche est de 152 km². En tenant compte du relief de la ville, la surface topographique de la ville de Butembo obtenue sur base d'une analyse statistique dans *3D Analyst* s'élève à 158,95 km². Cette superficie est différente de celle que l'on peut retrouver dans la quasi-totalité des rapports de la mairie de Butembo estimant que la ville de Butembo s'étend sur 190,34 km². La différence équivaut à 31,39 km². Cette différence trouve son origine dans les outils utilisés ainsi que l'approche adoptée. Le tableau 1.1 récapitule les surfaces planimétriques et topographiques de la ville et des quatre communes qui la composent. Il met en évidence aussi les périmètres de chaque commune. Ces superficies sont calculées dans cet environnement SIG de ArcGis 9.3 en se basant sur le même principe. Le périmètre de la ville de Butembo est de 71,91 km. La figure 1.5 présente la carte de la ville de Butembo.

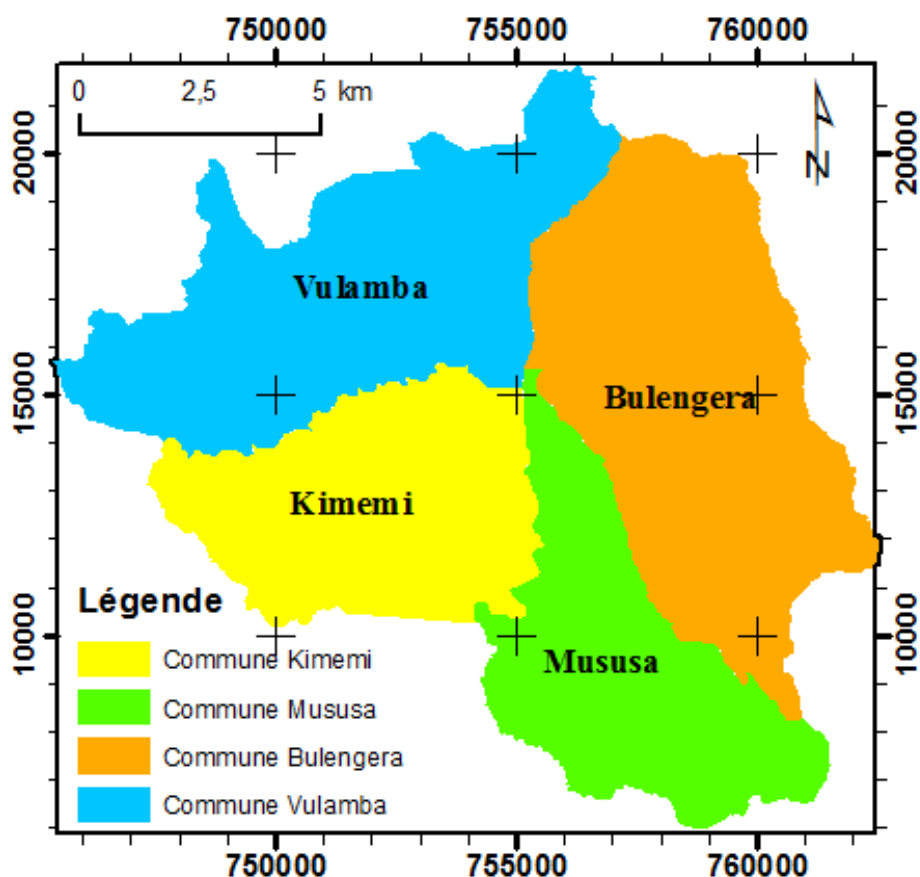


Figure 1.5. Carte de la ville de Butembo et ses quatre communes.

Tableau 1.1. Superficies et périmètres de la ville de Butembo et de ses communes

N°	Commune	Surface planimétrique [km ²]	Surface topographique [km ²]	Périmètre [km]
1	Bulengera	48,89	50,18	39,65
2	Kimemi	30,28	31,76	28,51
3	Mususa	29,25	31,79	38,05
4	Vulamba	43,58	45,22	43,58
Total		152,00	158,95	

Ces quatre communes sont subdivisées en quartiers ceux-ci en cellules. L'organisation administrative est présentée en ANNEXE I.

La figure 1.6 présente la carte du relief de la ville de Butembo qui a servi pour calculer la surface topographique de la circonscription urbaine.

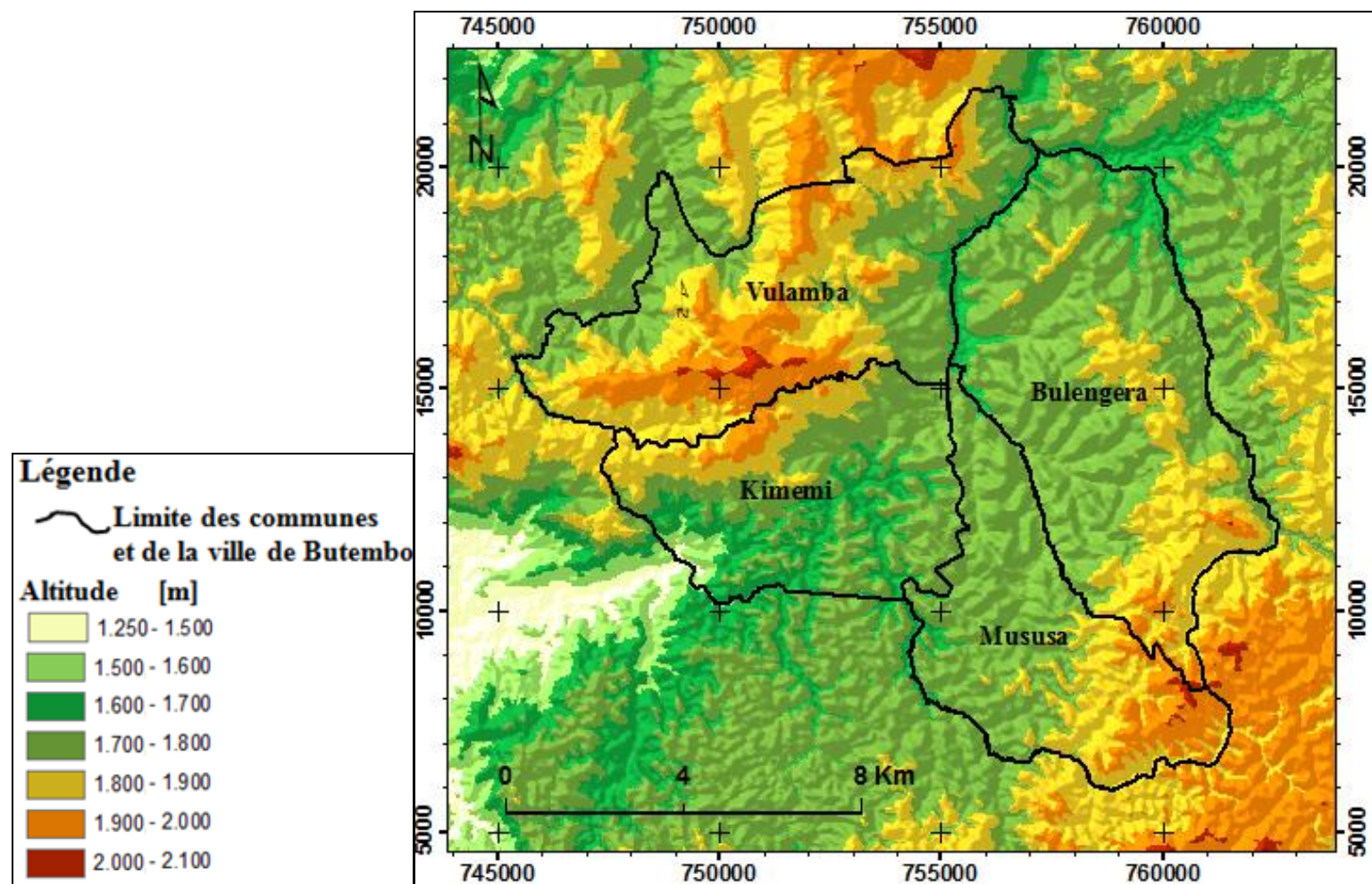


Figure 1.6. Relief de la ville de Butembo.

La figure 1.7 présente la carte de la ville de Butembo avec quelques points de repère et les principaux axes routiers facilitant la localisation et l'orientation.

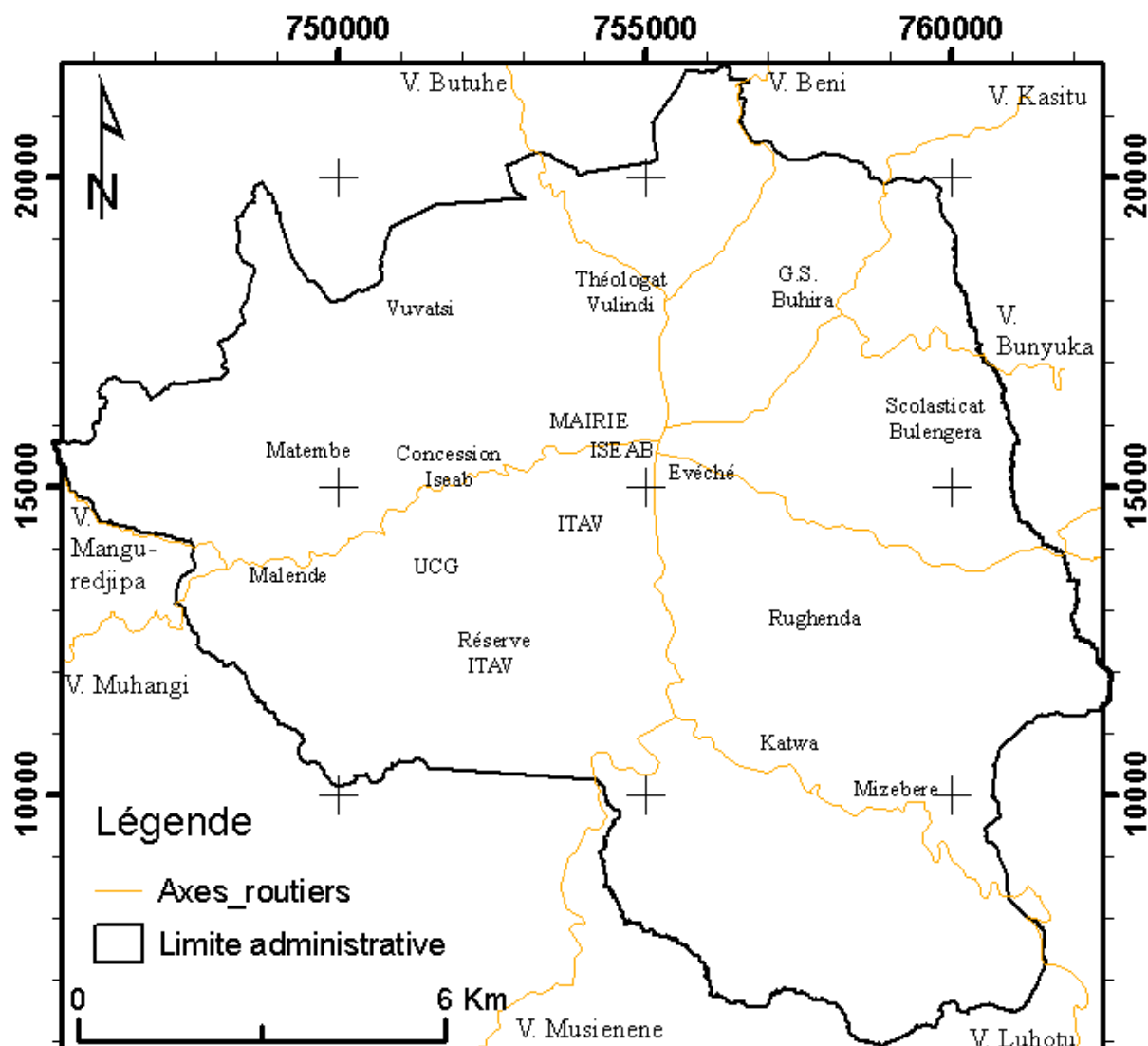


Figure 1.7. Carte de la ville de Butembo avec les principaux axes routiers et quelques points de repère.

1.3.2. Analyse comparée de l'évolution de la trame urbaine et de l'anthropisation de la zone urbaine de Butembo

1.3.2.1. Dynamique du développement urbain à Butembo

1.3.2.1.1. Population et zone urbanisée

Cité indigène créée depuis 1949, Butembo est une agglomération urbaine qui connaît un développement impressionnant et une progression spectaculaire caractérisée par une forte anthropisation. La population est passée de 9 653 en 1957 à 581 449 habitants en 2008, soit un taux d'accroissement annuel moyen de 8,37%.

Le tableau 1.2 récapitule les données chiffrées relatives à la dynamique du développement urbain en relation avec l'accroissement de la population en ville de Butembo de 1957 à 2008. L'attention est focalisée sur les périodes qui coïncident avec les données spatiales disponibles. Toutefois, l'intégralité des données démographiques entre 1957 et 2008 est présentée en ANNEXE IV au moins pour les années où les informations spatiales sont disponibles. La démographie est ensuite détaillée par commune et par catégorie d'âge et de sexe.

On constate que ces accroissements varient différemment selon les époques, certaines ayant été fort marquées par cette anthropisation. De 1957 à 1975, la population est passée de 9 653 à 50 921, soit un taux d'accroissement annuel de 9,67%. Entre 1975 et 1987, la population n'a que faiblement augmenté, avec un taux d'accroissement annuel moyen de 1,4%. En revanche, entre 1987 et 2001, le taux de variation annuelle moyen s'est élevé à 11,47%. Entre 2005 et 2006, ce taux d'accroissement moyen de la population est redevenu de 2,22% alors qu'il s'est élevé à 3,84% entre 2006 et 2008.

Lorsqu'on veut se rendre compte de la concentration de la population à l'intérieur même de la zone urbanisée, il convient de souligner que le taux de variation annuelle de la population au sein de celle-ci est très spectaculaire en 2001. En effet, ce taux de variation s'élève à 11,47% entre 1987 et 2001. Il y a lieu d'évoquer la conjonction de deux événements quasi-diamétralement opposés, mais concourant tous deux à l'afflux des populations vers la ville de Butembo. Les premières périodes des années 90 sont marquées par le boom de l'essor économique de Butembo (Kitakya, 2007) ; le milieu urbain attira vers lui des masses de populations, les unes attirées par le mirage urbain, les autres pour se frayer des ouvertures vis-à-vis de l'emploi en ville. Paradoxalement, la dernière moitié des années 90 voit cet engouement s'amplifier suite à l'insécurité infligée à la région par une succession de guerres dites de libération.

Notons en guise d'illustration qu'en 2001, les constructions des maisons ne pouvant plus suivre le rythme de l'afflux massif des populations vers le centre urbain, les concentrations de populations dans les ménages d'accueil ont atteint un niveau jamais connu au sein de la ville.

En outre, entre 2000 et 2004, les matériaux de construction (tôles, ciment, fer à béton, clous...) n'étaient presque pas taxés à la douane de Kasindi (frontière avec l'Uganda) contrée

à cette époque gérée par le RCD/KML (Rassemblement Congolais pour la Démocratie, Kisangani, Mouvement de Libération). Les prix de ces matériaux ayant très sensiblement été rabattus ont stimulé des nouvelles constructions. Des vastes étendues de terre ont accueilli des maisons. La figure 2.5 présente Musimba au Sud-Ouest de la ville et Kikurura à l'Est où des nouvelles tôles témoignent d'un accroissement considérable de la surface bâtie.

Intuitivement, des sensations d'une concentration intense de la population dans la ville faisaient l'objet des conversations. Disposant de l'image ETM+ de LANDSAT de 2001 et de la population en cette année, nous avons calculé la densité de population de 10753 habitants/km² en nous référant seulement à la zone urbanisée qui est de 39,51 km² pour une population de 424 850 habitants. Cette valeur est dissimulée par la valeur moyenne de la densité de la population de la ville de Butembo en 2001, qui est de 2 795 habitants au km² en prenant en compte toute la circonscription administrative dont la superficie planimétrique calculée est de 152 km².

Cette croissance rapide de la population a induit une transformation profonde du paysage à des vitesses et selon des formes d'évolution allant au-delà des prévisions possibles. Il est donc quasi impossible, dans ce contexte, que les moyens conventionnels d'analyse puissent permettre un suivi pour rendre compte efficacement de ce rythme d'évolution et d'avoir une vue actualisée de l'organisation de l'espace urbain. C'est pourquoi, nous avons recouru à l'imagerie satellitaire, un outil incontournable, qui nous a permis de mettre en évidence, sur base d'une analyse diachronique échelonnée sur un peu plus d'un demi-siècle, la caractérisation de l'occupation de l'espace en zone urbaine de Butembo.

Tableau 1.2. Caractéristiques de la croissance spatiale et démographique par période considérée à Butembo.

Année	Superficie de la zone urbanisée [Km ²]	Population de Butembo	Proportion zone urbanisée/zone administrative [%]	Taux de variation zone urbanisée [%]	Densité de population en zone urbanisée [Effectif/km ²]	Taux de variation densité de population en zone urbanisée [%]	Densité de la population/zone administrative [Effectif/km ²]	Taux de variation population/zone administrative [%]
1957	2,39	9653	1,57		4489		63	
1975	7,38	50921	4,85	6,40	6899	2,42	335	9,67
1987	19,03	92932	12,5	8,18	4891	-1,89	611	1,40
2001	39,51	424850	26,0	5,36	10753	21,77	2795	11,47
2005	56,64	527684	37,3	9,42	9316	-3,52	3471	5,57
2006	80,18	539277	52,8	18,98	6725	-6,92	3547	1,09
2008	85,83	581449	56,5	3,46	6774	0,36	3825	7,82



Figure 1.8. Nouvelles surfaces bâties entre 2001 et 2007 dans la ville de Butembo reconnaissables par les tôles nouvelles brillantes. a). Musimba à l'Ouest; b). Axe Mukuna-Kikurura-Kakuva à l'Est de la ville.

La figure 1.9 présente la mise en échelle commune pour faciliter la comparaison visuelle de l'emprise urbaine de la ville de Butembo de 1957 à 2008 alors que la figure 1.10 illustre cette dynamique au fil du temps de 1957 à 2008. Cette augmentation de la population a eu une incidence sur l'expansion spatiale dans le temps d'une superficie successive de 2,39 km² en 1957, 7,38 km² en 1975, 19,03 km² en 1987, 39,51 km² en 2001, 56,64 km² en 2005, 80,18 km² en 2006 et 85,83 km² en 2008 (Fig. 3.8).

En général, de 1957 à 2008, la surface urbanisée a subi un accroissement moyen de l'ordre de 7,27% annuellement. Différentes époques ont été affectées par cet accroissement rapide de la zone urbanisée de façon distincte. Entre 1957 et 1975, la surface urbanisée s'est accrue à un taux annuel de l'ordre de 6,40%. Entre 1975 et 1987, le taux d'accroissement annuel moyen était de l'ordre de 8,18%. Entre 1987 et 2001, le taux d'accroissement annuel moyen était de l'ordre de 5,36%. Entre 2001 et 2005, ce taux d'accroissement annuel moyen était de l'ordre de 9,42%. Entre 2005 et 2006, en une année, le taux d'accroissement a atteint sa valeur maximale équivalente à 18,98%. On note cependant une quasi-stabilité entre 2006 et 2008 où le taux d'accroissement annuel moyen était de 3,46%.

Avec cet accroissement rapide de la population, la trame urbaine n'a fait que subir l'effet de l'anthropisation. Il faut noter que le contexte des élections a fort marqué la région pendant cette période. Le vote était fait dans sa circonscription d'origine essentiellement et le retour de l'accalmie, bien qu'éphémère, aurait joué un rôle prépondérant dans cette volonté de toujours occuper l'espace.

Le tableau 1.3 récapitule les taux moyens de variation annuelle de la population en ville de Butembo et le taux d'accroissement moyen annuel de la surface urbanisée.

Tableau 1.3. Taux moyen de variation annuelle de la population et taux d'accroissement de la surface bâtie de la ville de Butembo entre 1957 et 2008.

Période	Variation annuelle moyenne de la population [%]	Taux d'accroissement moyen annuel de la surface urbanisée [%]
1957-2008	8,37	7,27
1957-1975	9,67	6,4
1975-1987	1,4	8,18
1987-2001	11,47	5,36
2001-2005	5,57	9,42
2005-2006	1,09	18,98
2006-2008	7,82	3,46

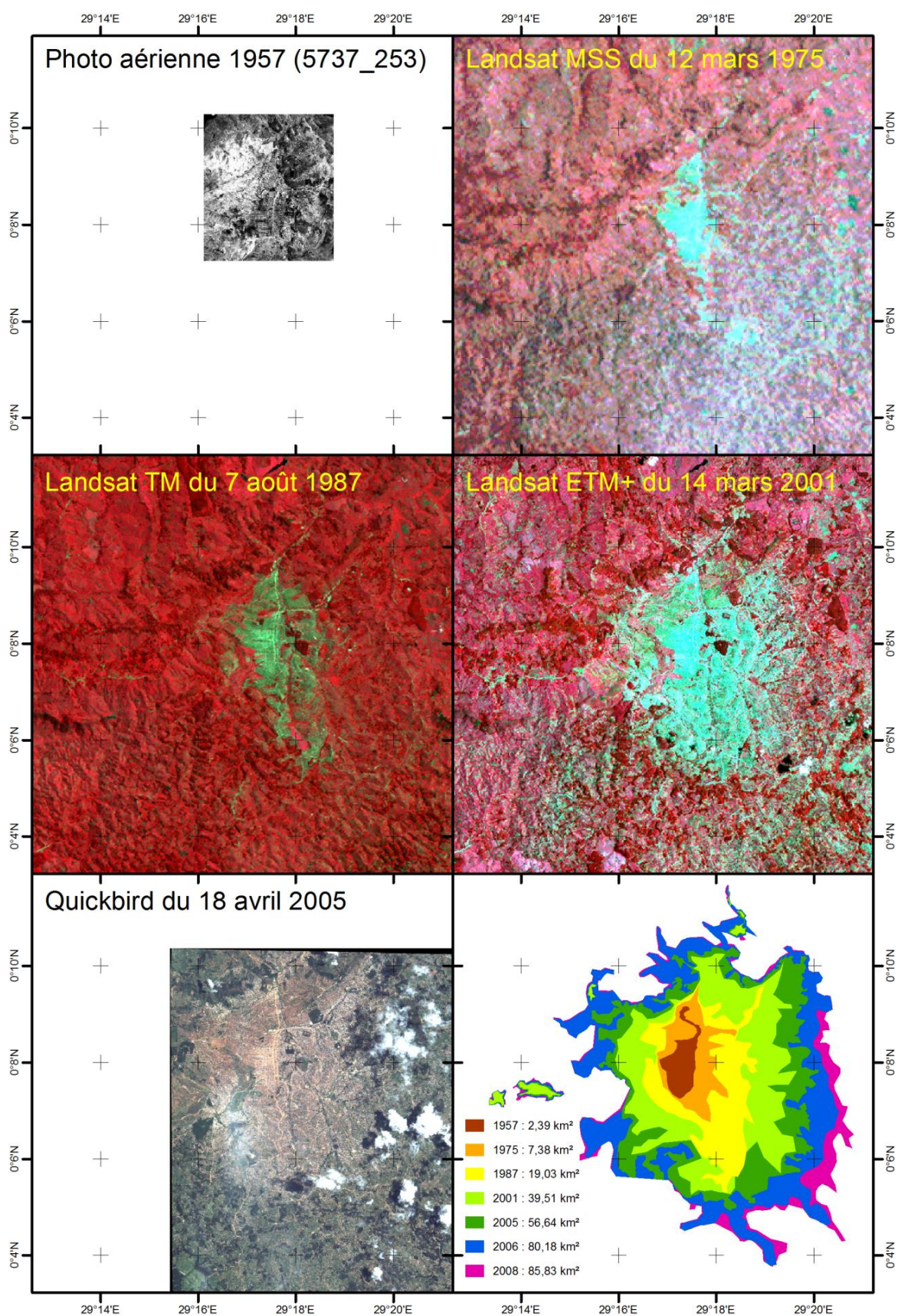


Figure 1.9. Evolution de l'emprise urbaine de la ville de Butembo de 1957 à 2008

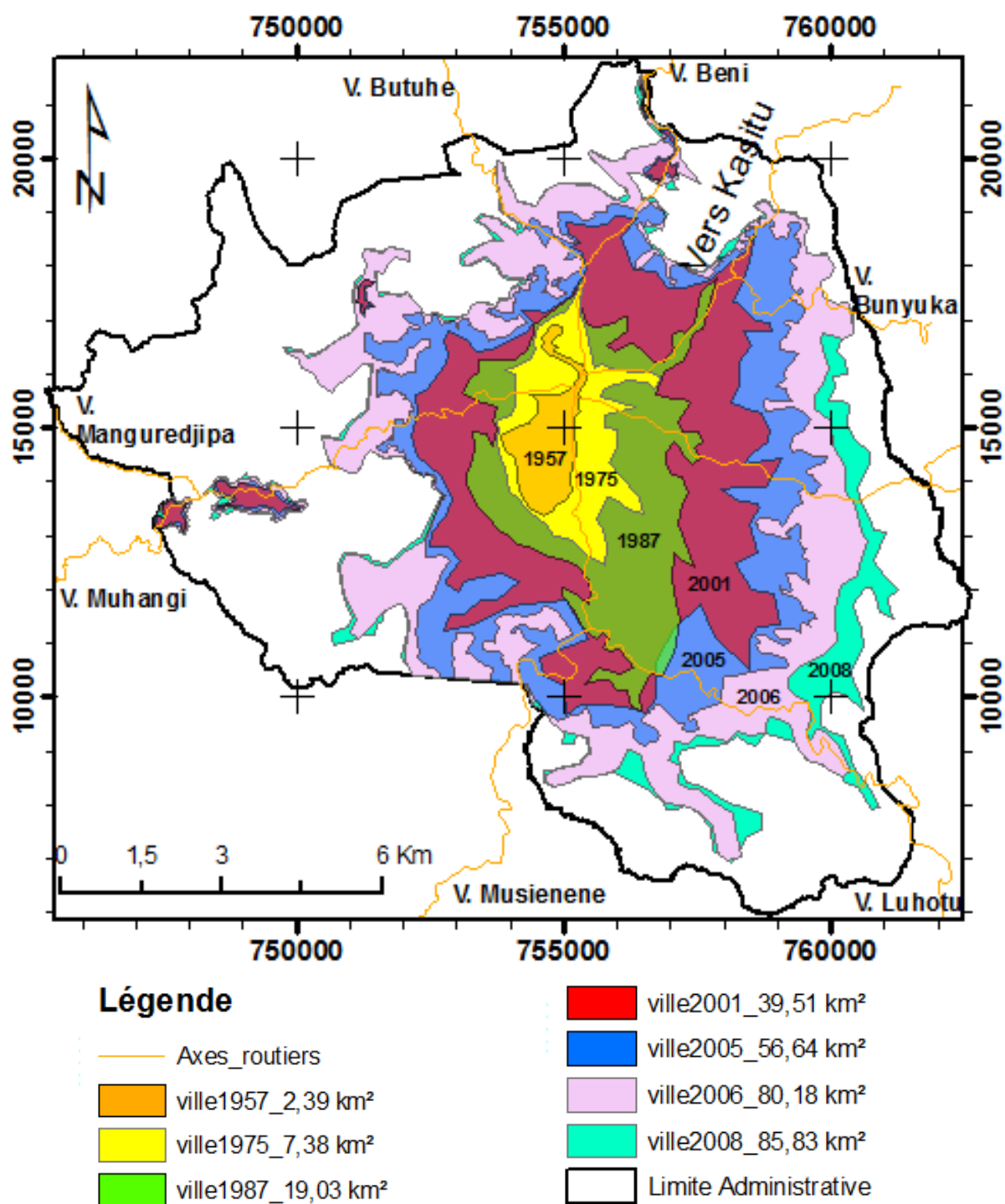


Figure 1.10. Evolution de l'emprise urbaine de la ville de Butembo de 1957 à 2008

1.3.2.1.2. Le bâti urbain de Butembo

La densification du bâti urbain de la ville de Butembo est présentée à la figure 1.11. On sait reconnaître sur la figure 1.11: 1) la concession de l'ITAV (Institut Technique Agricole

et Vétérinaire), 2) le lieu-dit boisement de Kitambala connu sous le nom de Dada, 3) le boisement de Cafékit vers Muchanga, 4) le lieu-dit boisement de Vulindi au Théologat, 5) la concession de l'UCG et 6) la concession de Katwa.

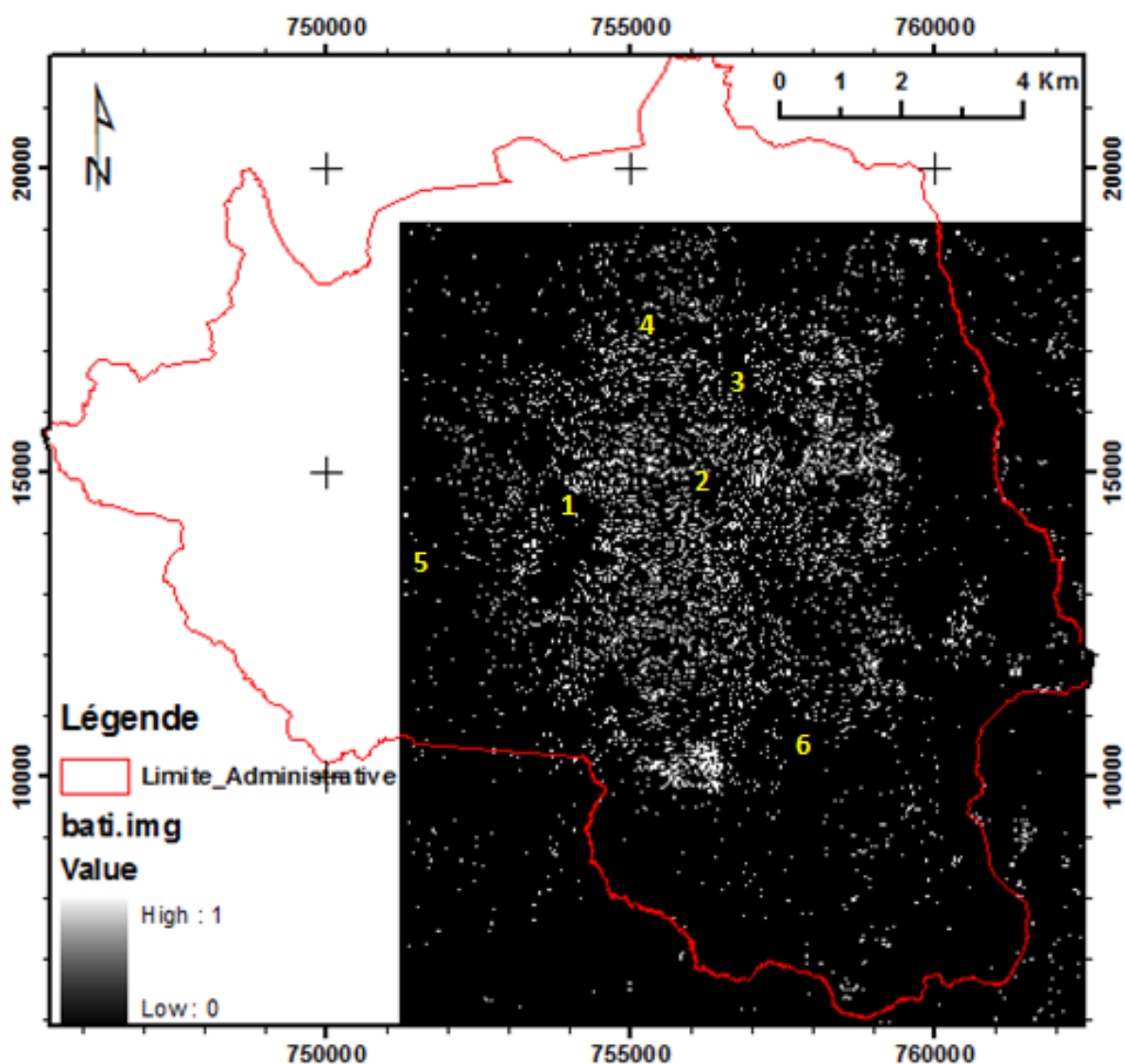


Figure 1.11. Bâti urbain de la ville de Butembo en 2005.

Partitionnement de l'image Quickbird du 18 avril 2005 (panchromatique et mutlispectrale) pour mettre en évidence le bâti urbain (non-bâti = zone noire ; bâti = tache blanche)

1.3.2.1.3. Relation entre l'évolution de la population urbaine et de la surface urbanisée

La figure 1.12 illustre la relation entre l'évolution de la population et de l'emprise urbaine.

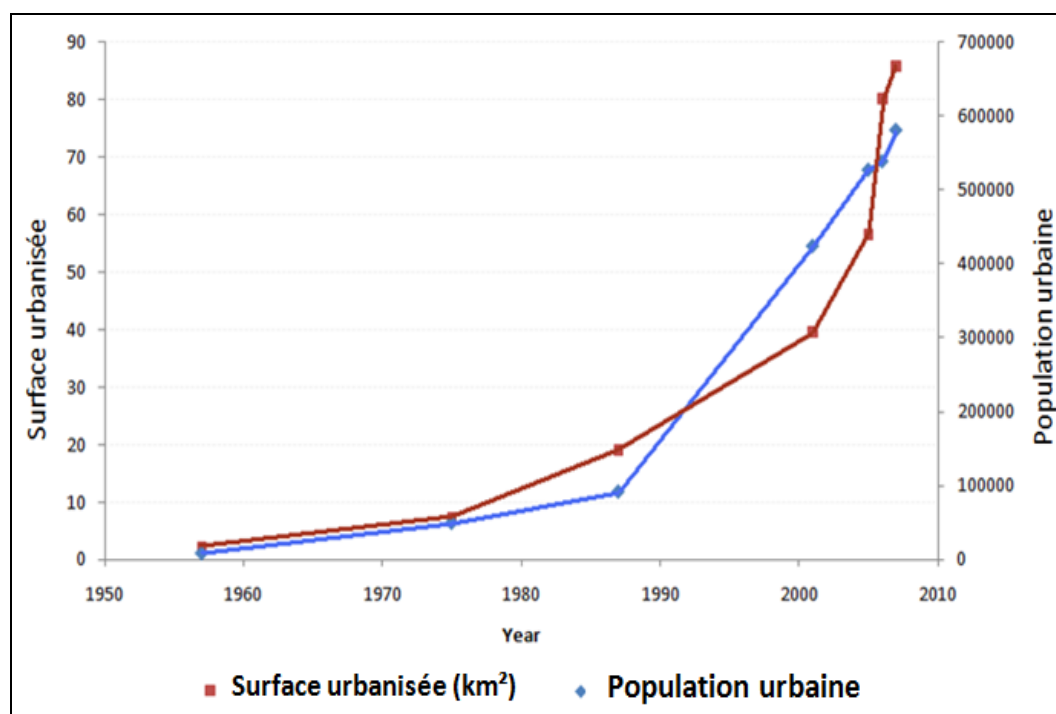


Figure 1.12. Relation entre l'évolution de la population et l'emprise urbaine de la ville de Butembo.

Depuis les années 1957 jusqu'en 1975, il s'établissait un équilibre dynamique entre l'accroissement de la population et la surface urbanisée (Figure 1.12). A partir de cette période, la surface urbanisée s'est accrue très sensiblement probablement suite à la demande de terres. La population a continué à s'accroître tout en restant relativement inférieure au taux d'accroissement de la trame urbaine jusque vers les années 1994. Après cette époque, l'anthropisation s'est amplifiée avec une concentration de la population dans les zones habitées. Ceci corrobore, l'afflux massif des populations rurales vers la ville et le souci de profiter du boom de l'essor économique qui a caractérisé la ville vers les années 1990 (Kitakya, 2007). Une situation malheureuse, liée aux multiples conflits qui n'ont cessé d'endeuiller la région, n'a fait qu'accélérer cet afflux massif de population vers l'année 1996, suite aux premières guerres dites de libération. Ensuite, les années 1998 à 2000 caractérisant une période d'une vague de seconde guerre ont rendu cette situation assez complexe. Une multitude de déplacés des guerres qui étaient accueillis dans beaucoup de ménages d'accueil et des associations humanitaires a conduit à une densification spectaculaire à l'intérieur de la zone urbanisée. Les zones reconnues vulnérables et peu appréciées (marécageux et ancien dambo, inondable, pente abrupte) où les prix de parcelles sont accessibles à toute bourse ont connu un afflux massif des nouveaux habitants. C'est notamment dans la vallée de la Wayimirya, les pentes fortes vers Kangote. Le Quartier Vukondi au sud de la ville,

nouvellement créé et empiétant sur des terres agricoles fertiles et des zones boisées, a progressé de façon exponentielle avec des répercussions sur l'environnement. En 2006, après les élections, une accalmie a poussé certaines personnes de regagner les milieux d'origine, ce qui a permis à la ville de se déconcentrer de la masse populaire qui venait d'élire domicile à l'intérieur, ainsi qu'aux extrémités de la ville.

1.4. Conclusions partielles

L'outil SIG est bien indiqué pour produire les cartes et décrypter de façon diachronique l'évolution de la trame urbaine. En intégrant des photographies aériennes (1957) et d'autres images satellitaires géoréférencées issues de SPOT (1987, 2004, 2006 et 2008), QUICKBIRD (2005), ASTER (2006), LANDSAT (MSS (1975), TM (1987) et ETM+(2001)...), cet outil a permis d'établir sur des bases scientifiques la carte de la ville de Butembo ainsi que l'emprise urbaine acquise au fil du temps pour reconstituer son histoire et révéler les formes anciennes et nouvelles. Il a permis notamment de calculer la surface topographique de la ville de Butembo qui est établie à 158,95 km².

L'effet lié à l'afflux massif des réfugiés a rompu brusquement l'équilibre dynamique qui s'établissait entre le taux d'évolution de la population et le taux d'accroissement de l'urbanisation à Butembo. On peut donc penser qu'avant l'arrivée des réfugiés, les deux composantes (territoire urbain et population urbaine) évoluaient proportionnellement sans que l'une puisse prendre le dessus sur l'autre (Fig. 1.12). Après l'accalmie, le rapport entre l'évolution de la population et la surface urbaine est en train de se reconstituer. La courbe laisse croire actuellement au retour à la situation proportionnellement stable. Autrement, l'infrastructure de la ville était insuffisante pour héberger adéquatement les nouveaux venus et dès lors que la population est rentrée dans son lieu d'origine, on se rend compte que la proportion qui se présentait avant se réinstalle de nouveau dans un équilibre dynamique compatible avec la capacité d'accueil.

La population est passée de 9 653 en 1957 à 581 449 habitants en 2008, soit un taux d'accroissement annuel moyen de 8,37%. On note des faibles taux d'accroissement moyen annuel pour la période allant de 1975-1987 ; 2005-2006 et 2006-2008 respectivement de 1,4% ; 2,22% et 3,84%. En revanche entre 1987 et 2001, la ville de Butembo a connu un taux d'accroissement moyen annuel exceptionnel de l'ordre de 11,47% suite d'une part, au boom

de l'essor économique qui a caractérisé la ville de Butembo, le début des années nonante, et d'autre part, surtout par l'afflux massif des populations déplacés fuyant les guerres aboutissant à un doublement de la population sur le territoire urbain pendant à un court laps de temps dans la deuxième moitié des années nonante.

Cette croissance rapide de la population a induit une transformation profonde du paysage à des vitesses et selon des formes rendant quasi-impossible le suivi de l'évolution de la vue actualisée de l'organisation de l'espace urbain sans recourir à l'imagerie satellitaire. Par la télédétection couplée à des vérités terrain, nous nous sommes rendu compte que l'emprise urbaine est passée de 2,39 km² en 1957 à 85,83 km² en 2008, soit un taux d'accroissement moyen de l'emprise urbaine de l'ordre de 7,27% annuellement. En revanche, entre 2005 et 2006, en une année, le taux d'accroissement a atteint sa valeur maximale équivalente à 18,98%, mais s'est rétabli ensuite entre 2006 et 2008 pour atteindre 3,46%. La période 2005-2006 coïncide avec la diminution très sensible du prix de matériaux de construction entre 2002 et 2004 qui a poussé un effectif important de la population d'investir dans la construction des maisons, ce qui a abouti à un accroissement exceptionnel de l'emprise urbaine.

Comprendre cette dynamique en vue de pouvoir contribuer activement à la gestion de cet espace déjà menacé par des risques environnementaux diversifiés revient à apporter une réponse quantitative et spatialisée, gage d'une intervention raisonnée touchant à la cible.

Chapitre deuxième

Cadre physique et contexte phytosociologique

Chapitre II : Cadre physique et contexte phytosociologique

2.1. Cadre physique

2.1.1. Contexte oro-hydrographique

Le relief de la contrée dans laquelle se trouve la ville de Butembo résulte de l'orogénèse tertiaire concomitante à la formation du fossé tectonique albertin. Il est disséqué et collinaire avec des roches métamorphiques et granitiques datant de l'Antécambrien (Lepersonne, 1949). Il comprend trois grands ensembles géomorphologiques. Le premier comprend la vallée de la rivière Kimemi. Cette zone constitue le centre ville. Le deuxième ensemble est constitué des collines constituant l'axe Matembe-Vulamba à l'Ouest de la ville. Le troisième ensemble géomorphologique de Butembo est constitué des collines convexes plus basses à l'est de la Kimemi sur l'axe Katwa-Rughenda-Mukuna-Mavono. Le relief de la ville de Butembo est présenté à la figure 1.6. Ce relief peut être visualisé facilement en faisant l'estompage du MNT. La figure 2.1 présente l'estompage du MNT pour illustrer le relief de la ville de Butembo avec une exagération de 3.

L'encaissement des vallées dans les collines environnantes excède par endroit 50 m avec des fortes pentes par endroit. On remarque, cependant, de nombreuses vallées à fond plat, large, marécageux, bloquées à l'aval par un seuil notamment à Mususa sous le pont menant vers Nduko et Musimba et sous le pont de Biasa. La densité moyenne du réseau hydrographique dense épouse des linéaments bien marqués. Tous les vallons débutent à l'amont par une forme en hémicycle très caractéristique où se développent des cirques d'érosion. Les versants ont un profil convexo-concave, mais au niveau du centre ville, le profil transversal est nettement en « berceau », avec un fond alluvial presque plat et un raccord colluvial concave à faible pente

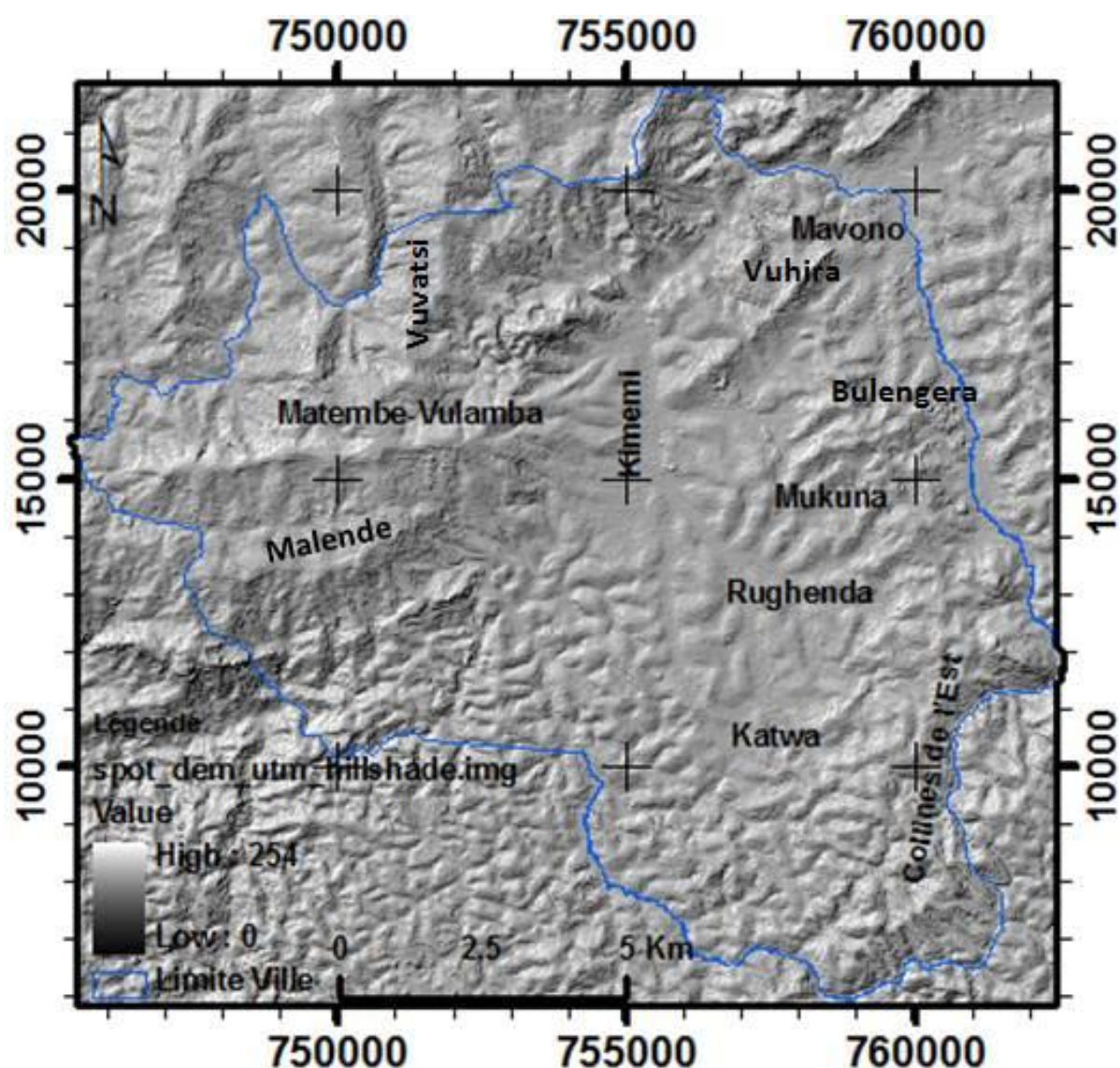
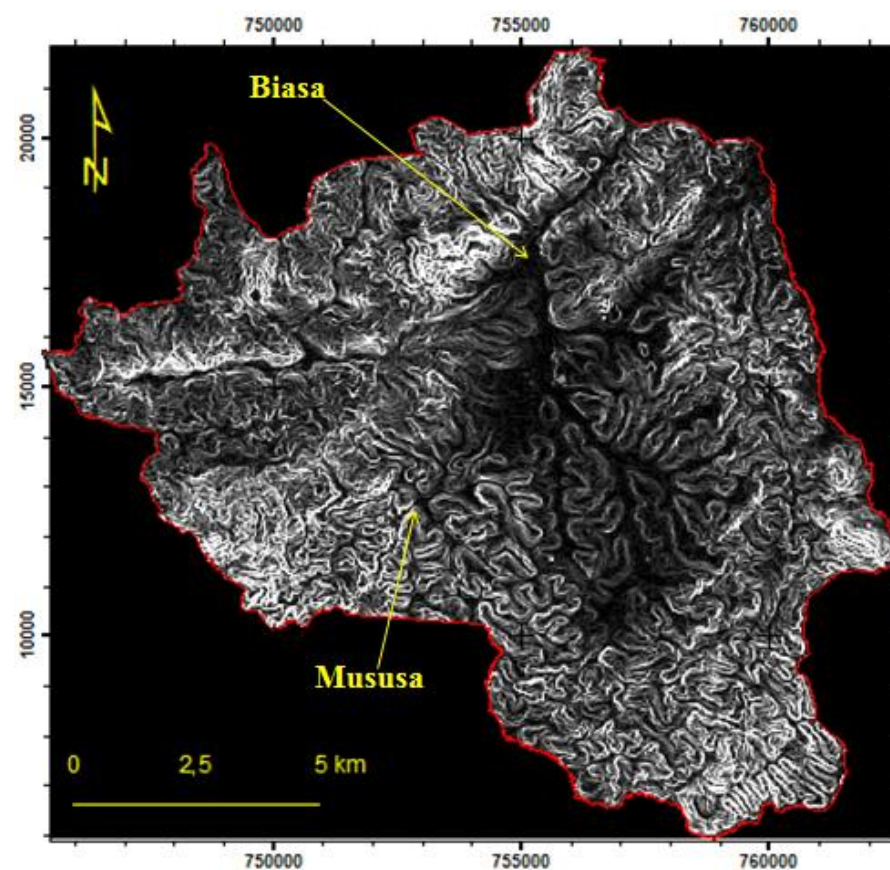


Figure 2.1. Relief de la ville de Butembo illustrée par l'estompage du MNT.

La figure 2.2 présente les pentes de la ville de Butembo. Elles varient entre 1 et 61°. Plus la couleur est blanche, plus la pente est élevée. Autrement dit, la couleur sombre symbolise des zones dont les pentes sont les plus faibles. La figure 2.3 illustre l'orientation des pentes de la ville de Butembo. Elle est accompagnée des thalwegs qui constituent les points géométriques les plus bas des vallées.



Légende

Limite Administrative

spot_dem_utm_pentedege_ville.img

Value

High : 61

Low : 1

Figure 2.2. Pentés de la ville de Butembo

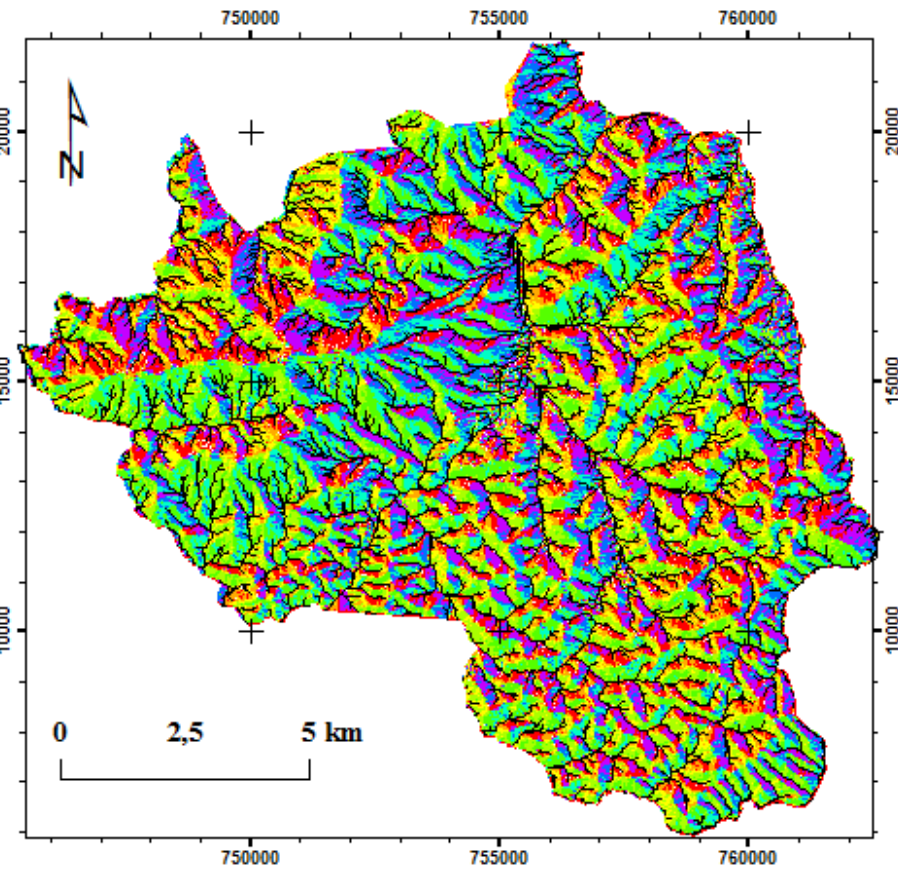


Figure 2.3. Orientation des pentés et thalwegs de la ville de Butembo

Légende

Thalwegs

spot_dem_utm_orient_ville.img

<VALUE>

N

S

NE

SW

E

W

SE

NW

2.1.2. Contexte géologique et lithologique

Le substrat géologique de Butembo est très fragile et sensible à l'érosion (Jongen, 1970; Kasay, 1988 ; Vyakuno, 2006). Les soubassements des roches du socle précambrien ont subi les plissement au cours du Paléozoïque (Asselberghs, 1939), et les intrusions récentes des granites seraient influencées par des mouvements orogéniques (Asselberghs, 1939; Lepersonne, 1949; Pécrot *et al.*, 1962).

Quatre principaux types de roches sont rencontrés dans la ville de Butembo et peuvent être décrits du Nord-Ouest au Sud-Est (Fig.2.4).

- Complexe basique de la Luhule-Mobisio : Il se trouve autour de la Mubunge. Il est formé de metabasaltes, de dolérites, de diorites et d'îlots de quartzites (Département des Mines, 1981).
- Assise sédimentaire de la Luhule-Mobisio : elle est composée de schistes, de quartzites avec des intercalations calcaires. Ces schistes datent du Burundien inférieur et moyen, c'est-à-dire d'environ $1\,235 \pm 40$ Ma (Rossi, 1980 ; 1984). Ces schistes, de couleur sombre et facilement détachables en plaquettes, intercalés d'importants bancs de quartzites sont sains sur des interfluvés et altérés au bas des collines et dans les vallées. Ils sont très remarquables en bas de pente de la colline de Lwamiso et sur les collines situées à l'Ouest de la Kimemi. Ils constituent le plancher de cette rivière sous le pont de Biasa.
- Complexe orthognéissique : il est constitué d'un ensemble de granites et de granodiorites laminés et retromorphosés, parfois orthogneiss et migmatites homogènes. Ce complexe date de l'Antékibalien ou du Kibalien inférieur. Le Kibalien inférieur date d'environ 2 800 Ma (Cahen, 1954 et B.R.G.M., s.d.). Ils sont situés au centre et à l'est de la ville. Une bonne partie du territoire urbain est bâtie sur ce complexe orthognéissique.
- Série de Lubero : elle est constituée de micaschistes avec des intrusions granitiques, des phyllades, des schistes, des grès et des quartzites qui datent du Burundien inférieur. Ces roches sont situées à l'est de la ville ;

La figure 2.4 présente la carte géologique de la ville de Butembo.

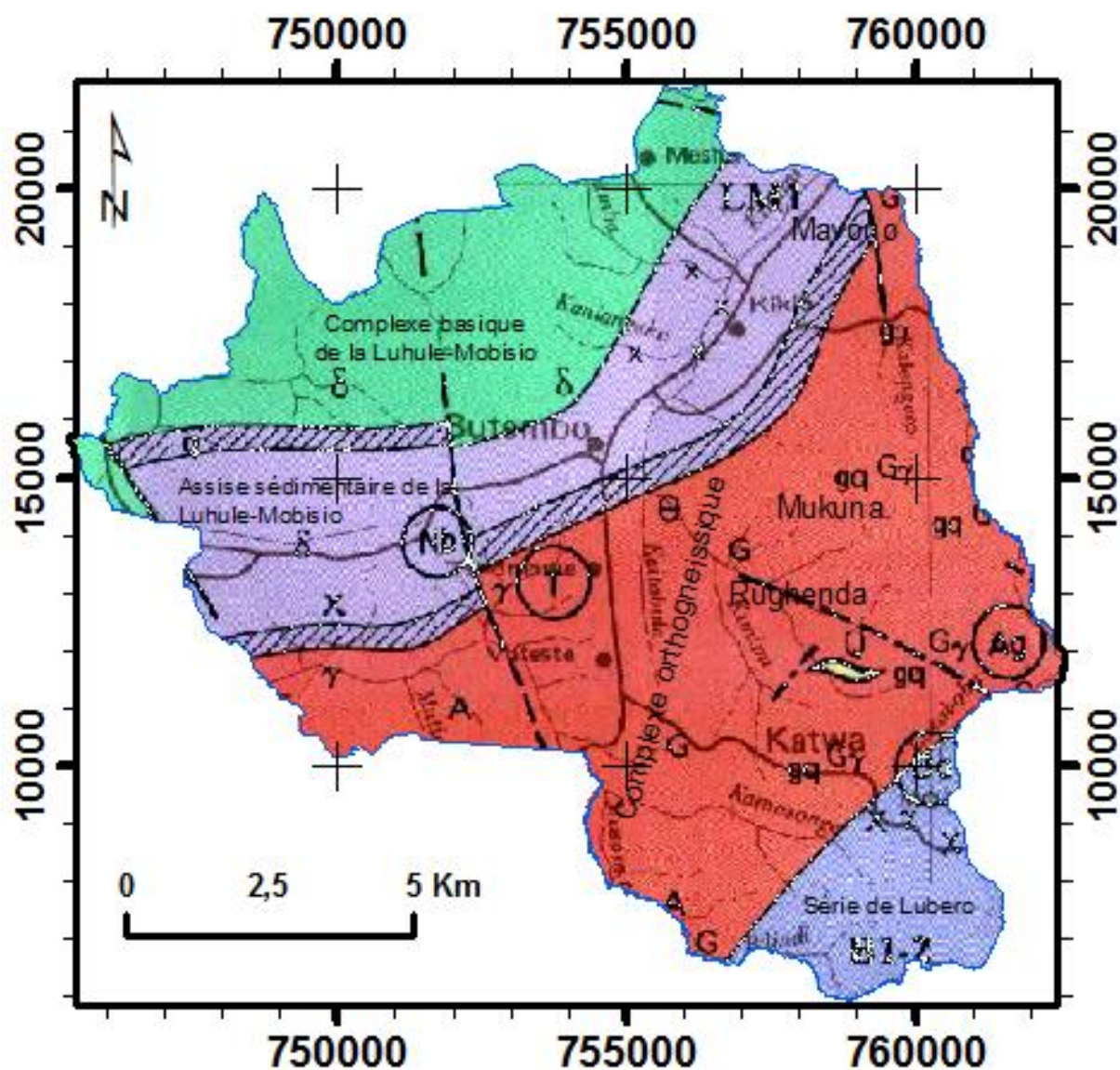


Figure 2.4. Carte géologique de la ville de Butembo

Source : Adaptation de la carte géologique faite par B.R.G.M. s.d. *Carte géologique du Haut-Zaïre méridional et de Beni-Lubero*. Echelle : 1/ 500 000. Paris : Imprimerie Maquet. Dépôt : Cartothèque du MRAC (Musée Royal de l'Afrique Centrale).

La légende de cette carte est présentée à la figure 2.5.

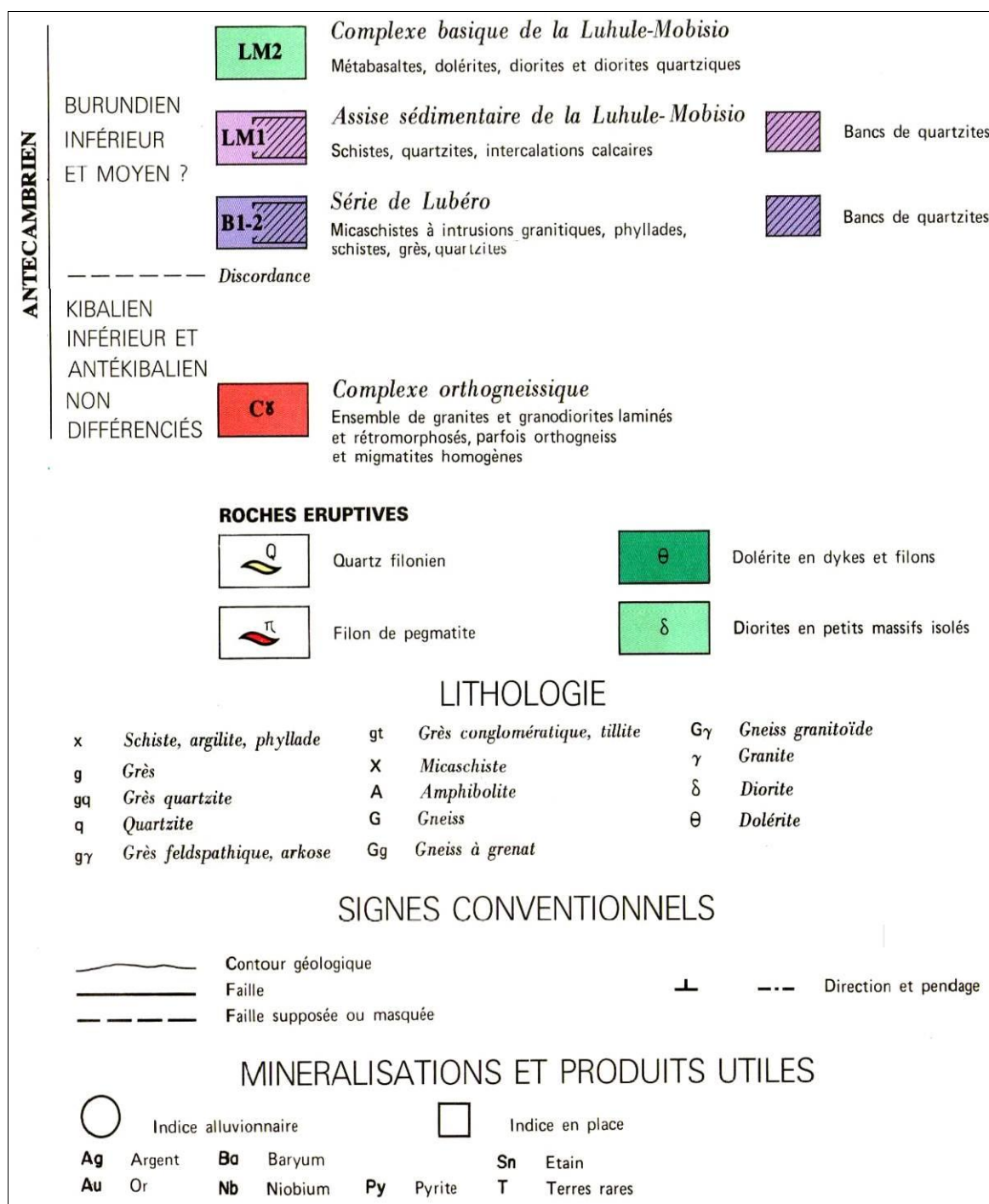


Figure 2.5. Légende de la carte géologique de la ville de Butembo

La figure 2.6 illustre quelques unités lithologiques rencontrées dans la ville de Butembo aussi bien dans les vallées que sur les crêtes de collines surplombant le territoire urbain.

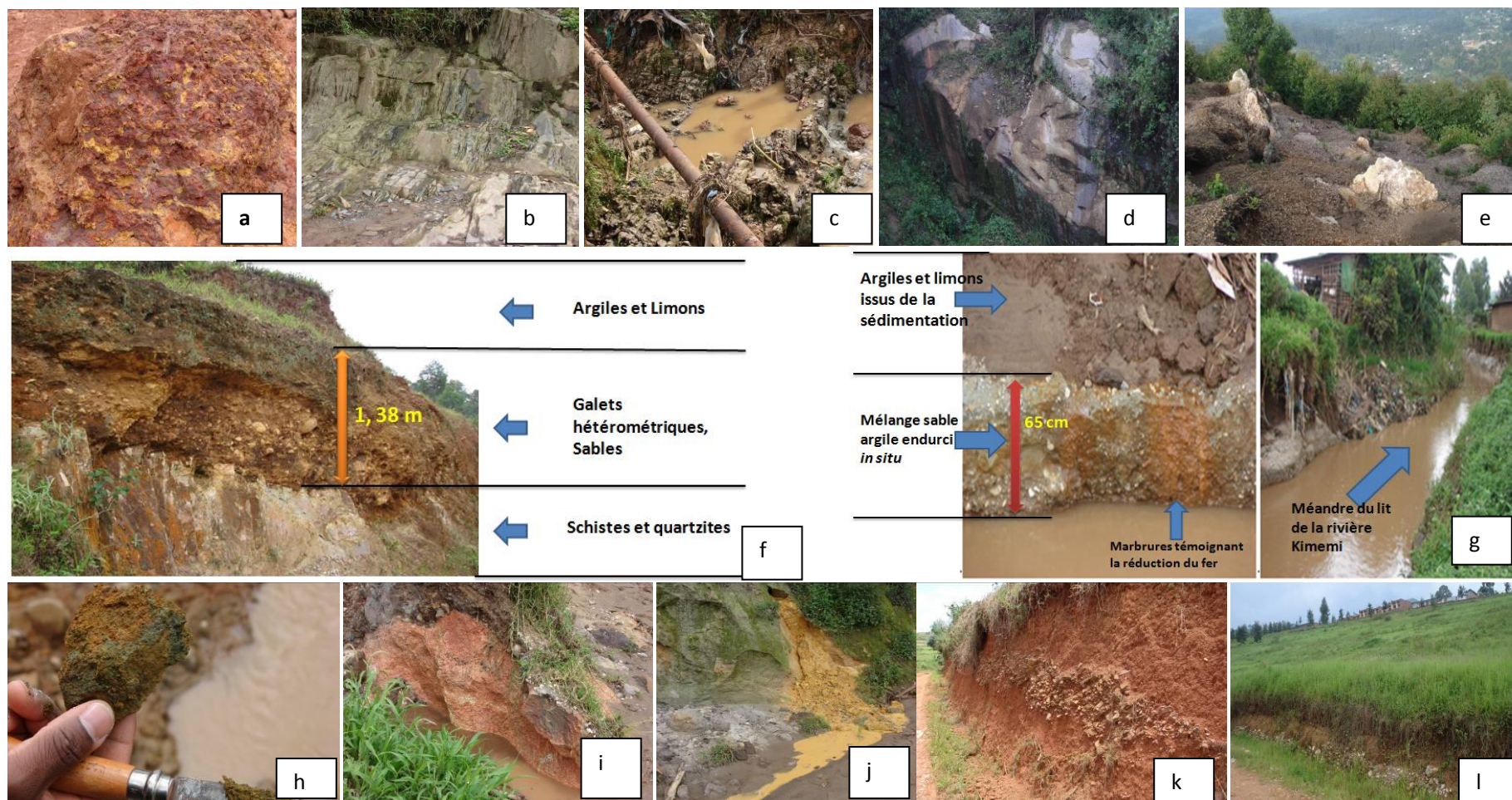


Figure 2.6. Quelques unités lithologiques : a). Concrétions ferrugineuses avec intercalation des metabasaltes à l'ouest de la ville sur l'axe Malende-Vuvatsi ; b). Schistes intercalés de quartzites à Lwamiso ; c). Bancs quartziques avec intercalation des schistes au niveau du plancher de la rivière kimemi à Biasa ; d). Complexe orthognéssique à l'est de la ville à Bulengera ; e). Bancs quartziques sur la crête de la colline de Vuhira juste avant la faille ; f). Terrasse fluviale à la rive gauche de la Kimemi au niveau de la briqueterie de la Procure témoignant d'une reprise des écoulements et d'un transport énergétique plus actif ; g). Stratification des dépôts issus de la sédimentation lente avec des signes d'oxydation du fer le long de la Kimemi à la latitude du centre pour handicapé ; h ; i ; j). Signe de gléyification avec des horizons bleuâtres, blanchâtres, pourpre et ocre jaune indiquant une évolution dans un contexte hydromorphe ; k). Stone line sur le talus de la route de l'Horizon ; l). Galets centimétriques dans une zone d'atterrissement dans la vallée de Kikyo immédiatement située en amont de gorges resserrées jouant le rôle d'entonnoir et bloquant les charges fluviales.

2.1.3. Morphotectonique et failles

Les montagnes surplombant la ville de Butembo à l'Est, jouxtent le *rift albertin* qui borde tout le pays à l'Est et qui fait partie d'un immense système de fossés tectoniques, qui constituent des régions déprimées, bordées par des failles radiales (Furon, 1960) et normales à certains endroits. Les activités tectoniques qui ont commencé il y a 12 à 13 Ma (Cahen, 1954) sont restées actives (Joly, 1997). Elles sont influencées par des dômes granitiques à partir desquels s'ordonne la structure.

Sur le territoire urbain, on observe une succession relativement simple de plis orientés légèrement ENE-WSW excepté celui de Matembe dont l'orientation est E-W. L'affleurement des séries de quartzites du Burundien inférieur forme des crêtes de direction ENE-WSW à sommet plat parallèle à l'axe des plis. Sur l'axe Malende-Matembe-Vuvatsi, on remarque une sorte de cuirassement. Il s'agirait d'une cuirasse ferro-alumineuse d'origine pédologique, massive, parfois vacuolaire. Cette cuirasse très dure arme là où elle affleure. A Matembe on sait reconnaître des lanières de plateau très tabulaires à rebords abrupts et des versants concaves. Autour de Malende et de Vuvatsi, il est fréquent d'observer des cuirasses dérivées sur les versants ou à leurs pieds. Dans son ensemble, cette sorte de carapace présente un faciès vermiforme tel qu'il a été observé et décrit en Uganda par McFarlane (1983). Elle est composée de domaines ferrugineux d'un à plusieurs centimètres, de couleur brune, parcouru par des tubules connectés de diamètre centimétrique, remplis d'argile de couleur ocre-jaunâtre devenant progressivement rouge vers le sommet de l'horizon. Des quartz de taille millimétrique y sont dispersés. Des taches noires manganésifères s'individualisent au sein de domaines ferrugineux bruns. Les nodules rouge-violacé ont des limites diffuses mais souvent différenciés par une teinte plus claire jaune-orangé.

Le *rift albertin* a depuis longtemps été sujet à plusieurs tremblements de terre sévères de magnitude ≥ 6 sur l'échelle de Richter. Les plus puissants de ces séismes sont notamment ceux de Ruwenzori ou Toro du 20 mars 1966 et de magnitude 7,0 (Wafula, 2011). Ce tremblement de terre avait causé, en son temps, 144 pertes de vies humaines et plus de 1400 maisons détruites. Plusieurs autres tremblements de terre ressentis localement sont devenus réguliers. La station sismographique qui vient d'être installée à Butembo à 0°08'00 N ; 29°16'00 à 1720 m d'altitude, reposant sur des diorites, permettra de localiser avec précision les épicentres et révélera les failles qui ont été sollicitées.

Depuis le début de l'année 2007 plusieurs tremblements de terre viennent de se produire à Butembo, Beni et Bunia avec des conséquences visibles sur les bâtiments publics et privés. Compte tenu de la recrudescence des tremblements de terre ressentis dans le *rift albertin* on peut supposer que les mouvements sismiques pourront complexifier le problème des glissements de terrain et de ravinement. Compte tenu de la forte anthropisation de la contrée, il s'avère impérieux et urgent de cartographier les zones vulnérables où le développement humain et économique augmente d'une manière exponentielle. Le tableau 2.1 reprend les renseignements sur les tremblements de terres qui se sont produits dans les environs proches et ressentis dans la ville de Butembo. Ces informations sont communiquées par Kasereka Mahinda, vulcanologue de l'OVG (Observatoire Volcanologique de Goma). Les traits symbolisent des données manquantes.

Tableau 2.1. Quelques données relatives aux tremblements de terre ressentis en ville de Butembo.

N°	Date	Heure [GMT]	Latitude.	Longitude.	Profondeur [km]	Magnitude.	Région
1	11/05/2008	10 :34 :38.60	-	-	-	± 4.3	Butembo, Beni,..
2	12/03/2008	19 :07 :46.5	-	-	-	-	Butembo
5	19 -02-07	04 :34	-	-	-	5.7	Bbo,Beni,Bunia, Kilembe/Uganda
3	27/04/2006	02 :18	-	-	-	-	Beni et Bbo
4	22/01/2006	14 :18 :28	2.172°S	28.222°E	8	-	-
6	05/09/2005	6 :05 :38	0.286°S	29.643°E	17	-	Lac Edouard
7	03/08/2005	22 :02 :34	0°52.42S	29°14.72E	8	-	-
8	03/09/2005	06 :05 :38	0.172°S	29.386°E	8	≥3	Lac Edouard

Source : Communication de Kasereka Mahinda, Vulcanologue de l'OVG, Goma.

On se rend compte que les tremblements de terre sont devenus récurrents et les dates proches du 19 février 2007 feront l'objet d'une analyse dans le chapitre relatif aux glissements de terrain à travers la ville de Butembo car quelques mois après cette date, il y a eu réactivation du glissement de Kavitero. Mais ce phénomène s'est produit avec un retard. L'effet de retard du séisme sur les glissements de terrain a été analysé à Uvira (Weiss, 1959), à Bukavu (Munyololo *et al.*, 1999) et à Ruhengeri (Byers, 1992). Toutefois, l'analyse révélera ce qui aurait effectivement déclenché ce phénomène. La cartographie des linéaments s'avère, dans ces conditions, indispensables.

La figure 2.7 présente les linéaments rencontrés dans la ville de Butembo. Ils sont catégorisés selon qu'il s'agit d'un axe de vallée et/ou de crête. Les lignes de failles probables sont aussi identifiées sur base de la combinaison des observations stéréoscopiques, du MNT et de la carte géologique couvrant la ville de Butembo. Ces linéaments sont reconnus facilement par vision stéréoscopique sur les couples de photos 5737_253 et 5737_254 ; 5737_252 ; 5737_253 et 5737_254 ; 5737_255.

Remarquons un linéament de direction Sud-Ouest - Nord-Est traversant la ville vers le nord en changeant de direction vers l'est et le nord-est. Il s'agit là d'une très grande barrière tectonique. Toutes les assises marécageuses se trouvent en amont de cette barrière. La rivière Kimemi qui draine l'ancienne zone marécageuse (Dambo) sur laquelle est bâtie la ville s'est frayée un chemin dans la veine des schistes avec intercalation des quartz sains au niveau du plancher de la rivière sous le pont de Biasa, juste en aval de Kikyo. Cette roche saine ne s'est pas incisée suffisamment pour que la rivière évacue rapidement les eaux. Dans le même alignement sur le talus de la route menant vers Kikyo, on peut observer la continuité de cette roche.

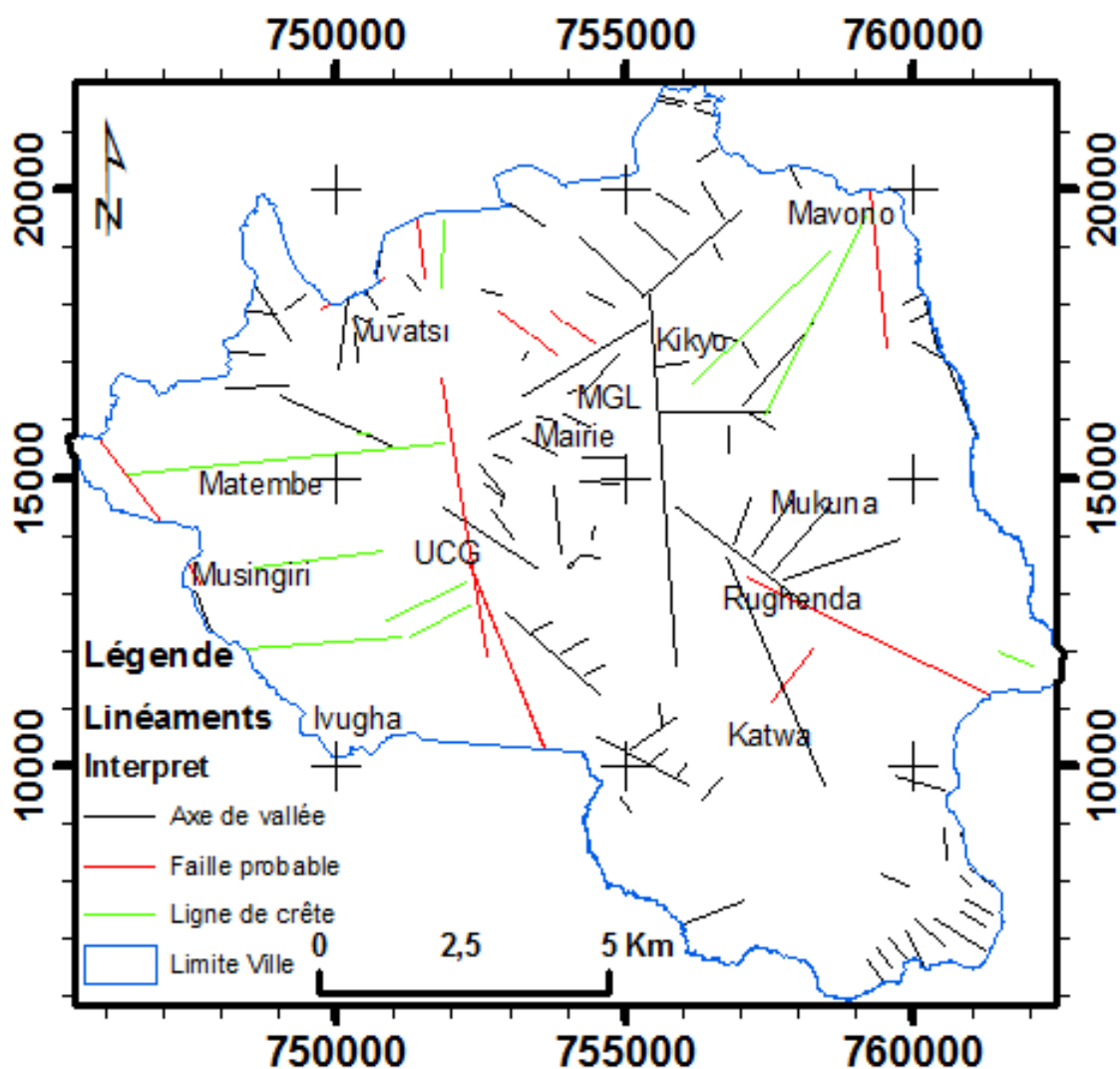


Figure 2.7. Structures linéaires dans la ville de Butembo

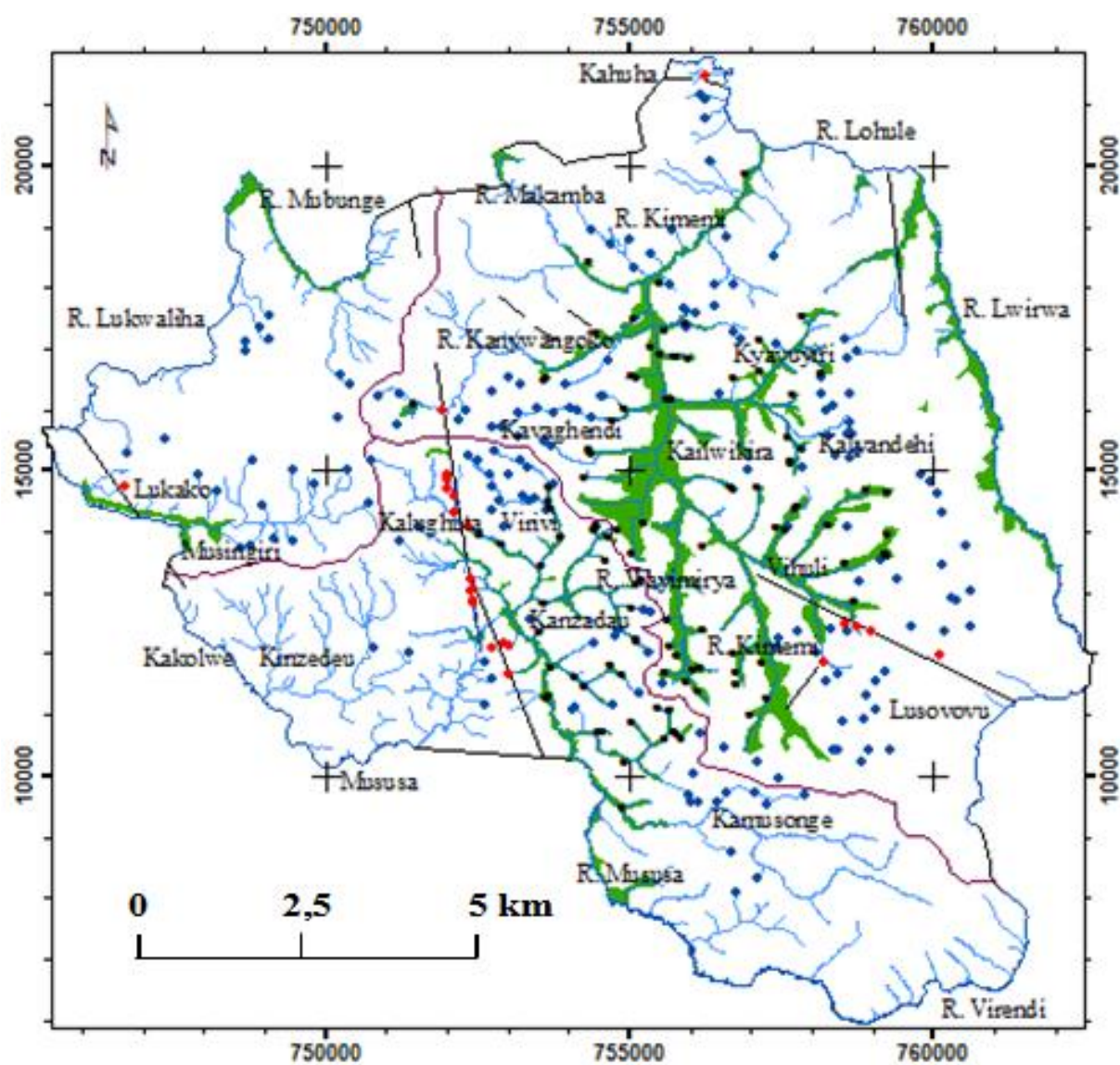
2.1.4. Contexte hydrogéologique

Suite à la nature granitique du substratum, des ressources hydrogéologiques potentielles devraient exister à Butembo. Actuellement, la ville s'alimente au droit de sources émergeant généralement au pied des versants et d'autres qui sont perchées dans les collines. De par la faible superficie des bassins versants, ces sources présentent généralement des débits inférieurs à 5 m³/h. D'un point de vue qualitatif, ces sources sont probablement contaminées par les activités anthropiques (cultures, habitations, ...) exercées à l'amont de l'émergence (Hallet, 2002).

Les sources les plus intéressantes d'un point de vue quantitatif semblent se localiser au niveau des filons de quartz. Ces derniers pourraient correspondre à des zones de failles et servir de drains naturels. Plusieurs sources sont situées à des altitudes différentes. Certaines sont localisées le long des failles.

Quant aux cours d'eau, la dépression dans laquelle est bâtie la ville de Butembo est entourée par des collines drainées par des rivières, dont les plus importantes sont : Kimemi, Mususa et Lwirwa. Le centre ville est drainé par la Kimemi qui traverse la zone urbaine dans la direction sud-nord. Ses principaux affluents sont : Wayimirya, Kanywangoko, Kavaghendi et Kinyavuyiri. La rivière Mususa, la plus importante de la Commune Kimemi, coule de l'Est à l'Ouest vers le Sud-ouest de la ville de Butembo. Nyoka, Kanzadau, Bwinyole, Viriva, Kalughuta (en Commune Kimemi) ainsi que Kayilavula (en Commune Mususa) en sont des affluents. Ces cours d'eau traversent des anciennes zones marécageuses appelées dambo. La figure 2.8 présente un réseau hydrologique dense dont la plupart des cours d'eau empruntent les linéaments laissant supposer des failles probables et parfois de changement de lithologie.

Trois bassins versants sont principalement drainés par la Kimemi, la Mususa et la Lukwaliha/Mubunge respectivement. Ces trois bassins versants disposent d'un réseau hydrographique très dense. Certaines sources n'ayant pas fait l'objet de localisation GPS ne sont pas reprises sur cette figure. D'autres ruisseaux n'ayant pas fait l'objet de *tracking* avec le GPS ne sont pas représentés sur la carte.



Légende

- Sources le long des failles probables
 - Sources de bas de versants
 - Sources perchées
- Cours d'eau
- Limites des bassins versants
- Faille probable
- Dambos
- Limite Administrative

Figure 2.8. Hydrologie de la ville de Butembo

2.2. Climat, sols et végétation

2.2.1. Contexte climatique

Butembo jouit d'un climat subtropical humide (*Afi*) tempéré par les montagnes (Kasay, 1998, Vyakuno, 2006). La température moyenne oscille autour de 18°C, avec deux saisons des pluies, de mars-avril-mai et août-septembre-octobre-novembre, influencée par le passage de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Les deux saisons relativement sèches vont de juin à juillet et de janvier à février. La pluviométrie moyenne annuelle (1365 mm) dans la région est typique à la zone équatoriale (Bultot, 1950) étant donné que la contrée jouxte la forêt de cette zone. La figure 2.9 présente le diagramme ombrothermique de la ville de Butembo couvrant la période allant de 1957 à 2010.

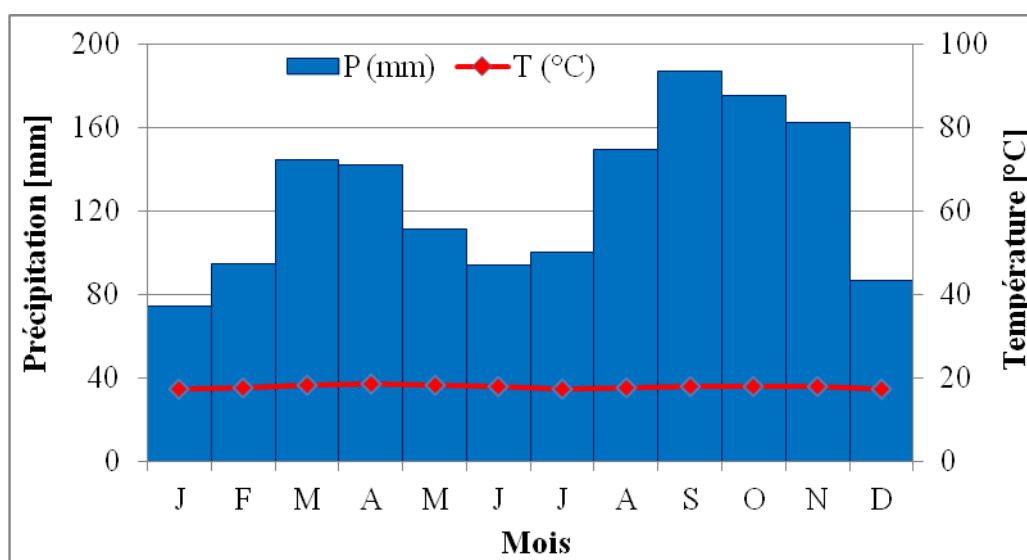


Figure 2.9. Diagramme ombrothermique de la ville de Butembo de 1957 à 2010.

Un chapitre est consacré de façon très détaillée à l'évolution des caractéristiques pluviométriques en territoire urbain de Butembo. C'est pourquoi, nous ne nous attardons pas à le développer à ce niveau.

2.2.2. Sols

Les sols de Butembo se diversifient selon les roches-mères, la texture et la teneur en eau et en matière organique. D'après Pomerol et Renard (1997), ces sols sont tous des kaolisols parce qu'ils sont formés par un matériau kaolinitique caractérisé par une fraction

argileuse à dominance de kaolinite et d'oxydes libres. Les oxydes présents dans les sols sont généralement des oxydes de fer, qui donnent au sol sa coloration rouge ou brune lui conférant ainsi le nom des ferrisols.

Du point de vue des roches-mères, les sols se distinguent selon les types qui sont formés sur les granites et les gneiss, qui s'étendent à l'Est de la ville, et les types issus de l'altération des schistes et des phyllades, que l'on rencontre à l'Ouest de la ville.

Selon Pecrot *et al.* (1962), sur le plan textural, ces sols sont généralement riches en argile. Ces caractéristiques se remarquent surtout sur la partie occidentale de la ville, essentiellement sur l'axe Vulamba-Kitatumba-Vuvatsi. En revanche, sur les collines formées de quartzites ou de granites, souvent situées à l'Est de la Kimemi les sols ont une texture argilo-sableuse.

Quant à la teneur en eau du sol, deux types de sols sont rencontrés à Butembo: les hygro-kaolisols et les hygro-xérokaolisols. Les premiers sont toujours humides et ne connaissent pas de dessèchement temporaire du profil.

En combinant ces critères de classification, les types de sols suivants sont rencontrés dans la ville de Butembo :

- hygro-xérokaolisols non humifères formés sur du granito-gneiss. Ils sont situés dans la zone circonscrite entre Vutetse, la Mususa et le domaine universitaire de l'Horizon.
- hygro-xérokaolisols humifères formés sur des schistes et des phyllades. Ils sont situés au Nord-Ouest de la ville autour de Mubunge. Un autre groupe d'hydro-xérokaolisols humifères se trouve sur une bande isolée à l'Est de Mukuna, sur des roches basiques.
- hygro-kaolisols humifères, qui s'étalent sur toute la ville de Butembo. Le premier type est formé sur des schistes et des phyllades. Il s'étend sur le centre et l'Ouest de la ville. Le deuxième groupe est sur des roches micacées. Il occupe toute la partie orientale de la ville.

Ces différents types de sols sont modifiés par les conditions des stations. Sur les collines et les pentes fortes, ils sont bien drainés et de couleur brun ou rouge. Dans les fonds des vallées, plats et marécageux (dambo), ils sont hydromorphes, tourbeux, très acides et de couleur noire ou bleuâtre.

Il convient de noter qu'une bonne partie de la ville est bâtie dans une dépression, sur ce substrat qui, sous le phénomène de l'anthropisation, est soumis à un drainage lié aux ravinements très marqués dans le paysage urbain. Les risques liés au rabattement de la nappe inhérent au drainage des zones ayant des tourbes sont multiples :

- Entrainement des particules fines lors du drainage avec création de vides et possibilités d'éboulement ;
- Réduction de la capacité portante du sol. Dans le cas de sols de type limoneux, argileux ou tourbeux, la diminution de la teneur en eau se traduit par une importante variation de volume pouvant conduire à des tassements présentant des risques graves pour la stabilité des édifices situés à proximité. Ces tassements varient en fonction de la nature du sous-sol, du chargement initial en surface et de la hauteur du rabattement consécutif au drainage qui peut exercer dans certains cas une influence sur plusieurs centaines de mètres à partir de la zone sollicitée.

Pour toutes ces raisons, des études géotechniques s'avèrent indispensables en vue de définir un mode de fondation approprié et garantir un aménagement durable. (http://www.territorial.fr/PAR_TPL_IDENTIFIANT/35936/TPL_CODE/TPL_ACTURES_FICHE/PAG_TITLE/Cons%20quences+d'un+rabattement+de+la+nappe/302-actu.htm) consulté le 6 août, 2011.

Nous développerons les conséquences liées aux ravinements dans les anciens dambos de la ville de Butembo dans la partie consacrée aux causes et conséquences des incisions verticales et horizontales dans ces anciennes zones marécageuses.

2.2.3. Contexte phytosociologique

La végétation originelle de Butembo disparue suite à l'action anthropique a laissé place à des groupements rudéraux herbacés, adventices post culturels et des espèces ligneuses exotiques (*Eucalyptus sp.*, *Grevillea rousseaui*, etc.) (Kataomba *et al.*, 2010). La contrée a subi depuis trois siècles une déforestation systématique si bien que la forêt climacique de montagne ne subsiste que dans quelques cantons sous-peuplés ainsi que sur les quelques sommets des massifs isolés (Kasay, 1988). Déjà, Claessens (1929) avait constaté la rareté des ligneux dans la contrée de haute altitude située entre Butembo et Lubero. Cette rareté du combustible ligneux, remarquée au début du siècle dernier, se fait encore

cruellement sentir aujourd'hui. L'observation des photographies aériennes de 1957 dénote d'un milieu fortement dénudé. Cependant, une forêt relique peut être observée dans la réserve de l'ITAV constituant ainsi l'unique lambeau de forêt primaire à Butembo.

Une étude menée par Kataomba *et al.* (2010) révèle que 72 espèces de mauvaises herbes ont été identifiées dans 4 grandes concessions. Elles étaient réparties en 37 familles et 63 genres dont les herbacées constituaient la majorité (85%). Des 14 familles les plus importantes constituant la flore, on peut citer par ordre décroissant : Asteraceae (17%) ; Poaceae (7%) ; Malvaceae et Rubiaceae (5,5%) ainsi que Apiaceae ; Lamiaceae...

La figure 2.10 illustre la dominance des *Eucalyptus* à travers la ville et la forte anthropisation autour de la réserve forestière de l'ITAV vers Nduko.

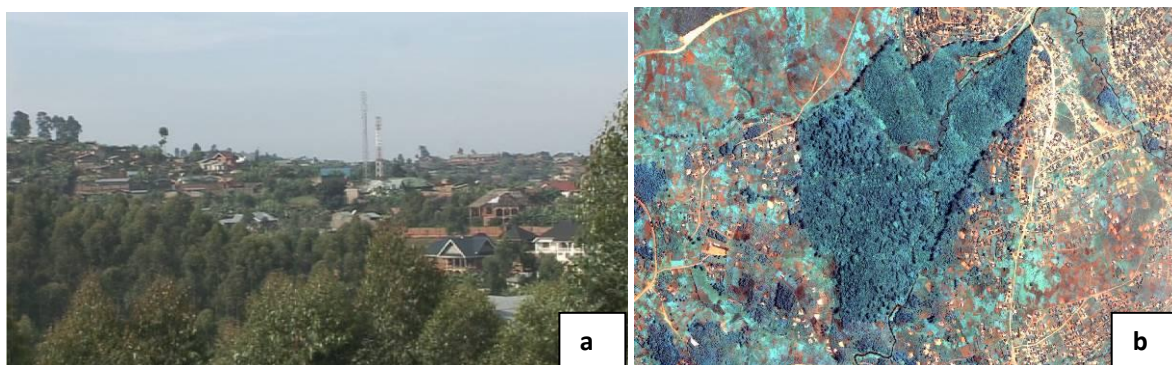


Figure 2.10. Quelques formations végétales dans la ville de Butembo

a). Eucalyptus dans le paysage urbain de Butembo ; **b).** Prise d'écran sur image Quickbird du 18 avril 2005 : Réserve de l'ITAV à Nduko sous l'effet de l'anthropisation liée au développement urbain.

En rapport avec le reboisement, une partie de la population, consciente des risques encourus, s'est investie dans l'effort de reforestation. Toutefois, pressés par le besoin, la quasi-totalité des intervenants ont porté leur choix uniquement sur les essences exotiques à croissance rapide. Ainsi, la contrée est-elle, à quelques exceptions près, entièrement couverte de peuplements d'*Eucalyptus*, créant ainsi l'uniformité génétique dont les conséquences à long terme peuvent être graves.

Il y a lieu de noter en l'occurrence, en termes de toxicologie environnementale, que les *Eucalyptus* sont utilisés pour assécher les marécages et pour pomper l'eau des zones dans lesquelles les glissements de terrain et les éboulements sont fréquents (Harmand, 1998). Néanmoins, outre le risque inhérent à l'uniformité génétique, certaines observations suggèrent que les *Eucalyptus* affecteraient négativement la réserve trophique du sol et contribueraient à

son dessèchement (Njoukam, 1995). Les baisses de teneur en carbone sous culture continue d'*Eucalyptus* s'accompagnent d'une baisse significative de CEC (capacité d'échange cationique). Après 6 ans de plantation d'*Eucalyptus*, Harmand (1998) a observé une évolution plutôt défavorable des caractéristiques du sol, avec une mauvaise incorporation de la litière du sol sous forme de débris végétaux et une plus faible porosité du sol que dans les autres jachères.

Etant donné son manque d'effet favorable sur la matière organique et la porosité du sol, ayant des conséquences néfastes sur le démarrage des cultures suivantes dans les parcelles, *Eucalyptus camaldulensis* n'est pas recommandable en jachère de courte durée et doit plutôt être installé sur les sols peu propices à l'agriculture (Hien, 1996).

Dans les plantations d'*Eucalyptus* au Congo, les vers de terre n'apparaissent qu'à partir d'une douzaine d'années (Harmand, 1998) alors qu'ils participeraient à la macroagrégation du sol par leurs déjections sous forme de terricules. Les vers de terre participent activement au cycle de la matière organique et des nutriments (Lavelle *et al.*, 1989). Les effets défavorables des jeunes plantations d'*Eucalyptus* sur le statut organominéral du sol ont déjà été évoqués par différents auteurs : Pochon *et al.* (1959) au Maroc, Bernard-Reversat (1987) au Sénégal, Jamet (1975), Bernard-Reversat en 1991, 1993, 1996 et Loubelo (1990) au Congo, Toky et Singh (1993) en Inde, King et Campbell (1994) au Zimbabwe.

La dégradation du statut organique du sol sous de jeunes plantations serait due à l'augmentation de la minéralomasse de la matière organique initiale induite par l'afforestation et ces pertes ne seraient compensées que lentement par des apports liés à la décomposition des litières. L'acidification du sol serait due à l'apport d'acides organiques par la minéralisation et au fort prélèvement d'éléments minéraux par des ligneux abaissant la somme des cations échangeables (Ohta, 1990). Le pH des percolats identifie l'*Eucalyptus* avec des pH acides (5,4). Les polyphénols solubles exerceraient un blocage de minéralisation de l'azote dans les litières et dans le sol (Swift *et al.*, 1979; Uguen, 1996).

La litière d'*Eucalyptus* ne s'incorpore pas au sol sous forme de débris végétaux, au moins au cours des 7 premières années (Harmand, 1998). Cette litière présente de nombreux caractères de décomposition lente et d'incorporation au sol, pour une part, sous forme de composés hydrosolubles peu dégradables. La forte acidité des percolats peut contribuer à

désaturer le complexe adsorbant du sol (Bernard-Reversat, 1993) et ne favoriserait pas la croissance de la strate inférieure.

L'introduction d'arbres à croissance rapide dans la jachère modifie les facteurs hydriques en particulier le stock d'eau du sol dans le sens d'un plus fort assèchement. Cette modification est induite par l'augmentation de l'ETR (évapotranspiration réelle) liée à la plus forte production de biomasse primaire des jachères arborées (Millet, 1994). A l'échelle annuelle, l'*Eucalyptus*, prolonge son activité végétative en saison sèche et étant donné sa capacité à transpirer, il épuise les réserves hydriques du sol (Eyog Matig et Dreyer, 1991), Eyog Matig, 1993). Les quantités d'azote recyclées par la litière sont les plus faibles chez l'*Eucalyptus* à cause d'une faible vitesse de décomposition et d'une forte rétention dans la litière (Harmand, 1998).

D'autres essences comme *Leucaena leucocephala*, *Calliandra calothyrsus*, *Albizia sp.*, *Eurythrina sp.*, *Grevillea robusta* sont aussi utilisées avec des effets améliorant la fertilité du sol dans beaucoup de régions. Ces espèces ont été introduites récemment en région de Beni-Lubero.

Il s'agit là d'une problématique agroforestière dont il faudra tenir compte dans la région si l'on veut intégrer les notions de toxicologie environnementale dans la gestion du territoire urbain de Butembo.

La figure 2.11 illustre l'association des cultures (maïs, haricot) avec l'*Eucalyptus*, une pratique agroforestière très utilisée dans la contrée. Il y a donc lieu de se poser des questions sur la durabilité de telles pratiques dans un contexte d'exiguïté de terres agricoles inversement proportionnelle à l'explosion démographique.



Figure 2.11. Pratique agroforestière à Butembo (association maïs-haricot-Eucalyptus sp.)

Après avoir analysé le contexte physique de la région, il s'avère utile de se rendre compte de l'évolution des événements pluviométriques qui apportent de l'eau aux bassins versants dont le relief est accidenté. Ces deux aspects y compris les autres (occupation du sol...) qui sont développés dans ce travail apportent des arguments sur la compréhension de l'évolution du ruissellement.

Chapitre troisième

Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo de 1957 à 2010.

Chapitre III. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo de 1957 à 2010.

3.1. Introduction

La région de Butembo jouit d'un climat du type *Afi* selon Köppen et aurait des caractéristiques similaires au climat Colombien selon la classification de De Vries (Kasay, 1988). La ville est située dans une contrée dont les conditions climatiques seraient typiques du climat équatorial si elles n'étaient pas contrastées par les montagnes. La proximité de l'équateur détermine deux saisons pluvieuses (mars-avril-mai et août-septembre-octobre-novembre) correspondant au passage du soleil au zénith et deux saisons relativement sèches correspondant aux mois de juin et juillet et aux mois de janvier et février.

Par ailleurs, la région de Butembo est située dans une zone à vocation agropastorale caractérisée par une récente forte anthropisation. Près de 90% de la population pratique l'agriculture de subsistance (Kitakya, 2007). Cette agriculture, vitale pour la population locale, est étroitement dépendante du régime pluviométrique et de ses excès qui impactent les rendements agricoles à différentes échelles de temps et d'espace. Malheureusement les caractéristiques pluviométriques de ces événements pluvieux ne sont que trop peu étudiées alors qu'elles influenceraient l'évolution des écosystèmes locaux. Elles exacerbent notamment des phénomènes environnementaux perturbant la structure urbaine à Butembo.

Tous ces phénomènes supposés extrêmes par la population locale ne sont pas argumentés objectivement sur des bases scientifiques. New *et al.* (2006) et Aguilar *et al.* (2009) stipulent qu'il manque d'informations sur les tendances des variables pluviométriques et des extrêmes climatiques dans beaucoup de régions à travers les pays en développement. Solomon *et al.* (2007) et Ozer *et al.* (2009) estiment également que les indices pluviométriques sont encore trop peu étudiés en Afrique sub-saharienne. Mahé (1993) précise que la zone équatoriale est un milieu hydrologiquement très contrasté et qu'elle reste liée à la complexité du système océan-atmosphère qui génère les précipitations, complexité due à sa position à cheval sur les deux hémisphères.

Malgré les conséquences souvent dramatiques de la fluctuation pluviométrique sur l'agriculture et l'environnement à Butembo, sa variabilité reste mal connue de même que les

valeurs extrêmes dans sa série chronologique. D'une part, la seule série pluviométrique quotidienne de Butembo analysée ne couvre que la période 1961-1992 (Aguilar *et al.* 2009) ; d'autre part, il faut noter que la forte anthropisation en région de Butembo suivie d'une dégradation notable des ressources naturelles ne ferait qu'accentuer cette variabilité climatique et/ou ses impacts dans la région.

Il s'avère donc nécessaire d'analyser minutieusement le cycle saisonnier de la pluviométrie à Butembo. En effet, l'intérêt de ce type d'étude réside dans le fait que les événements extrêmes devraient devenir plus fréquents suite au réchauffement climatique (Houghton *et al.*, 2001) et qu'il convient de s'y pencher dès maintenant. Il existe actuellement un fort intérêt scientifique pour le domaine de l'analyse des extrêmes climatiques parce qu'ils témoignent de certaines non-linéarités importantes et leurs conséquences économiques et sociales sur l'activité humaine sont potentiellement énormes (Naveau *et al.*, 2005).

La question des effets du changement climatique d'origine anthropique sur les événements climatiques extrêmes n'a pu être abordée que relativement récemment, en raison de la nécessité de développer des outils méthodologiques appropriés. L'analyse de leurs résultats pourrait permettre d'appréhender la manière dont les écosystèmes (et les socio-écosystèmes) réagissent à des perturbations rares mais extrêmes de l'environnement (Planton, 2007). A Butembo, on assiste ces dernières années à des tarissements précoces de certaines sources pendant les saisons sèches, même peu marquées. Hallet (2002) estime que suite à la nature granitique du substratum, des sources hydrogéologiques potentielles devraient exister au droit de Butembo. Actuellement la ville s'alimente au droit des sources émergeant généralement au pied des versants. Cet auteur estime que malgré la multitude des sources, la faible superficie des bassins versants prédispose de débits relativement moindres, de l'ordre de 5 m³/h qui ne pourront jamais satisfaire l'alimentation en eau de la population urbaine.

On comprend donc que toute perturbation du régime hydrologique peut à court terme rendre vulnérables les populations déjà confrontées aux problèmes liés à la disponibilité en eau. A mesure que l'anthropisation marque son pas et prend de l'ampleur telle qu'on peut le constater désormais en milieu urbain de Butembo, la vulnérabilité pourrait s'alourdir. Le risque pourrait même s'avérer majeur d'autant plus qu'une étude qualitative démontre que 100% des sources étudiées sont contaminées probablement suite aux activités anthropiques exercées à l'amont des émergences (Hallet, 2002). Il y a lieu de focaliser l'attention en

matière d'alerte précoce au risque potentiel encouru en cas de changement du régime pluviométrique et par ricochet du régime hydrologique qui imposera une réadaptation des socio-écosystèmes en perpétuelle évolution. Ce constat impose une compréhension du régime pluviométrique dans un contexte où l'urbanisation rapide de la ville de Butembo n'est pas accompagnée des aménagements appropriés, notamment dans le domaine de la gestion de l'eau au sens large du terme.

Cette étude a pour but de caractériser de la manière la plus nette les événements qui structurent et modulent les cycles annuel, saisonnier et quotidien des pluies à Butembo. Cette analyse minutieuse s'est focalisée sur les événements extrêmes, les anomalies, le nombre de jours de pluies ainsi que les dates de début et de fins de saisons pluvieuses.

Cette analyse aborde donc une caractérisation des événements pluvieux à Butembo. C'est ainsi que des séries chronologiques à différents pas de temps ont été constituées. Les résultats de cette étude pourront trouver une application directe à l'échelle locale notamment dans les manifestations de phénomènes érosifs, les glissements de terrain, les occurrences des inondations ainsi que dans le cadre des activités relatives à l'agriculture urbaine de Butembo. L'étude pourra, *in fine*, susciter des stratégies à mener par la municipalité pour prendre en compte la notion de risques hydrologiques dans son plan d'aménagement du territoire.

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Données

L'analyse de la variabilité de la pluviométrie de la station de l'Institut Technique Agricole et Vétérinaire (ITAV) de Butembo a été réalisée à partir des données pluviométriques quotidiennes disponibles du 1^{er} janvier 1957 au 31 décembre 2010. Cette station porte le N°41049 du réseau climatologique du Congo avec comme indicatif 072. Elle est située à 0°07'46" de latitude nord et 29°16'58" de longitude est à 1736 mètres d'altitude. Cette station météorologique est localisée à proximité du bâtiment administratif de l'Université Catholique du Graben (site de l'ITAV) entre la chapelle universitaire et la maison d'habitation de Monsieur KAMBILO chargé des récoltes des données. La série chronologique analysée comporte quelques données lacunaires coïncidant avec la rébellion de 1964 allant du 19 septembre au 6 octobre 1964.

3.2.2. Analyses des données pluviométriques annuelles et quotidiennes

L'analyse des précipitations annuelles et quotidiennes a exigé de calculer annuellement neuf indices pluviométriques (Tab.3.1) : le total pluviométrique (PTOT), le nombre total de jours humides (avec pluies journalières ≥ 1 mm, JP), la lame d'eau moyenne précipitée par jour humide (*Simple day intensity index*, SDII), le nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 10 mm et ≥ 20 mm (P10 et P20) ainsi que la pluviométrie maximale enregistrée en 1 jour (Px1J). Trois autres indices sont basés sur les 95^{ème}, 99^{ème} et 99,5^{ème} percentiles. Cette méthode d'analyse est communément utilisée pour l'étude des événements extrêmes (Manton *et al.*, 2001 ; Griffiths *et al.*, 2003, Haylock *et al.*, 2006 ; New *et al.*, 2006 ; Aguilar *et al.*, 2009 ; Hountondji *et al.*, 2011). Elle est utilisée dans ce cas pour explorer méticuleusement cette série chronologique des précipitations dans la zone urbaine de Butembo.

Ces percentiles sont calculés à partir des données journalières sur une période de trente ans, ici 1971-2000. Cette exigence permet de se conformer aux normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Le 95^e percentile correspond à un événement pluviométrique intense. Le 99^e percentile correspond à un événement pluviométrique extrême alors que le 99,5^e percentile représente un événement pluviométrique très extrême. La fréquence de ces événements pluviométriques intense (P95p), extrême (P99p) et très extrême (P99,5p) est exprimée en jour par an.

Tableau 3. 1. Liste de neuf indices utilisés dans l'analyse des événements extrêmes.

ACRONYME	NOM DE L'INDICE	DEFINITION	UNITE
PTOT	Précipitation annuelle	Précipitation totale annuelle	[mm]
JP	Jour de pluie	Nombre total de jours humides (≥ 1 mm)	[jours]
SDII	<i>Simple day intensity index</i>	Lame d'eau moyenne précipitée par jour de pluie	[mm/jour]
P10	Fréquence des pluies ≥ 10 mm	Nombre de jours avec des précipitations ≥ 10 mm	[jours]
P20	Fréquence des pluies ≥ 20 mm	Nombre de jours avec des précipitations ≥ 20 mm	[jours]
Px1J	Pluie maximale quotidienne	Précipitation maximale quotidienne	[mm]
P95p	Fréquence des pluies intenses	Nombre de jours avec des précipitations $\geq 95^{\text{e}}$ percentile calculé sur la période 1971-2000	[jours]
P99p	Fréquence des pluies extrêmes	Nombre de jours avec précipitation $\geq 99^{\text{e}}$ percentile calculé sur la période 1971-2000	[jours]
P99,5p	Fréquence des pluies très extrêmes	Nombre de jours avec précipitation $\geq 99,5^{\text{e}}$ percentile calculé sur la période 1971-2000	[jours]

L'analyse des tendances linéaires (exprimées en % par décennie) a été réalisée de 1957 à 2010 par régression linéaire entre les différents indices pluviométriques et le temps (en années). Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en quatre classes indiquant des tendances significatives à la hausse ou à la baisse. La limite des quatre classes considérées est définie à partir de la statistique t de Student utilisée pour tester l'hypothèse d'une pente égale à 0. La tendance est dès lors qualifiée comme étant significative si la probabilité p du test t appliquée à la pente de régression est inférieure à 0,05 alors qu'elle n'est pas significative lorsqu'elle dépasse le seuil de 0,05.

3.2.3. Détermination de la saison des pluies : début, fin et longueur

Ozer *et al.* (2009) révèlent que la date du début des pluies est importante dans la planification des opérations agricoles, particulièrement le semis. Il existe plusieurs définitions relatives à la longueur de la saison des pluies.

Dans le cadre de cette thèse, nous appliquons la méthode d'Erpicum *et al.* (1988) qui a été développée au Sénégal avant d'être appliquée ailleurs en Afrique (Ozer & Erpicum, 1995). Ces auteurs ont montré que, selon des critères climatiques, la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade » (période de cinq jours) déterminée est supérieure à la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de plus de sept jours. Selon le même calcul, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade ».

Cette méthode permet d'estimer les dates de début et de fin des saisons des pluies ainsi que l'évolution de la longueur de la saison des pluies. Elle permet également de caractériser l'amplitude de la saison des pluies en calculant l'aire comprise entre les probabilités d'une pentade sèche et d'une pentade humide. Ainsi, au moment où la saison des pluies est la plus régulière, ces écarts sont fortement prononcés. La somme de ces écarts calculée de cinq en cinq jours constitue un bon indicateur de la valeur agrométéorologique de la saison des pluies (Ozer *et al.*, 2005). Seules les pluies journalières ≥ 1 mm sont considérées pour éviter les biais qui seraient induits par d'éventuelles variations dans la prise en compte des faibles précipitations.

3.2.4. Caractérisation des périodes de retour (Loi de Gumbel)

La loi de Gumbel (1958) a été appliquée à la série pluviométrique pour caractériser les périodes de retour des précipitations quotidiennes auxquelles on doit s'attendre dans la zone urbaine de Butembo aux seuils de 6 ans (anormal) ; 10 ans (très anormal) ; 30 ans (exceptionnel) et 100 ans (très exceptionnel). On note cependant que des études citées par Mohymont et Demarée (2006) ont exprimé un certain scepticisme concernant l'utilisation de la distribution de Gumbel pour les extrêmes de précipitations, montrant que cette distribution peut, dans certains cas, sous-estimer sérieusement les valeurs extrêmes de pluie pour des très longues périodes de retour. C'est la raison pour laquelle les périodes de retour inférieures à la longueur de la série pluviométrique de Butembo (à savoir 53 ans) ont été privilégiées. Ceci ne constitue pas un frein majeur à cette analyse puisque les événements pluvieux anormaux, très anormaux et exceptionnels peuvent être caractérisés.

3.3. Résultats

3.3.1. Détection de la persistance des périodes sèches ou humides

La détection de la persistance des périodes sèches ou humides a été opérée en recourant à la méthode de la moyenne glissante de 7 ans centrée sur la quatrième année. Ainsi, la figure 3.1 montre le tracé de cette moyenne et celui de la variation annuelle pour la station de l'ITAV de Butembo de 1957 à 2010. L'histogramme présente les précipitations annuelles exprimées en écart-type (indice d'anomalie pluviométrique) et met l'accent sur les variations interannuelles très fortes alors que la courbe lissée sur 7 ans constitue un indicateur des grandes fluctuations pluriannuelles.

La série des précipitations lissées sur 7 ans se caractérisant par une distribution unimodale d'allure pseudo-gaussienne, l'anomalie d'une succession de 7 années peut dès lors se définir par référence à une situation jugée normale et son intensité peut se mesurer en termes d'écart à la normale. Le seuil proposé est un écart-type de part et d'autre de la moyenne.

Ainsi, les années les plus arrosées sont notamment : 1961 (exceptionnellement humide puisque s'écartant de plus de 2 écart-type) à 1963, 1974 à 1977, 1985 et 2006. A l'opposé, les années les plus sèches sont 1960, 1965, 1968, 1983, 1993, 2000, 2002 et 2004. Il est intéressant de noter que la moyenne lissée sur 7 ans ne s'écarte d'un écart-type qu'à une seule reprise, au début des années 2000, centré sur 2002. Depuis, les précipitations semblent être revenues à la normale.

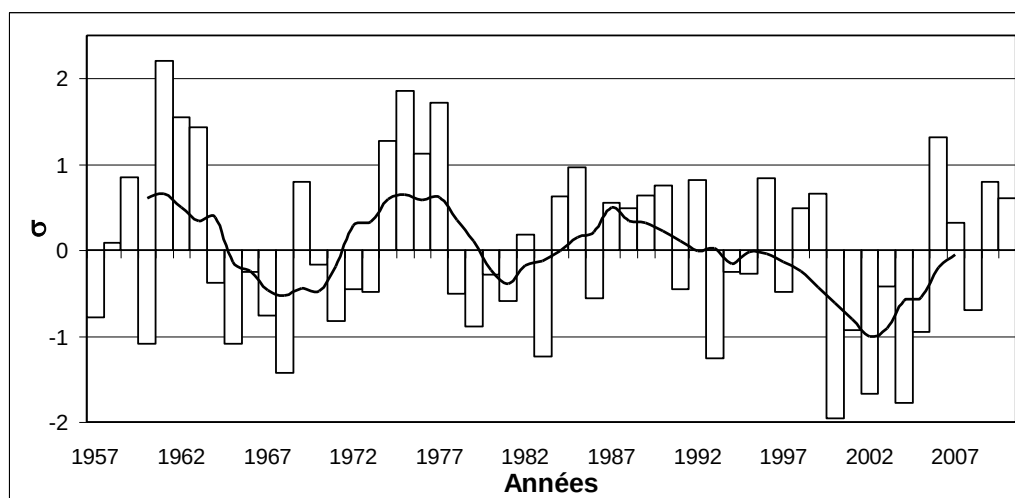


Figure 3.1. Evolution annuelle des précipitations exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique développé par Lamb (1982).

Les caractéristiques typiques (précipitations annuelles, nombre de jours de pluie, lame d'eau moyenne précipitée par jour humide, nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 10 mm et ≥ 20 mm, et limites caractérisant les événements pluviométriques intenses, extrêmes et très extrêmes) de la station météorologique de l'ITAV de Butembo sont présentées au tableau 3.2.

Tableau 3.2. Caractéristiques des précipitations à la station météorologique de l'ITAV de Butembo. Moyennes $\pm$ écart type calculées sur la période 1957-2010 : précipitation annuelles (PTOT), nombre de jours de pluie (JP), lame d'eau moyenne précipitée par jour humide (SDII), nombre total des jours caractérisés par des précipitations ≥ 10 mm et ≥ 20 mm (P10 et P20), et valeurs limites caractérisant les événements pluviométriques quotidiens intense, extrême et très extrême (P95p, P99p et P99,5p) calculées sur la période 1971-2000.

INDICES PLUVIOMETRIQUES	VALEURS BUTEMBO	UNITES
PTOT	1382 $\pm$ 153	[mm]
JP	147 $\pm$ 18	[jours]
SDII	9,4 $\pm$ 1,2	[mm]
P10	49,6 $\pm$ 6,5	[jours]
P20	19,7 $\pm$ 3,9	[jours]
Px1J	56,1 $\pm$ 17,9	[mm]
P95p	30,8	[mm]
P99p	51	[mm]
P99.5p	60,1	[mm]

Le total pluviométrique annuel moyen enregistré de 1957 à 2010 à la station météorologique de Butembo s'élève à 1382 mm. Cette station présente le nombre de jours de pluie équivalent à 147. Quant aux valeurs limites (calculées sur la période 1971-2000) définissant les événements pluviométriques intense, extrême et très extrême, elles sont respectivement de 30,8 mm ; 51 mm et 60,1 mm.

3.3.2. Tendances des indices pluviométriques

Les figures 3.2 à 3.9 présentent les tendances des indices pluviométriques à Butembo.

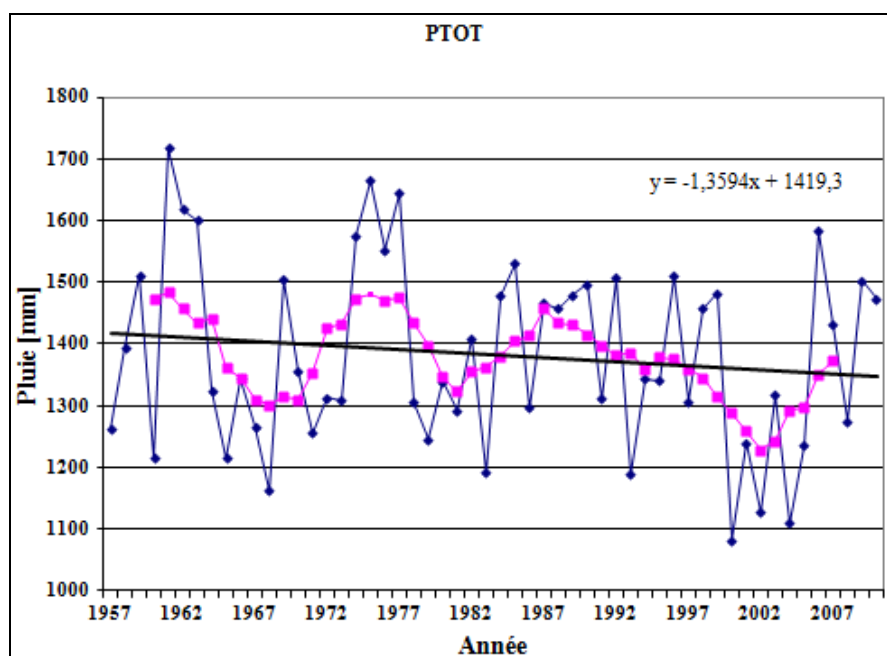


Figure 3.2. Tendance de la pluviométrie annuelle à Butembo de 1957 à 2010.

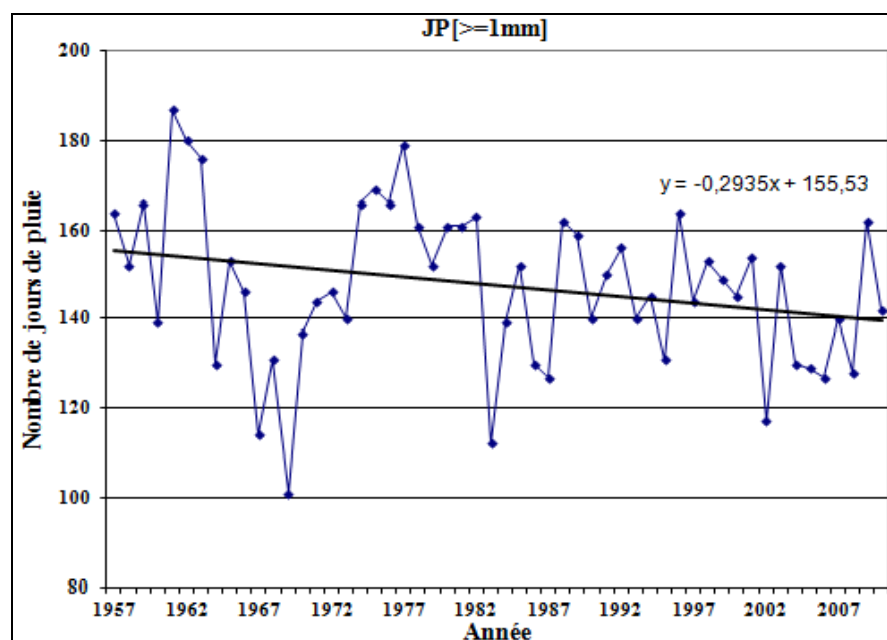


Figure 3.3. Tendance du nombre de jours de pluie à Butembo de 1957 à 2010.

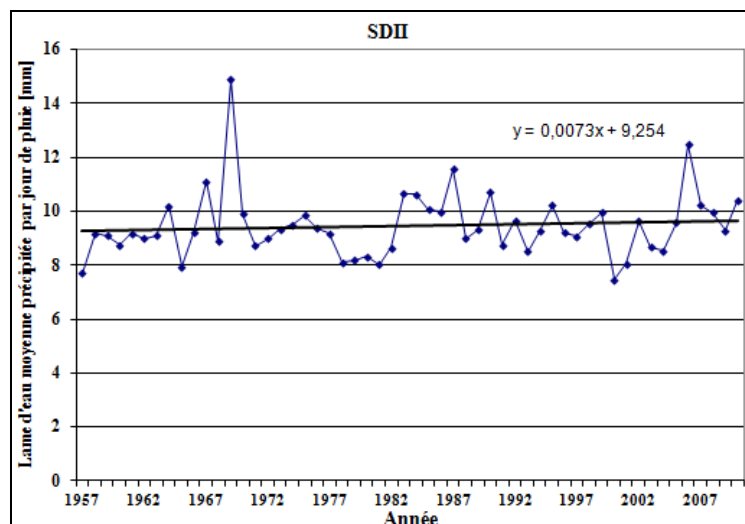


Figure 3.4. Tendance de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie à Butembo.

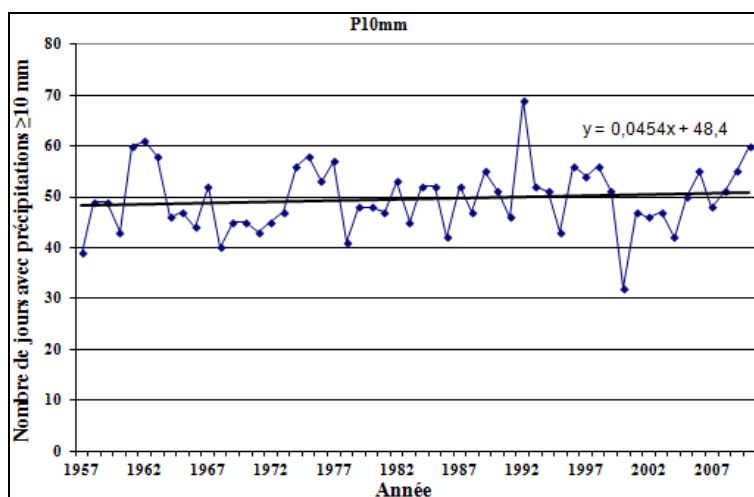


Figure 3.5. Tendances du nombre de jours avec des précipitations ≥ 10 mm à Butembo

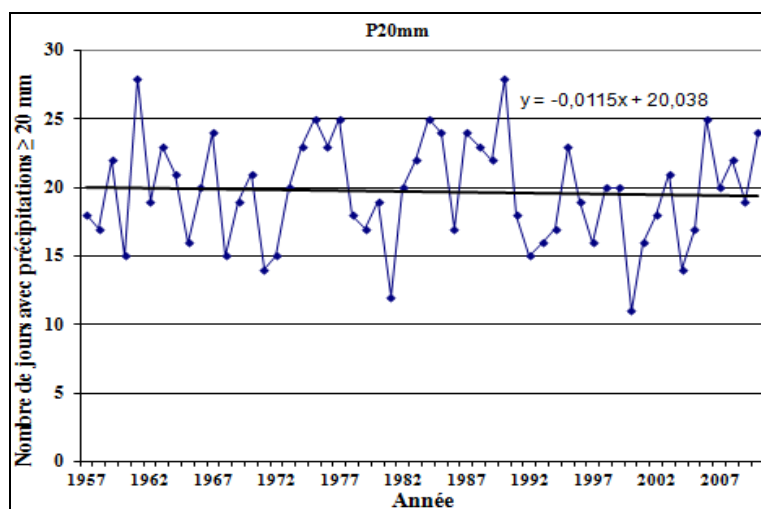


Figure 3.6. Tendance du nombre de jours avec des précipitations ≥ 20 mm à Butembo

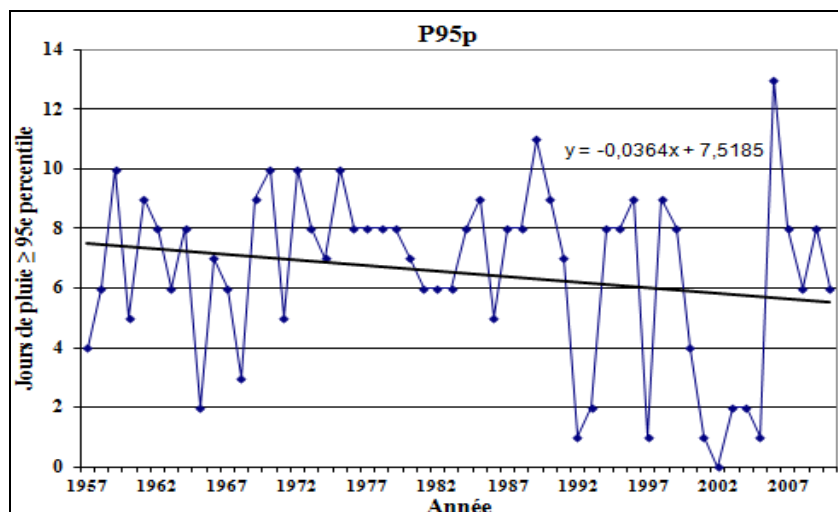


Figure 3.7. Tendance du nombre de jours de pluie supérieurs au 95^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.

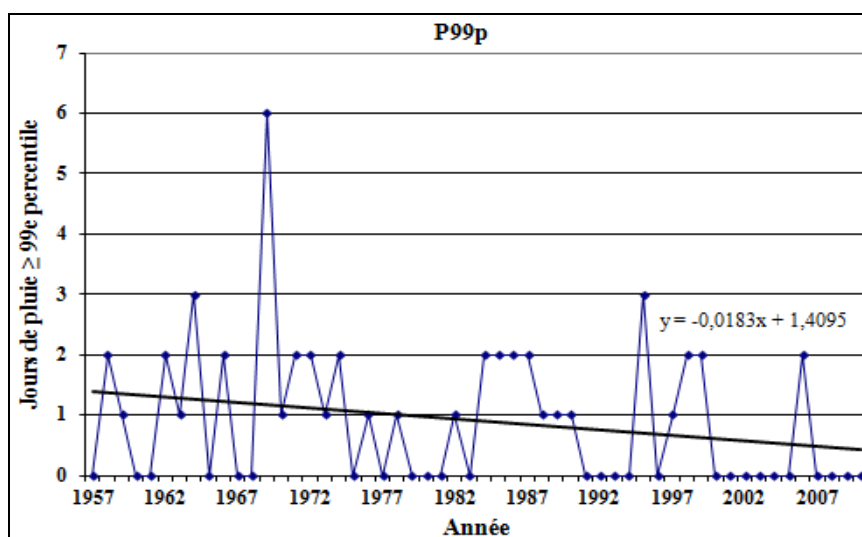


Figure 3.8. Tendance du nombre de jours de pluie supérieurs au 99^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.

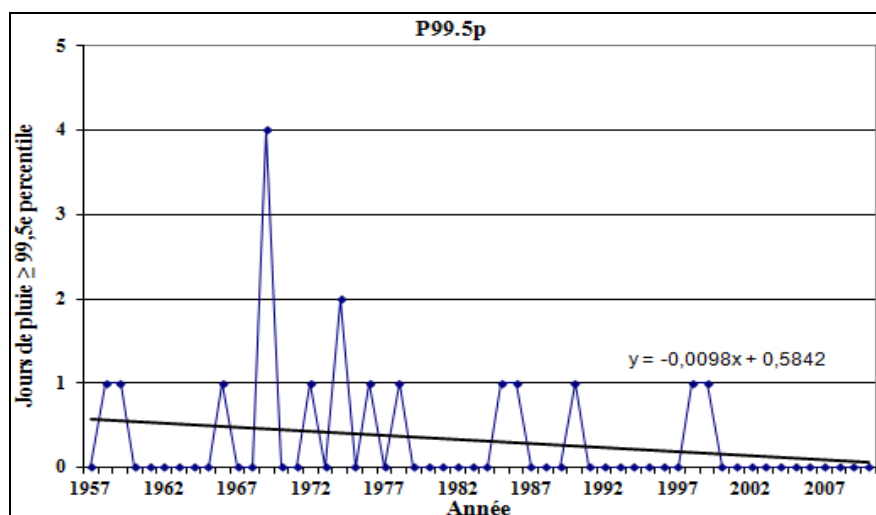


Figure 3.9. Tendance du nombre de jours de pluie supérieurs au 99,5^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.

Il ressort de l'analyse des tendances des neuf indices pluviométriques (tableau 3.3) que sept sont à la baisse et seulement deux (SDII et P10) à la hausse. Il appert qu'aucune de ces tendances ne soit statistiquement significative.

Tableau 3. 3. Tendances linéaires (exprimées en % par décennie) calculées pour les neuf indices pluviométriques à la station de Butembo.

INDICES PLUVIOMETRIQUES	1957 à 2010
PTOT	-0,96
JP	-1,89
SDII	0,79
P10	0,94
P20	-0,57
Px1J	-6,42
P95p	-4,84
P99p	-12,98
P99.5p	-16,78

3.3.3. Début, fin et longueur de la saison des pluies

La qualité de la saison culturale dans le domaine agricole est étroitement liée aussi au nombre de jours de pluie. Pour cette station, ce nombre présente une tendance linéaire à la baisse qui est de l'ordre de 1,9% par décennie. Si cette tendance n'est cependant pas statistiquement significative, l'indice ne renseigne pas sur la distribution des précipitations à l'intérieur de la saison de pluie. Aussi, avons-nous appliqué la méthode d'Erpicum *et al.* (1988) à différentes périodes d'analyse. D'abord, l'analyse s'échelonne sur la totalité de la période considérée (1957 à 2010) pour nous rendre compte de l'allure générale. Ensuite, nous avons sélectionné deux périodes : 1957 à 1983 et 1984 à 2010. Les résultats caractérisant les saisons pluvieuses obtenues sont illustrés à la figure 3.10.

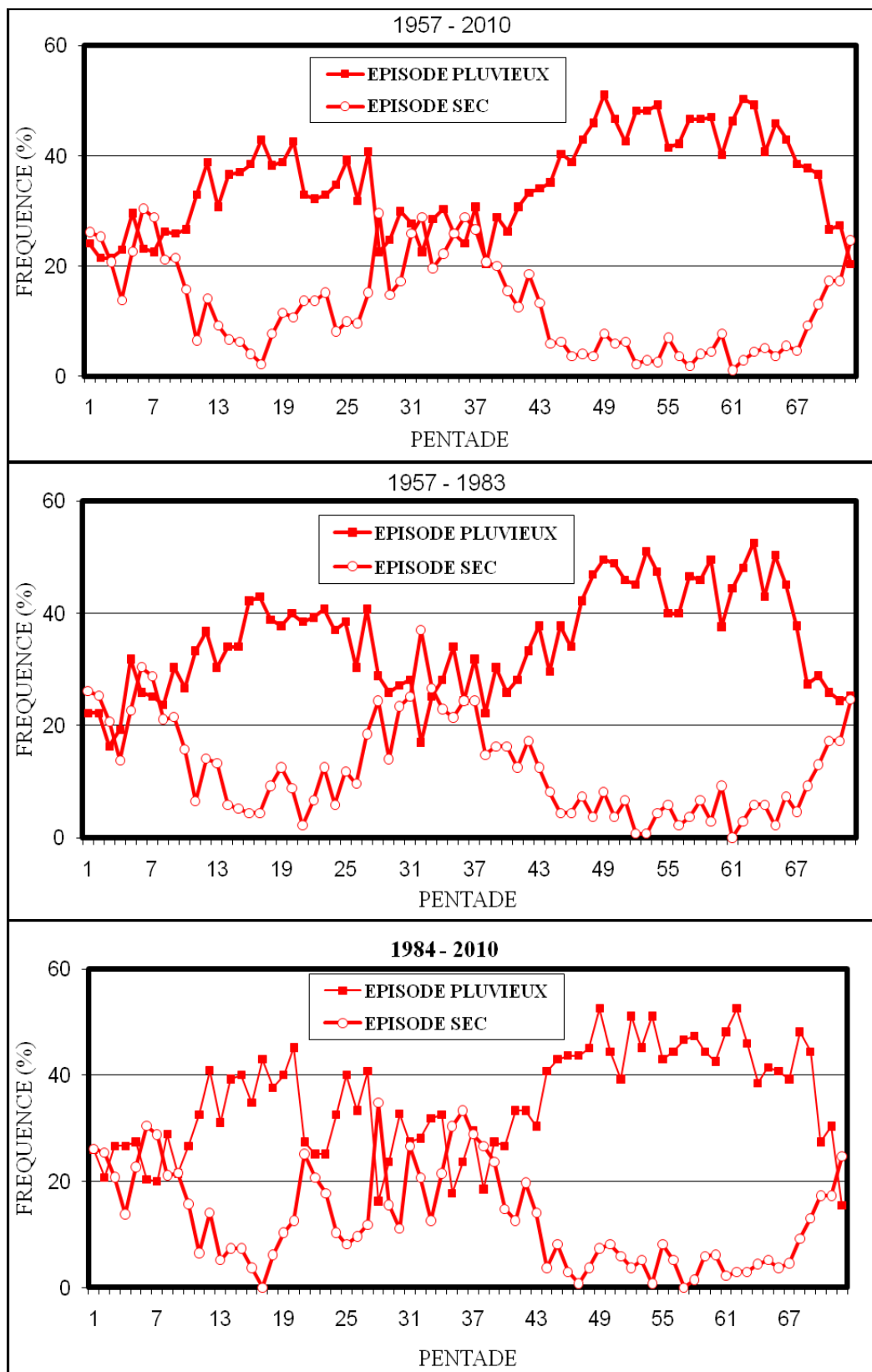


Figure 3.10. Estimation par pentade de la durée de la saison des pluies à Butembo pour les périodes 1957-2010, 1957-1983 et 1984-2010 selon la méthode d'Erpicum *et al.* (1988).

Tenant compte de toute la période d'observation, la méthode d'Erpicum *et al.* (1988) montre que la petite saison des pluies (PSP) débute le 6 février (pentade 8) et prend fin le 15 mai (pentade 27). Pendant la longue saison des pluies (LSP), le début est fixé le 11 juillet (pentade 39) et s'arrête le 25 décembre (pentade 71).

Pour la période allant de 1957 à 1983, la PSP commence le 6 février (pentade 8) et se termine le 5 juin (pentade 31) tandis que la LSP commence le 16 juin (pentade 34) et prend fin le 31 décembre (pentade 72).

L'intervalle couvrant la plus récente période (1984-2010) commence sa PSP au 16 février (pentade 10) et s'arrête au 15 mai (pentade 27) alors que sa LSP s'étale du 11 juillet (pentade 39) au 25 décembre (pentade 71). Le tableau 3.4 illustre la synthèse de ces résultats.

Tableau 3.4. Caractéristiques des saisons pluvieuses à la station de l'ITAV/Butembo pour la période allant de 1957 à 2010.

Période	Longueur de saison	Début saison		Fin saison	
		Date	Pentade	Date	Pentade
1957-2010	PSP	06/02/	8	15/05/	27
	LSP	11/07/	39	25/12/	71
1957-1983	PSP	06/02/	8	5/06/	31
	LSP	16/06/	34	31/12/	72
1984-2010	PSP	16/02/	10	15/05/	27
	LSP	11/07/	39	25/12/	71

Le tableau 3.5 présente l'évolution des amplitudes et des longueurs de saisons pluvieuses pour les périodes allant de 1957 à 1983 et de 1984 à 2010.

Tableau 3.5. Evolution des amplitudes et des longueurs de saisons pluvieuses (LSP) et (PSP) pour les périodes allant de 1957 à 1983 et 1984 à 2010.

	1957-1983	1984-2010	Différence (%)	Saison
Longueur	24 (4)	18 (3)	-25	PSP
Longueur	39 (6,5)	33 (5,5)	-15,4	LSP
Amplitude	528,8	442,6	-16,3	PSP
Amplitude	1111,2	1131,3	1,8	LSP

Entre les années 1957-1983 et la période 1984-2010, les deux saisons des pluies se sont contractées, mais de manières différentes. Ainsi, la LSP s'est contractée d'un mois sur une période initiale de 6,5 mois, ce qui correspond à une diminution de 15,4% de sa durée. Par contre, la PSP a été plus fortement affectée puisqu'elle perd un mois sur quatre initialement, soit 25% de sa longueur initiale.

En outre, la méthode d'Epicum *et al.* (1988) analyse également l'amplitude de la saison pluvieuse. Toute observation d'une contraction dans cette dernière témoigne d'un degré de vulnérabilité agricole accru. Tout comme pour la longueur, il s'avère que la PSP a subi une baisse de 16,3 % de son amplitude. L'analyse de la figure 3.10 montre que la PSP est quasi perturbée en son centre (vers la mi-avril, pentade 21), période pendant laquelle la probabilité d'avoir un épisode sec est proche de celle d'avoir un épisode humide. Cette évolution est très marquée et contraste fortement avec l'allure de la PSP durant les années 1957-1983. Par contre, l'amplitude de la LSP est restée pratiquement inchangée (tableau 3.5).

3.3.4. Estimation de la récurrence des événements pluvieux à Butembo

L'estimation de la récurrence des événements jugés exceptionnels se fait en usant de la loi de Gumbel. Cette loi de statistique des valeurs extrêmes a été appliquée aux données de précipitations journalières de la station de l'ITAV de Butembo. Les résultats obtenus sont illustrés à la figure 3.11. Selon la classification internationale des événements extrêmes proposée par l'Institut Royal de la Météorologie de Belgique (Sene & Ozer, 2002), les valeurs caractérisant les précipitations « anormales » (période de retour de 6 ans), « très anormales » (10 ans), « exceptionnelles » (30 ans) et « très exceptionnelles » (100 ans) sont respectivement de 77,4 mm ; 86 mm ; 103,7 mm et 122,7 mm.

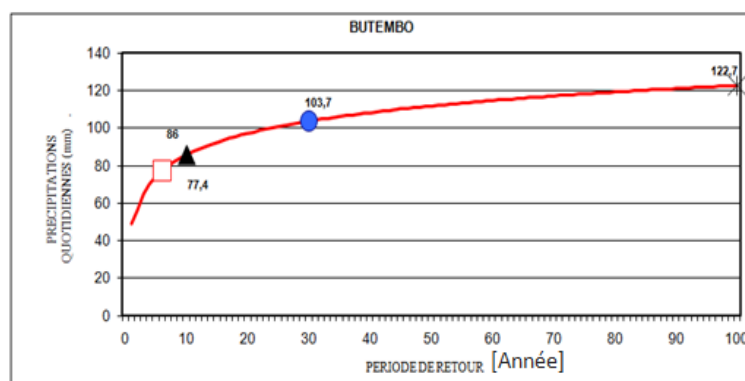


Figure 3.11. Période de retour des pluies journalières à Butembo.

3.4. Discussion

L'étude approfondie des données pluviométriques de la station météorologique de l'ITAV de Butembo sur une longue série chronologique s'étalant sur un peu plus d'un demi-siècle (1957-2010), ne révèle pas un changement drastique dans son ensemble. L'intérêt de cette analyse réside dans le fait que les tendances des 9 indices pluviométriques calculés ne sont pas statistiquement significatives. Seuls deux de ces indices présentent une tendance à la hausse (SDII et P10) alors que sept autres (PTOT, PJP, PX1J, P20, P95p, P99p, P99,5p) présentent des tendances à la baisse.

Dans leur étude sur l'évolution des conditions climatiques extrêmes quotidiennes couvrant le sud et l'ouest de l'Afrique, New *et al.* (2006) ont montré que, globalement, la région connaissait une baisse significative des précipitations totales annuelles et du nombre de jours de pluie. Aguilar *et al.* (2009) arrivent aux mêmes conclusions lorsqu'ils analysent les précipitations de l'Afrique Centrale entre 1955 et 2006. Cette dernière publication est intéressante puisqu'elle est la seule trouvée dans la littérature à utiliser les données pluviométriques de la station de Butembo. Ainsi, les données utilisées pour cette station s'étalent de 1961 à 1992. Dès lors, d'une part, ces travaux se bornent à réaliser des analyses régionales, l'Afrique Centrale, dans ce dernier cas incluant diverses stations dont la répartition territoriale va du sud de la République Démocratique du Congo au nord du Cameroun. De telles agglomérations de données spatiales ne peuvent que donner une idée globale sur l'évolution des précipitations sans pour autant refléter la réalité d'une zone particulière, dont celle de Butembo proche de l'équateur. D'autre part, les résultats fournis par Aguilar *et al.* (2009) présentent des résultats sur une période de 52 ans alors même que les données de Butembo ne couvrent que 32 années et s'arrêtent en 1992. L'évolution récente des précipitations en « Afrique Centrale » pourrait dès lors ne pas représenter la tendance de l'est de la République Démocratique du Congo et de la zone de Butembo en particulier.

Au niveau plus « local », il ressort de la recherche bibliographique qu'aucune analyse climatique de la station de Butembo n'a été réalisée à ce jour. Il est donc indispensable de concentrer notre recherche sur les zones limitrophes en République Démocratique du Congo, en Uganda et au Rwanda. Les précipitations à Bukavu montrent une diminution non statistiquement significative des précipitations annuelles entre 1931 et 2003 (Sadiki *et al.*, 2010). Mais l'analyse s'arrête là puisque les données utilisées sont mensuelles. Ailleurs, dans

la zone occidentale de l'Uganda, non loin de Butembo, il appert que les précipitations annuelles enregistrées au 20^e siècle à Mbarara et Kabale ne présentent pas de tendance particulière (Kizza *et al.* 2009).

Les effets de cette variabilité climatique se remarquent au travers de l'évolution du niveau des lacs et des débits des rivières dans la région. Ainsi, une diminution a été observée dès l'année 2000 simultanément sur le lac Victoria et le Lac Tanganyika (http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir) consulté le 21 juillet 2011. Les modules des grands fleuves : Nil, Congo et Zambèze, encadrant la région, présentent des analogies, avec ceux de la Lukuga (Bigot *et al.*, 1998). Ainsi, les variations extrêmes des côtes du lac Tanganyika peuvent être associées aux conditions hydro-climatiques d'une vaste région étant donné qu'au regard de la variabilité interannuelle, l'Afrique de l'Est s'individualise, au sein du continent, comme une des régions présentant la plus forte variabilité et la plus forte cohérence spatiale (Assani, 1999). La région de Butembo étant située sur la crête Congo-Nil, déversant donc une partie de ses eaux dans le fleuve Congo et une autre dans le fleuve Nil, serait fort marquée par ces événements et aurait présenté des conditions climatiques similaires à celles qui prévalaient dans la région.

En revanche, les anomalies relevées dans le sens de la baisse se sont manifestées respectivement au cours des années 1960, 1965, 1968, 1983, 1993, 2000, 2002 et 2004, les trois dernières années de ces périodes moins arrosées ayant manifestement été caractérisées par des périodes plus sèches comparativement aux autres (Figure 3.1). Pour la période allant jusqu'aux années 1999, Mahé *et al.* (2001), Bigot *et al.* (1998) et Assani (1999) montrent des similitudes cadrant avec les périodes moins arrosées à travers la région. ACMAD (2010) estime que cette forte variabilité des précipitations observée ces dernières années dans la région peut engendrer des risques avec des effets néfastes tout au long des saisons, notamment sur les biens et les personnes (risques d'inondations), sur les végétaux et la santé publique (épidémies de malaria et autres maladies hydriques, notamment le choléra).

Actuellement, aux coulées de boues perturbant la circulation pendant les saisons pluvieuses s'opposent, pendant des saisons sèches, des problèmes d'accumulation des lithométéores dans la ville de Butembo où d'importantes concentrations de poussières occultent la visibilité et seraient à la base de la prévalence de diverses maladies. Ainsi, Elichegaray (2008) et De Longueville *et al.*, 2010 estiment que les particules ou poussières

sont de nature très diverses et peuvent véhiculer d'autres polluants comme des métaux lourds ou des hydrocarbures, avec toutes ses conséquences.

Au regard de l'évolution annuelle des précipitations et tenant compte du retour de pluies normales depuis 2007, on peut comprendre les représentations environnementales encrées dans la jeune population de Butembo. En effet, ce retour des précipitations normales fait suite à la période la moins arrosée de ces cinquante dernières années s'échelonnant sur la période coïncidant avec l'arrivée massive des populations fuyant l'insécurité dans les zones environnantes. Cet exode a conduit au dédoublement de la population en zone urbaine. Cet épisode actuel paraît donc exceptionnel pour une bonne part de cette population, notamment suite aux récentes inondations en ville, à l'amplification des ravinements et à la remobilisation du glissement de terrain de Kavitero.

En effet, La ville de Butembo est confrontée à des inondations de plus en plus fréquentes. Ces inondations sont à la base de désolations à la suite de l'importance des dégâts causés. En faisant un regard rétrospectif sur la pluie diluvienne du 6 octobre 2009 qui a causé des pertes économiques importantes, il ressort néanmoins sur base des analyses de fréquence de retour de précipitation que cette pluie de 70,2 mm ne revêt pas même un caractère anormal. Toutes les pluies qui caractérisent ces dernières années ont une période de retour de moins de 6 ans et sont donc statistiquement normales pour la ville de Butembo. Ce qui interpelle, c'est que ces inondations pourraient s'avérer encore bien plus dévastatrices en cas de précipitations réellement exceptionnelles ($\geq 103,7$ mm, voir Fig. 3.11). Cet aspect est développé dans le chapitre qui essaye de reconstituer cette inondation ressentie comme exceptionnelle par la population locale.

3.5. Conclusions partielles

L'analyse des périodes 1957-2010, 1957-1983 et 1984-2010 a clairement indiqué que la longueur de la saison de pluie a fortement subi une tendance à la baisse de l'ordre de 25 % essentiellement en petite saison pluvieuse pour la plus récente période. Elle se démarque distinctement des autres périodes même dans l'amplitude qui a subi un rétrécissement de l'ordre de 16,3 % témoignant ainsi du degré de vulnérabilité de plus à plus croissant.

Sept de neuf indices pluviométriques étudiés présentent des tendances à la baisse et seulement deux d'entre eux (SDII et $P \geq 10$ mm) présentent une tendance à la hausse sans que ces tendances soient statistiquement significatives. La quasi-totalité des événements pluvieux de ces dernières années ne présentent pas de caractères exceptionnels. Ils ont tous une récurrence de moins de 6 ans et sont donc 'normaux'. La récente augmentation des inondations dévastatrices serait donc liée au changement d'affectation des sols probablement couplée à l'absence de politique d'aménagement du territoire urbain.

L'approche utilisée nous a permis d'obtenir des résultats novateurs qui devraient soutenir des innovations pour une prise en compte des événements pluvieux dans l'aménagement du territoire urbain de Butembo. Néanmoins, il serait souhaitable d'étendre ces analyses à l'ensemble de la contrée. Malheureusement, des longues séries ne sont pas disponibles dans la contrée. Pourtant, ces données donneraient une valeur scientifique qui légitimerait et permettrait une analyse bien détaillée des phénomènes dans la région. Pour l'instant, tout en restant valable sur la zone urbaine, aucune extrapolation ne peut donc être faite pour des contrées très éloignées de la station météorologique de l'ITAV/Butembo.

Comme nous pouvons le constater, la pluie n'est donc pas à la base de l'accentuation des problèmes environnementaux qui perturbent la structure urbaine de Butembo. Or les ruissellements ne font qu'augmenter avec des conséquences énormes. Il s'avère donc utile de chercher à comprendre l'origine de cette augmentation du taux d'écoulement sur le territoire urbain de Butembo avant de chercher à comprendre les causes et les conséquences des risques hydrologiques y relatifs.

Chapitre quatrième

Genèse et effets érosifs des écoulements sur les versants

Chapitre IV. Genèse et effets érosifs des écoulements sur les versants

4.1. Introduction

4.1.1. L'importance du ravinement collinaire en Afrique

Les ravinements urbains ont connu une ampleur considérable dans leurs progressions au cours de ces dernières décennies et sont devenus un problème mondial. En Afrique, la plupart d'études de cas sont issues de la sous-région des savanes ouest-africaines (Ugodulunwa et Laka, 2008; Balzerek *et al.*, 2003) et de l'Afrique australe (Rowntree *et al.*, 1991). De nombreuses villes africaines à travers la région tropicale sont également confrontées aux problèmes de ravinement. Mais ces problèmes ne sont pas suffisamment connus. Pain (1979) et Van Caillie (1983), montrent comment, à la périphérie de la ville de Kinshasa, la conquête des pentes dans les zones d'occupation spontanée entraînait des forts ravinements. A l'heure actuelle, le ravinement en haute ville de Kinshasa atteint une densité de 0,5 km/km² et les ravins ont une largeur moyenne de 22 mètres et une profondeur moyenne de 8 mètres (Makanzu Imwangana, 2010). D'autres villes durement touchées par les ravinements sont Kikwit, Mbuji Mayi, Bujumbura, Kindu, Bunia, Lisala, Kolwezi, Uvira, et Kananga (Vandecasteele *et al.*, 2010; Vandecasteele *et al.*, 2011). La 'Natural Hazard Database for Central Africa (<http://www.africamuseum.be/collections/browsecollections/naturalsciences/earth/hazard>) montre bien le grand nombre de lieux et de villes en RDC, au Rwanda et au Burundi, affectés par le ravinement (Fig.4.1).

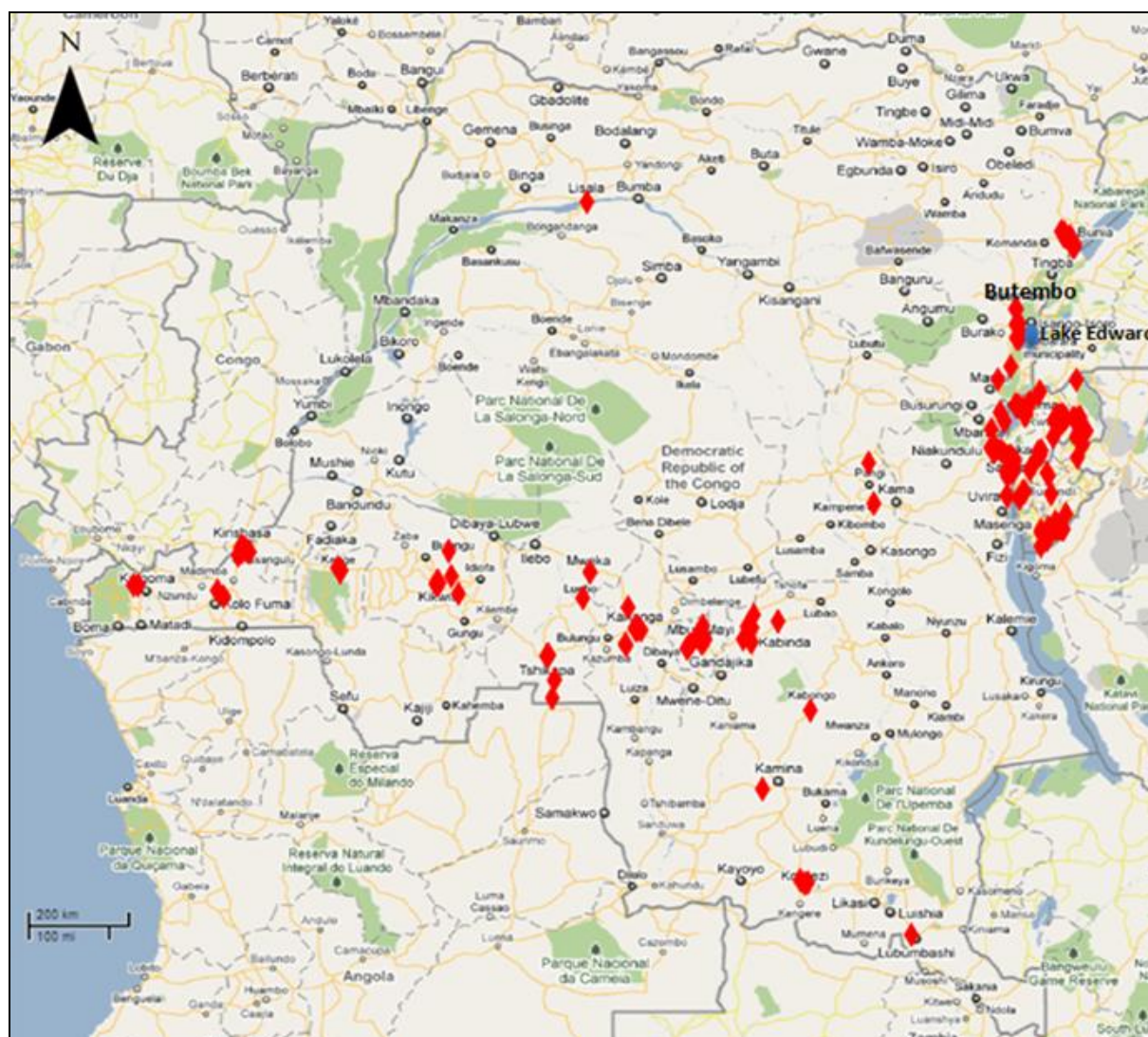


Figure 4.1. Villes durement touchées par des ravinements sévères en Afrique Centrale (Vandecasteele *et al.*, 2011).

4.1.2. La recrudescence du ruissellement en ville de Butembo

A Butembo, on constate que les débits de pic du ruissellement sont devenus de plus en plus importants au cours des années. Ces dernières années, le ruissellement sur les versants commence à déclencher un processus de ravinement le long des routes ou à partir des points où le ruissellement déborde latéralement de la route provoquant l'érosion progressive. Un écolier a été emporté par des ruissellements torrentiels sur l'axe routier Kisingiri-Mukuna en date du 6 octobre 2009. Son corps sans vie a été retrouvé dans les ravins en aval. Vingt-trois autres cas de noyade enregistrés entre 2008 et 2009 à travers la ville ont été en réalité causés par des ruissellements

torrentiels vers les bas des versants. Terrassés par des courants torrentiels, tous les corps sans vie sont retrouvés dans la basse ville après l'étiage.

L'allure croissante des débits de pic du ruissellement se confirme aussi dans une augmentation de la récurrence et de la taille des inondations dans les fonds des vallées. Comme le bassin versant de la Kimeni prend naissance en ville, ces inondations s'expliqueraient uniquement par le ruissellement généré sur les versants.

4.1.3. L'augmentation des débits du ruissellement : une tendance générale en Afrique centrale

L'évolution géomorphologique la plus évidente en cours en Afrique Centrale reste le changement de régime des rivières (Moeyersons, Trefois, 2008). Alors qu'il y a des décennies le débit d'étiage était important avec des crues modérées qui se manifestaient avec un retard, on assiste ces dernières années à des débits d'étiage bas et des crues éclairs et très puissantes comme illustré par la figure 4.2. Ce changement reflète une évolution dans l'alimentation des cours d'eau, caractérisée par un débit de source vers un débit de ruissellement (Moeyersons et Trefois, 2008).

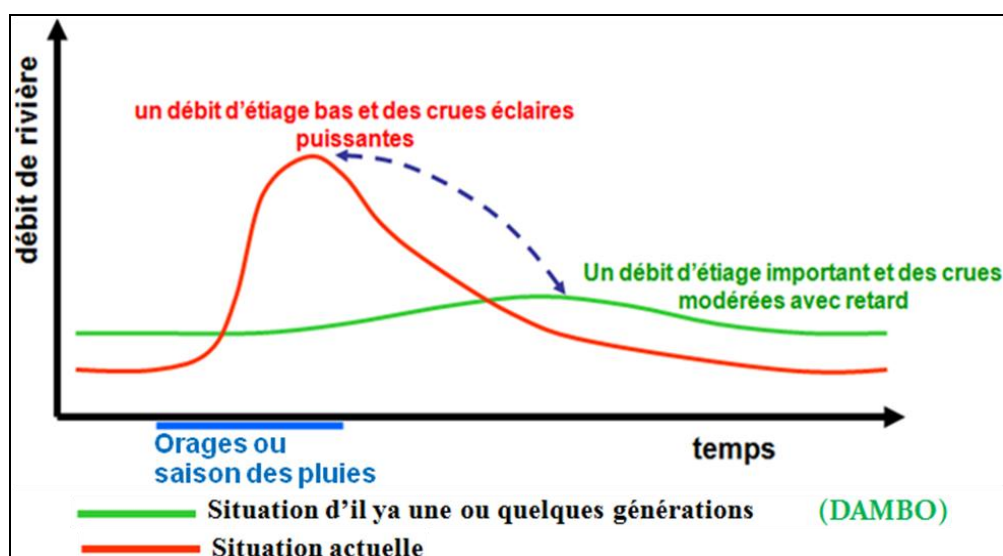


Figure 4. 2. Hydrographe présentant le changement du régime fluvial selon Moeyersons et Trefois (2008).

Ces auteurs indiquent également les risques hydrologiques induits par une augmentation des débits de pointe du ruissellement (Fig. 4.3).

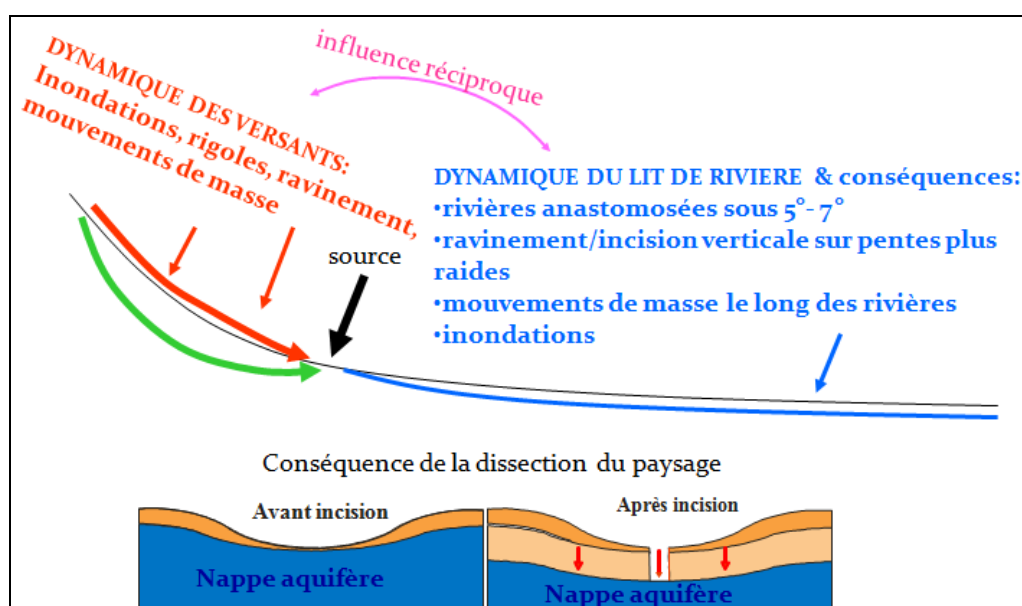


Figure 4. 3. Les risques naturels dus au changement du régime du ruissellement au niveau du territoire urbain (Moeyersons et Trefois , 2008).

Le débit de pointe des eaux de ruissellement peut théoriquement augmenter soit par une augmentation du coefficient de ruissellement soit par une modification de la configuration des précipitations. Dans ce dernier cas, deux options théoriques semblent se mettre en évidence : soit il y a une augmentation de la durée de la pluie, ce qui peut entraîner une amplification du ruissellement en continu plus qu'avant suite à la longue distance de connectivité entre la ligne de

partage d'eau et le fond de vallée, soit alors il y a une augmentation de l'intensité des pluies de pointe. En théorie, ces deux possibilités peuvent se produire conjointement.

Dans les processus liés à l'érosion par ravinement, de nombreux chercheurs estiment que le rôle du changement climatique est assez restreint comparé à celui du changement dans l'utilisation des sols (Poesen *et al*, 2003; Chaplot *et al*, 2005; Descroix *et al*, 2008; Vandekerckhove *et al.*, 2000). Aussi, à Butembo, rien n'indique de changements drastiques dans le régime des précipitations annuelles entre 1957 et 2010 (Fig.3.1), mais une tendance générale à une légère diminution dans le temps est manifeste. Cela correspond à une tendance statistiquement insignifiante au niveau régional (New *et al.*, 2006). Cette tendance à long terme masque une succession d'oscillations de court terme, dont les plus récentes comptent une période sèche de 2000 à 2005 avec une moyenne des précipitations annuelles de 1185 mm, et une période 'humide' de 2006 à 2010 pour laquelle les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à 1453 mm (Sahani *et al.*, 2011).

Par contre, il est connu que des changements dans l'utilisation du sol provoquent souvent une augmentation du coefficient d'écoulement. L'effet négatif de la déforestation sur l'infiltration et l'alimentation des sources a été montré pour plusieurs zones forestières au Rwanda (Rwilima & Faugère, 1981). Mais il va de soi que les augmentations du coefficient de ruissellement les plus importants sont à prévoir dans les villes à cause de la création de multiples surfaces durcies et imperméabilisées (Berthier *et al*, 2004; Rodriguez *et al*, 2003). En outre, l'urbanisation peut changer l'organisation naturelle de l'écoulement superficiel (Osmar *et al.*, 2010). Les routes et les fossés perturbent le drainage naturel et, par conséquent, peuvent concentrer les eaux de ruissellement dans les endroits où il n'y avait pas de problème avant, mais où, aujourd'hui, les structures urbaines sont gravement endommagées (Croke et Mocker, 2001; Osmar CJ, *et al*, 2010).

Moeyersons (1989) a décrit comment la perturbation du drainage naturel par des structures urbaines peut conduire à un ravinement progressif, c'est-à-dire un ravinement qui se développe à partir du point de relâchement des eaux vers l'aval. Ce développement se caractérise souvent par l'extension et la connexion ou fusion des marmites. Le ravin s'approfondit du haut vers le bas de la pente comme le montre les profils longitudinaux sur la figure 4.5.A. Le développement d'un ravin à partir du point de relâchement des eaux vers le bas de la pente est appelé ici « érosion progressive ». Les figures 4.4 et 4.5 présentent respectivement la concentration des eaux par les

routes avant leur relâchement et les différentes phases du développement d'un ravin par érosion progressive à partir d'un point où les eaux sont relâchées.

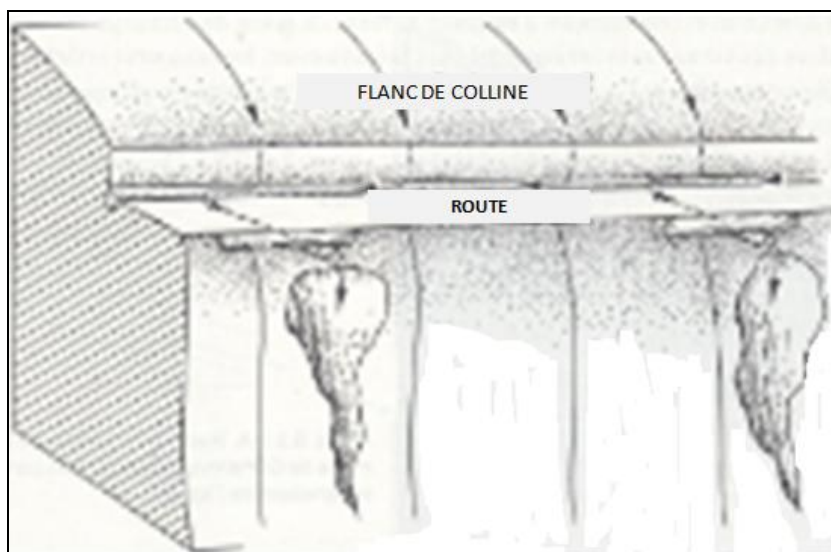


Figure 4.4. Les eaux de ruissellement, venant parfois d'une surface considérable, sont d'abord concentrées dans le fossé et puis relâchées en quelques points où elles s'incisent très vite (Moeyersons, 1989).

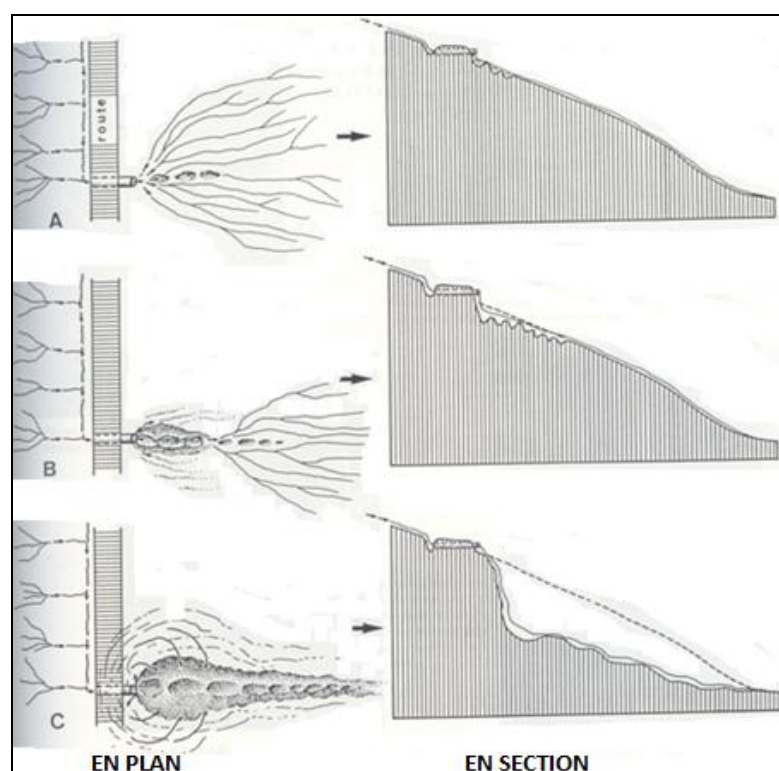


Figure 4.5. Les différentes phases du développement d'un ravin par érosion progressive à partir d'un point où les eaux sont relâchées (Moeyersons, 1989).

La figure 4.6 présente des petites marmites témoignant du ruissellement puissant sur les versants à Kisingiri (a) et à Vulumbi, cellule Kikuluba (b).

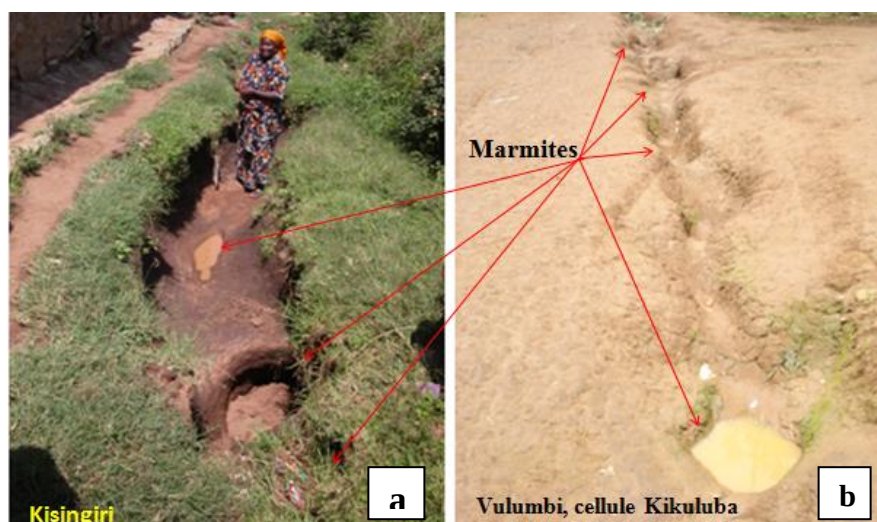


Figure 4.6. Les marmites sur les versants de Kisingiri (a) et de Vulumbi, cellule Kikuluba (b), à Butembo

La figure 4.7 présente les manifestations des écoulements torrentiels sur les versants de l'abattoir public de Butembo.



Figure 4.7. Manifestation des écoulements torrentiels sur les versants à l'abattoir public de Butembo.

- a. ruissellement rapide après collecte des eaux par les tôles des maisons et les rues ;
- b. ruissellement généré par la route et relâché sur la pente;
- c. concentration de l'eau de ruissellement en amont de la tête de ravine ;
- d. Les sentiers, en forme de terracettes, dus aux déplacements des bêtes bovines sont des endroits privilégiés de production de ruissellement.

4.1.4. Objectifs de ce chapitre :

Il a été démontré dans le chapitre sur la caractérisation des pluies que ce n'est pas le climat qui est à la base de l'augmentation du ruissellement et des inondations. En effet,

l'analyse des événements pluviométriques ne révèle pas une tendance à la hausse qui expliquerait une influence de la pluie sur les inondations récurrentes de ces dernières années. Au contraire 7 sur 9, soit 77,8% des indices analysés font état d'une tendance à la baisse. Ces assertions laissent supposer que les inondations de ces dernières années s'expliqueraient plus par l'imperméabilisation de la surface de la ville urbanisée.

Ce chapitre veut donc vérifier les hypothèses d'en haut sur le cas de Butembo.

1. Vérifier si l'urbanisation de Butembo a conduit à une augmentation des surfaces, aptes à produire du ruissellement et donc vérifier si l'urbanisation conduit à une augmentation du coefficient de ruissellement. Cette artificialisation de la surface sera contrôlée en SIG après traitement par deux méthodes : la classification par maximum de vraisemblance et le calcul de l'indice de végétation.
2. Etudier l'effet des routes sur l'organisation spatiale du ruissellement et ses effets érosifs; L'exemple du quartier de Kisingiri sera traité.
3. Etablir une carte des risques de ruissellement torrentiel (ANNXE III.2). La carte indiquera les routes, qui par leur position topographique, donc un critère qualitatif, risquent de créer des problèmes de torrencialité du ruissellement.

4.2. Matériel et méthodes

La variation spatiale et temporelle des états de surface est considérée comme une information capitale pour la compréhension de la genèse des écoulements à l'échelle de la parcelle ou des bassins versants (Corbane, 2006). Elle est facilitée par des approches combinant la télédétection et la connaissance du terrain. En effet, les images satellitaires permettent de disposer des données sur une vaste superficie de manière répétitive, ce qui permet de se rendre compte de l'affectation du sol au fil du temps sur une entité donnée. La télédétection apporte à cet égard une vision objective, exhaustive et répétée qui permet de définir notamment les caractéristiques de surface, importantes pour se faire une idée de manifestations hydrologiques sur un bassin versant. La méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance et la méthode de l'indice normalisé de végétation ont été privilégiées dans le cadre de ce travail.

Il se fait notamment que les structures urbaines, essentiellement les routes et les canalisations peuvent contribuer à des concentrations du ruissellement aux endroits

vulnérables (Moeyersons, 1991). Sur base de l'analyse de la situation à Kisingiri, ces zones sont indiquées sur la nouvelle carte topographique de Butembo (ANNEXE III) ainsi que d'autres endroits qui sont dans une position topographique-urbanistique semblable à celle de Kisingiri. Ces zones courent donc le même risque de ruissellement et de ravinement. Elles font l'objet d'une carte du risque de ravinement collinaire. Les axes routiers accentuant la torrencialité, soit par leur propre longueur ou la combinaison de l'effet de la longueur et de la collecte des eaux de ruissellement sur les versants des collines où sont concentrées les eaux, sont aussi indiqués. Il faut noter que certains axes principaux sont répertoriés, mais que la grande majorité des axes qui suivent la pente procèdent aux transferts rapides des eaux de ruissellement vers les zones vulnérables.

4.2.1 Classification par maximum de vraisemblance.

Pour cartographier les changements d'occupation du sol à Butembo, les images SPOT5 ont été exploitées. Seuls les canaux communs aux 4 images (vert, rouge et proche infrarouge) ont été comparés. Les changements ont été analysés sur l'intervalle 1987-2006, la plus ancienne image exploitable de Butembo datant de 1987 (couvrant la ville en $\frac{3}{4}$ dans ses limites administratives actuelles). Deux images acquises à des dates proches ont été combinées (1987 et 1989) afin d'avoir une couverture totale de la ville bien que l'image de 1987 couvre la totalité de la zone urbanisée à cette époque.

Les résolutions spatiales des images ont été harmonisées pour l'image composite 1987-1989 avec les images plus récentes à 10 m. L'orthorectification de l'image composite a été ensuite réalisée à l'aide de l'image de référence de 2006 et des points de contrôle du terrain (Bappel, 2005). Cette méthode de géoréférencement « image à image » permet d'optimiser leur superposition. La précision géométrique du décalage entre les deux scènes est finalement inférieure à 1 pixel, minimum requis pour une analyse des changements (Mas, 2000).

La définition des catégories, étape importante consacrée au recueil d'exemples d'apprentissage servant à créer les signatures spectrales des classes a été faite. Ces exemples d'apprentissage ont été déterminés en sélectionnant des zones représentatives qui ont été labellisées de manière interactive en se fondant sur la connaissance experte de la zone

d'étude. 7 classes ont été définies : 1. Urbain ; 2. Urbain avec végétation éparse ; 3. Champs ; 4. Bois ; 5. Sols dégagés ; 6. Nuages ; 7. Ombre.

La classification supervisée par maximum de vraisemblance (reconnue comme une des plus efficace dans le cas de milieux urbains, les informations spectrales des classes étant similaires) a consisté à classer les pixels en fonction de leur ressemblance avec les comptes numériques d'objets géographiques de référence préalablement déterminés sur l'image (aires d'entraînement). Le profil numérique des parcelles est alors supposé être représentatif du profil numérique de l'ensemble de la classe sur l'image. Les parcelles d'entraînement ont été définies sur les zones stables. Ce type de classification permet d'obtenir un modèle de classification représenté sous forme d'arbre de décision (ou des règles de décision) (Fig.4.8.a) facilement compréhensible et interprétable. Cette méthode est donc particulièrement utile dans notre contexte puisqu'elle facilite l'acquisition et la constitution de la base des connaissances sur les objets urbains.

Il s'est avéré nécessaire de procéder à la reclassification pour que les mêmes classes aient les mêmes symboles sur toutes les images. Avant de procéder aux calculs des superficies qui se sont faits par classe et par date, nous avons préalablement procédé à la vectorisation automatique des pourtours de toutes les zones classifiées renforçant la comparaison dans les conditions identiques et logiques.

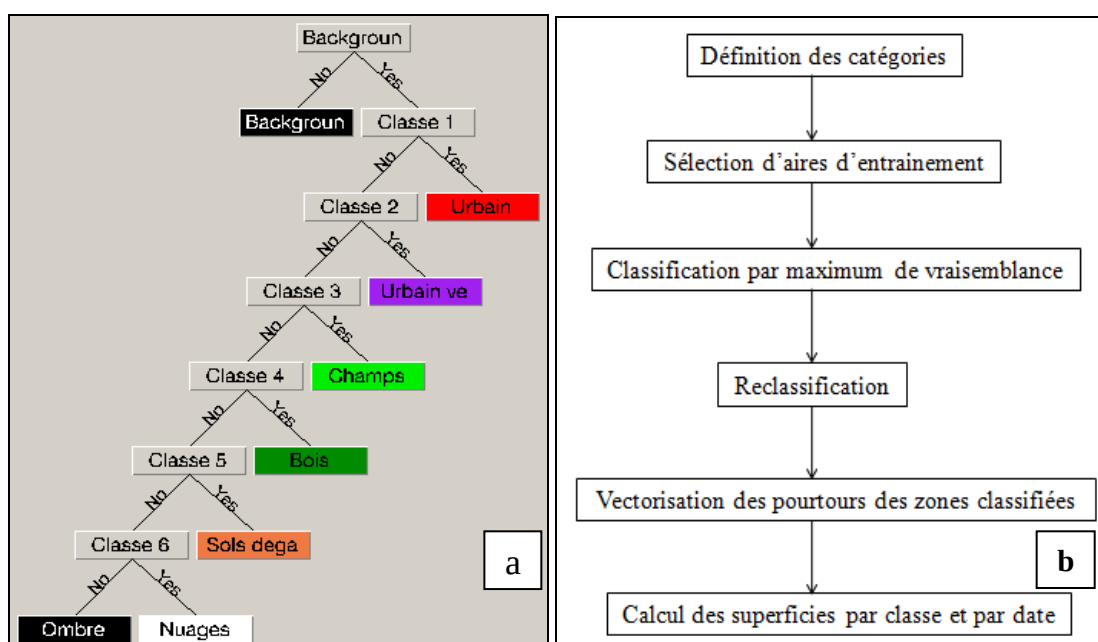


Figure 4.8. Méthodologie appliquée pour la cartographie de l'occupation du sol à Butembo en 1987 et 2004 par classification supervisée par maximum de vraisemblance. a). Arbre de décision pour la reclassification ; b). Représentation schématique de la démarche.

4.2.2. Méthode de l'indice normalisé de végétation

Parmi les indices de végétation proposés depuis les origines de la télédétection spatiale, l'indice de végétation normalisé (Rouse *et al.*, 1974) est devenu l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale. Cet indice, le plus souvent appelé NDVI, selon son abréviation anglaise, est calculé à partir des deux bandes spectrales, le rouge R et l'infrarouge IR selon la formule suivante : $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$ (Tricart *et al.*, 1996). Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que, d'une part, ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge, en fonction de la structure inter-cellulaire du matériel végétal photosynthétisant (Gausman, 1985). D'autre part, cet indice minimise la variation d'illumination en fonction du relief (Holben & Justice, 1981), mais reste sensible à la turbidité de l'atmosphère (Slater & Jackson, 1982 ; Jackson *et al.*, 1983 ; Crippen, 1988).

Diverses alternatives ont été proposées pour remplacer le NDVI (Kauth et Thomas, 1976 ; Richardson & Wiegand, 1977 ; Perry & Lautenschlager, 1984, Huette, 1988 ; Barret *et al.*, 1989). Les variations des propriétés spectrales des sols liées à leur couleur et à leur brillance perturbent considérablement la détection de la végétation éparse, dans les milieux hétérogènes, à l'aide des indices de végétation. Ces dernières années, une nouvelle génération d'indices de végétation (NDVI, PVI, SAVI, MSAVI, TSARVI, ARVI, GEMI et AVI) a été développée dans le but de minimiser ces effets (Bannari *et al.* 1996). Ces auteurs ont montré que le modèle de transfert radiatif de premier ordre constitue un excellent outil d'analyse et de compréhension des interactions entre le rayonnement électromagnétique, le couvert végétal et le sol nu. Ce modèle permet d'analyser l'effet de la couleur et de la brillance sur le facteur de réflectance et par conséquent sur l'indice de végétation. Ces mêmes auteurs ont trouvé que les indices GEMI, AVI, NDVI, ARVI et PVI sont moins performants pour la gestion d'un environnement à végétation éparse ou moyennement dense parce qu'ils sont entachés d'erreurs non négligeables liées aux propriétés optiques des sols nus. En revanche, les indices TSAVI, TSARVI, SAVI et MSAVI sont plus résistants aux changements des propriétés optiques des sols (couleur et brillance) et permettent de mieux discriminer le végétal du sol nu dans un environnement végétal épars et relativement complexe.

Toutefois, c'est le NDVI qui est sans doute le plus largement utilisé et notre choix a porté sur ce dernier étant donné que cela ne nous empêchait pas de discriminer les zones

urbanisées (sols nus et zones habitées) des surfaces non urbanisées (champs emblavés et boisement). Cet indice constitue une information de base précieuse pour la gestion de l'environnement végétal. Il s'avère un paramètre indicatif de la qualité de vie urbaine étant donné qu'il constitue un indicateur de l'état de l'environnement et une source d'information potentielle originale et utile aux urbanistes et aux aménageurs responsables de la protection des milieux naturels (Forester, 1983 ; Nicoloyanni, 1990). Son intégration dans le SIG ouvre la porte à des études détaillées et riches en milieu urbain (Gallo *et al.*, 1993). Il est utilisé essentiellement pour avoir un ordre de grandeur de surface susceptible d'accentuer le ruissellement.

Grâce à un seuil de NDVI adapté, les valeurs de réflectance de certains des pixels qui peuvent être proches de celles d'un sol nu ou bâti ont été identifiées. Il s'avère que les matériaux de construction n'ont pas des réflectances très divergentes excepté les nouvelles zones de construction ayant des nouvelles toiles. Mais, même cette indication prouvait un sol artificialisé étant donné que l'objectif est de se rendre compte de l'évolution de l'accroissement des surfaces productrices de ruissellement, notamment les sols nus et les zones d'habitation, comparativement aux zones pouvant atténuer le ruissellement (Champs emblavés et boisement).

Empiriquement, une valeur seuil de l'indice NDVI égale à 0.14 a été fixée pour les images SPOT/Végétation afin de faire la distinction entre le sol nu et la végétation clairsemée (<http://www.fao.org/ag/locusts/fr/activ/DLIS/satel/imgprod/index.html> (consulté le 25 septembre 2011), mais pour augmenter la possibilité de détails, une bonne connaissance de l'agglomération s'est avérée indispensable. De manière itérative, le seuil radiométrique -0,1 a été choisi étant donné qu'il permettait de bien discriminer les zones que nous connaissons parfaitement. Sur base de cette approche, la zone artificialisée a été extraite et l'image binaire a été élaborée, ce qui facilitait la comparaison des surfaces dénudées de leur végétation dans l'agglomération urbaine.

Pour comparer simultanément l'extension des surfaces artificialisées de 1987, 2004 et 2006, une composition colorée de ces trois trames urbaines a été faite. Elle permettait de comparer visuellement et de repérer des endroits où des changements se sont manifestés en rapport avec l'occupation du sol en termes d'urbanisation traduisant l'augmentation du bâti et/ou d'autres surfaces artificialisées. L'étalement urbain qui en résulte est mis en évidence à l'aide de l'image de 2006 par comparaison rétrospective avec les images 2004 et 1987.

Cette approche est intéressante car elle permet aussi de se rendre compte de la densification du bâti au sein même de l'agglomération urbaine, outre l'étalement dans les périphéries.

Notons qu'une carte qui indique l'utilisation du sol présente beaucoup d'intérêt puisque certaines fonctions, notamment les sols nus ou dénudés de végétation, les zones d'habitation et celles qui sont durcies et imperméabilisées ont des conséquences directes sur la qualité de l'environnement d'un lieu, notamment dans le domaine du transfert de l'eau à la surface et/ou dans l'accentuation du ruissellement.

4.3. Résultats

4.3.1. Changements d'occupation du sol à l'échelle du territoire urbain

4.3.1.1. Changement d'occupation du sol sur base de la classification par maximum de vraisemblance

La croissance urbaine globale a procédé sans régression, par implantation des nouveaux noyaux urbains, par étalement sur les marges et par comblement des espaces urbains interstitiels. Cette croissance s'est localisée préférentiellement le long des axes routiers d'abord (route vers Bunyuka via Muchanga et Kangote, route vers Beni et Butuhe, route vers Manguredjipa et Muhangi et route vers Katwa et Musienene) avant de connaître une généralisation sur presque toute l'étendue de la ville.

Corrélativement à cette croissance urbaine, la tache urbanisée au sens strict, sans végétation, est passée de 3,74 km² en 1987 à 5,27 km² en 2004 (Fig. 4.9), soit un taux d'accroissement moyen annuel de 2,04%. Les zones urbaines végétalisées sont passées de 29,14 km² en 1987 à 72,41 km² en 2004, soit un taux d'accroissement annuel moyen de 5,5%. Ces zones sont en réalité suffisamment loties et occupées par des maisons mais avec des bananiers et/ou d'autres essences ligneuses ou végétales. On note cependant une décroissance de surfaces occupées par des sols nus, les bois ainsi que les champs.

En considérant les zones urbanisées au sens strict ainsi que les zones urbaines végétalisées et les sols nus comme fortement imperméabilisées et capables d'avoir des répercussions sur le ruissellement, on constate que ces espaces rendus imperméables sont passés dans l'ensemble de 57,69 km² à 83,18 km² respectivement de 1987 à 2004. Cette

imperméabilisation de l'espace sur le territoire urbain a connu un accroissement moyen annuel de l'ordre de 2,18%. En revanche, une diminution des zones pouvant atténuer le ruissellement est fort marquée dans la ville entre 1987 et 2004. En effet, alors que l'espace occupé par les champs emblavés et les bois susceptibles d'atténuer le ruissellement était de 94,27 km² en 1987, il a été sensiblement réduit jusqu'à 68,79 km² en 2004 ; soit un taux de variation annuel moyen de l'ordre de -1,84%.

Dans sa trajectoire de croissance, la ville s'est étendue en empiétant aussi bien sur des espaces jadis affectés aux champs, aux boisements que sur les sols nus. Ceux-ci pour la plupart, représentent des parcelles aménagées par remblayage et déblayage avant une construction imminente d'une maison d'habitation. Ils sont aussi constitués de zones connaissant une concentration considérable de populations à des périodes régulières (zones de pèlerinage des mouvements chrétiens).

Sur la figure 4.9, sept types d'évolution sont encadrés. Les numéros identiques qui sont repris avec un signe témoignent, soit d'une stabilité, soit d'une nouvelle affectation du sol entre 1987 et 2004 au même endroit: 1) Cette zone n'a pas subi beaucoup de changement, le relief fort accidenté de la colline (Lwamiso) empêchant naturellement les maisons de s'y installer; 2) Projet d'aménagement d'un aéroport à Matembe dont les activités ont commencé en 2003 puis interrompues suite à des enjeux multiples ; 3) Ancien boisement maintenu intact depuis plus de 20 ans puis subissant l'effet de l'anthropisation depuis 2004, des champs étant aménagés tout autour ; 4) Boisement de Dada (Cafekit) depuis 25 ans en place, puis la coupe à blanc est intervenue en 2003; 5) Réserve forestière de l'ITAV longtemps restée inchangée malgré les dernières pressions anthropiques mais les environs proches sont fortement anthropisés depuis l'an 2000 ; 6). Densification urbaine par complément des espaces interstitiels (cas du bassin versant de la Wayimirya). Un thier au sud de ce bassin versant a été systématiquement déraciné et a laissé place à un marché sans végétation permettant ainsi une augmentation du taux d'écoulement superficiel; 7) Phénomène d'anthropisation par pèlerinage au Mont Carmel à l'Est de la ville où des campagnes de prières accueillent des milliers de fidèles laissant ainsi un espace considérable dénudé de sa végétation.

La vectorisation des pourtours de ces différentes zones a permis de calculer les différentes surfaces de façon diachronique et de se rendre compte de leur évolution dans le temps.

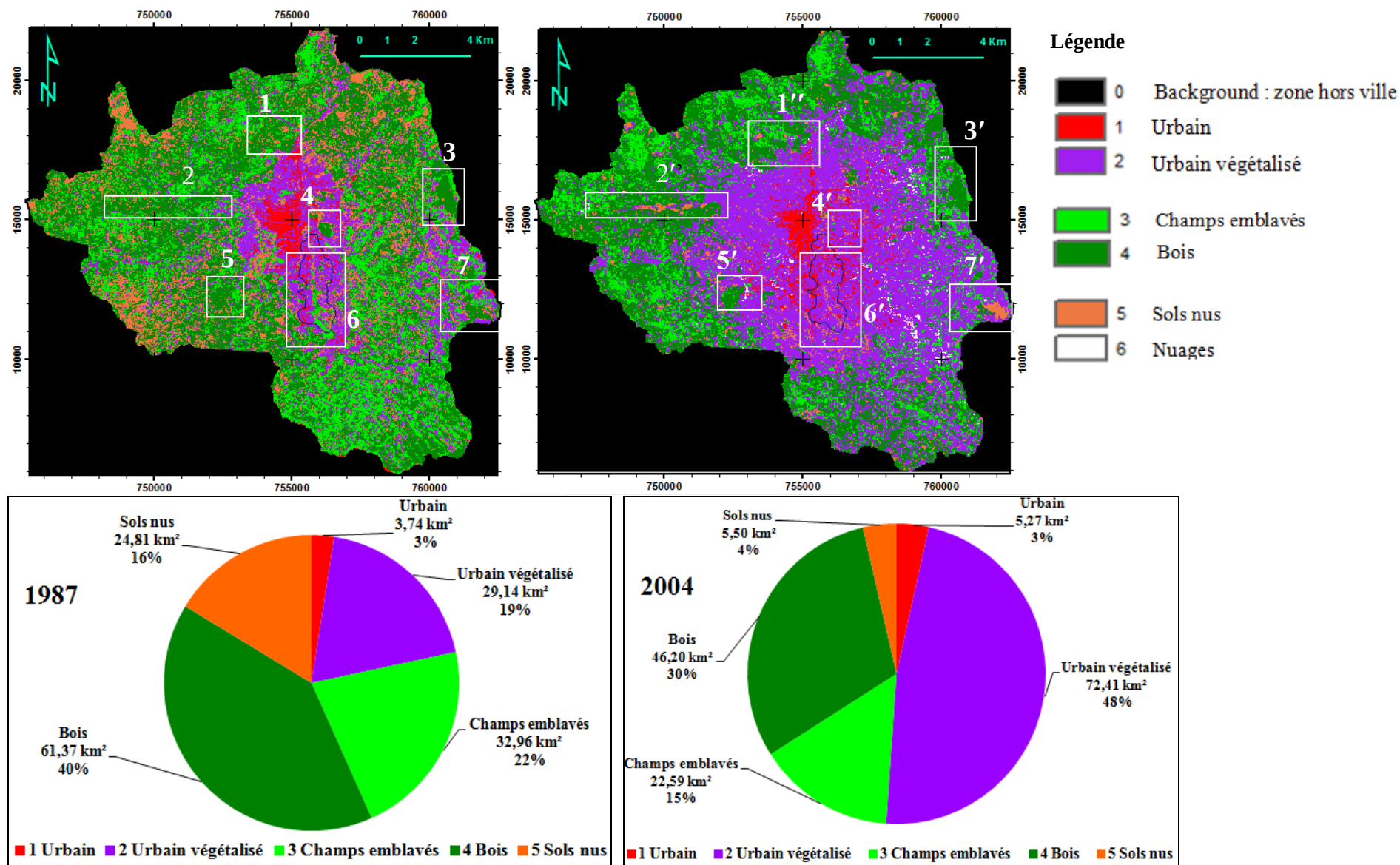


Figure 4.9. Occupation du sol en territoire urbain de Butembo en 1987 et en 2004

L'analyse de l'occupation du sol en ville de Butembo en 1987 et 2004 traduit une conversion de l'affectation du sol à l'intérieur de la zone urbanisée. Le tableau 4.1 présente cette évolution de l'occupation du sol. Elle est faite sur base de la surface planimétrique telle qu'on peut la lire sur une carte.

Tableau 4. 1. Occupation du sol en ville de Butembo en 1987 et 2004.

Catégories	Occupation du sol [km ²]		
	1987	2004	Différence
Urbain	3,74	5,27	1,53
Urbain végétalisé	29,14	72,41	43,27
Champs emblavés	32,96	22,59	-10,37
Bois	61,35	46,2	-15,13
Sols nus	24,81	5,5	-19,31

Cette conversion se traduit par:

- l'intensification et la concentration du bâti à l'intérieur des zones déjà urbanisées ;
- l'étalement urbain vers les franges agricoles et sylvicoles ;
- la dégradation des espaces naturels notamment les réserves boisées.

4.3.1.2. Analyse de l'urbanisation sur base des calculs de NDVI

Le lotissement de la ville de Butembo, quels que soient les acteurs (étatiques ou non) qui interviennent, se fait par octroi de parcelles individuelles de forme géométrique régulière ou irrégulière (rectangle, carré, triangle, trapèze...) selon la disponibilité et l'emplacement, et donne un aspect particulier à la trame urbaine de Butembo. Ce mode de lotissement, tout en n'étant pas mauvais en soi semble être consommateur de l'espace. Le plus souvent, ce sont des champs entiers ou des boisements qui sont lotis.

L'étalement urbain se traduit dans ce contexte aussi bien par l'augmentation de la surface du bâti ou des champs et des routes complètement dénudés de leur végétation. L'analyse faite par cette approche basée sur les calculs de NDVI au seuil de -0,1 montre aussi l'état d'une surface urbanisée en progression avec notamment une concentration du bâti ou des zones fortement artificialisées à l'intérieur des zones qui sont déjà urbanisées. Elle n'intègre toutefois pas les espaces verts bien qu'ils font partie intégrante de l'espace occupé par la ville dans ses limites administratives. Sur base de ce traitement, l'espace artificialisé est passé de 19,55 km² en 1987 à 35,27 km² en 2004, soit un taux d'accroissement annuel moyen

de l'ordre 3,5%. Cet accroissement reste dans le même ordre de grandeur, soit 2,18% obtenu par l'approche par classification pour la même période. Notons, cependant, que le taux d'accroissement annuel moyen entre 2004 et 2006 s'élève à 25,20%.

La figure 4.10 illustre l'évolution de la zone urbaine rendue imperméable dans la ville de Butembo en utilisant la méthode de NDVI avec une valeur seuil de -0,1.

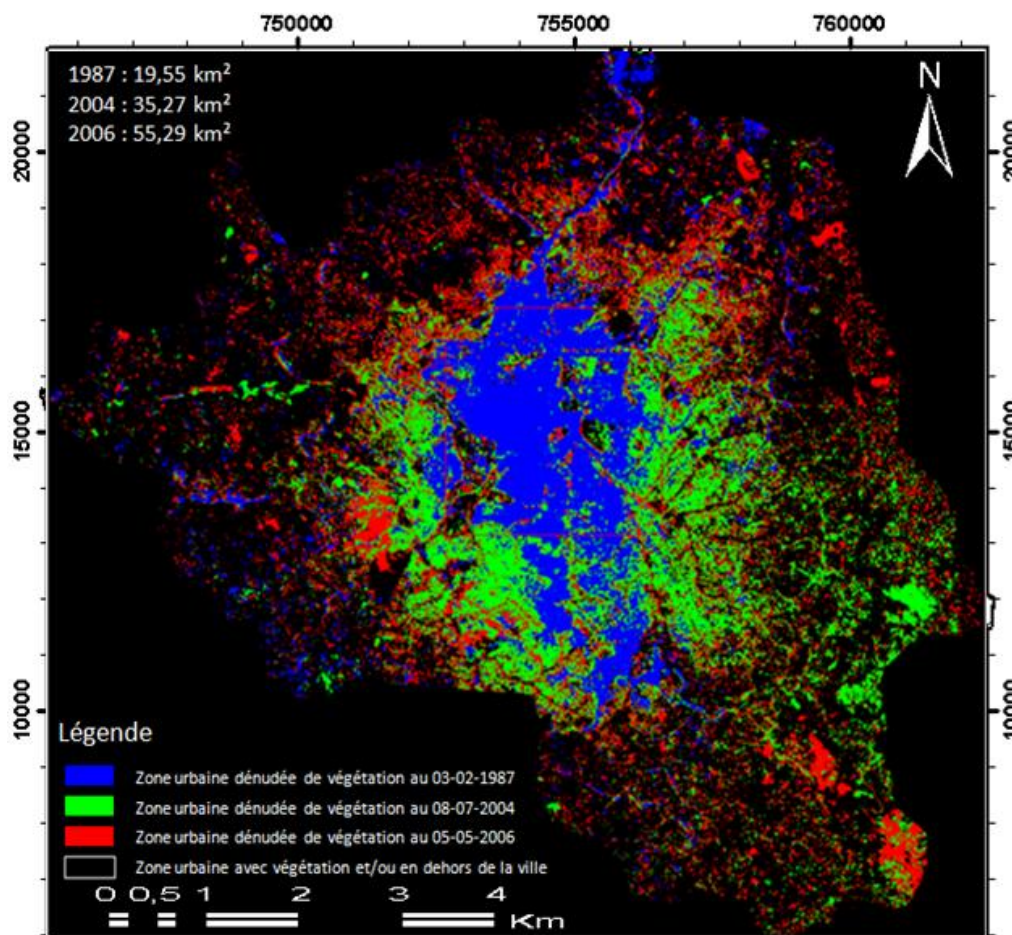


Figure 4.10. Evolution de la zone urbaine rendue imperméable dans la ville de Butembo en utilisant la méthode de NDVI avec une valeur seuil de -0,1.

Comme on pouvait le remarquer sur la figure 1.12, l'allure de la croissance aussi bien de la population et de la surface urbanisée était dans un équilibre dynamique et progressait presque simultanément de manière proportionnelle sans que l'une puisse prédominer sur l'autre pendant la période allant de 1975 à 1987. Cette situation se confirme dans le cadre du calcul basé sur le NDVI. En effet, les deux aires d'entraînement du bâti urbain sont presque identiques. Pour la même année 1987, les deux espaces urbains, 19,03 Km² et 19,55 Km² respectivement calculés sur base d'une approche interactive par numérisation manuelle et du mode de calcul du NDVI au seuil de -0,1 sont quasi égaux.

Le seuillage, bien qu'ayant d'abord fait preuve de résultats presque identiques pour la première période, a pourtant ensuite sous-estimé l'aire d'entraînement du bâti. Etant donné que cette sous-estimation s'applique aux images prises dans des conditions bioclimatiques comparables, du moins si l'on se rappelle qu'à Butembo les mois de mai et de juillet, sont caractérisés globalement par des faibles précipitations, il y a lieu, pour des raisons d'évaluation, de faire une comparaison dont l'image fait preuve d'une augmentation de la surface artificialisée.

Les trois espaces urbains fusionnés permettent de circonscrire conjointement les surfaces rendues imperméables de 1987 ; 2004 et 2006. Dans cette perspective, la comparaison visuelle des zones anthropisées est rendue aisée. Elle permet *in fine* de se rendre compte du changement d'occupation du sol à l'aide de l'image 2006 par comparaison rétrospective avec l'image de 2004, puis 1987. La densification des bâtiments et d'autres surfaces artificialisées, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de la ville est facilement repérable.

4.3.2. Etude de l'organisation de l'écoulement à Kisingiri

C'est un fait bien connu que routes, canaux et autres infrastructures contribuent à une réorganisation de l'écoulement superficiel des eaux. Cela mène souvent à la concentration du ruissellement aux endroits où auparavant, il ne se posait aucun problème. Le problème vient surtout de la conséquence du fait que les routes et les fossés des deux côtés ont la capacité de véhiculer de grandes masses d'eau, issues par exemple, d'une pente latérale vers un point bas sur la route qui agit comme une corniche. La figure 4.11 illustre le contexte du ruissellement avant les réaménagements de la route (1) et après (2).

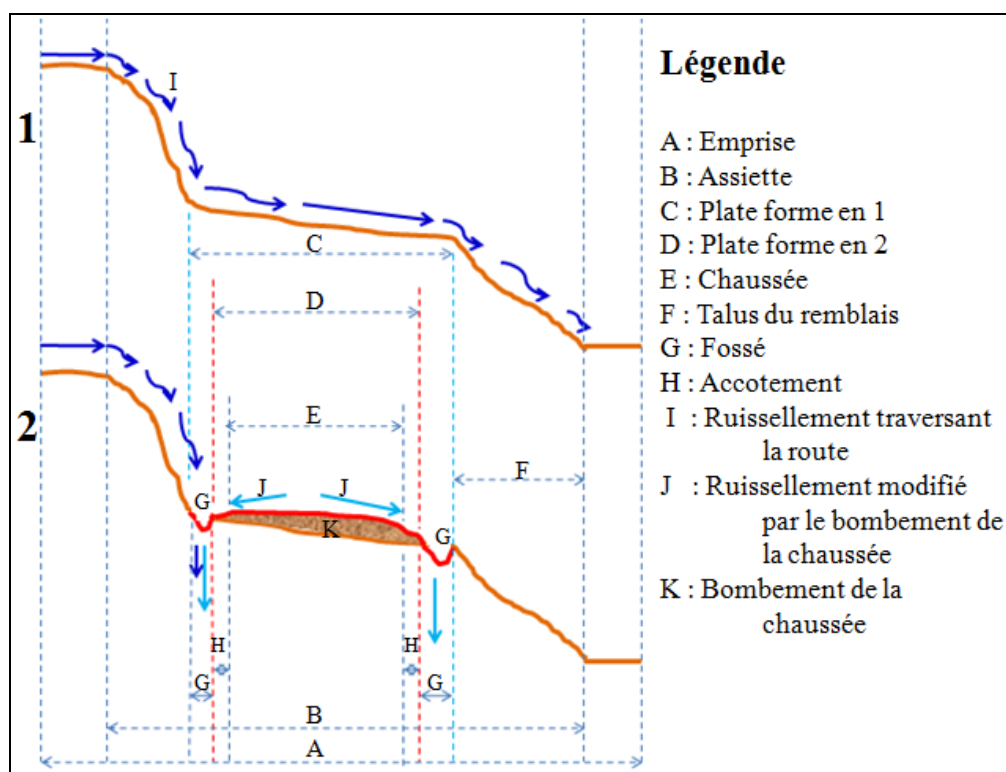


Figure 4.11. Influence du réaménagement de la route de Manguredjipa et modification de la direction du ruissellement.

croise la direction de l'écoulement naturel change la situation. Il arrive des cas où les routes constituant la trajectoire de prédilection des eaux s'incisent et modifient la route en ravine (Jungerius *et al* 2002 ; Nyssen *et al*, 2002). Dans d'autres cas, les eaux sont relâchées latéralement à partir de ce point bas sur une pente raide qui ne possède aucune protection contre le potentiel érosif d'un jet d'eau dont l'origine est entièrement artificielle. L'ampleur devient considérable lorsque les aménagements des routes en terre instaurent des fossés sur les bords des routes sans prendre les précautions d'aménager les caniveaux aux endroits appropriés. Les études de Moussa *et al.* (2002) montrent que les fossés accélèrent le ruissellement en concentrant les écoulements et en facilitant les connexions entre différentes unités hydrologiques du bassin versant. Il s'ensuit, outre les autres conséquences du ruissellement, un déficit de recharge des nappes phréatiques (Chaib, 1977).

Dans cette partie de la thèse, nous analysons la réorganisation des écoulements au quartier de Kisingiri. Un enfant a été emporté et tué par un jet torrentiel de ruissellement causé par la concentration de l'eau par la route ADB en D (Fig. 4.12).

La figure 4.12 montre la partie du quartier de Kisingiri en question. La route ADB menant vers Mukuna occupe le flanc oriental d'un cirque de source et suit grosso modo les courbes de niveau. Mais la route n'est pas horizontale. Les points A et B sont deux points culminants et le point D est plus bas. La longueur de la route entre les points A et B est de 536 m. En bleu transparent est indiquée la surface drainée qui passe entre les points A et B. La surface drainée s'étend jusque dans la vallée. En cas d'absence totale de tissu urbain, on pourrait s'imaginer un écoulement superficiel diffus à partir des sommets S1 et S2 et du col au point C vers la vallée, en passant par la section AB. En cas d'écoulement parfaitement diffus, la section AB de 536 m de longueur drainerait donc la surface ADBS2CS1, qui est de 103941 m². 1 m de section devrait donc en principe drainer 194 m². Mais la présence de la route ADB qui croise la direction de l'écoulement naturel, change la situation.

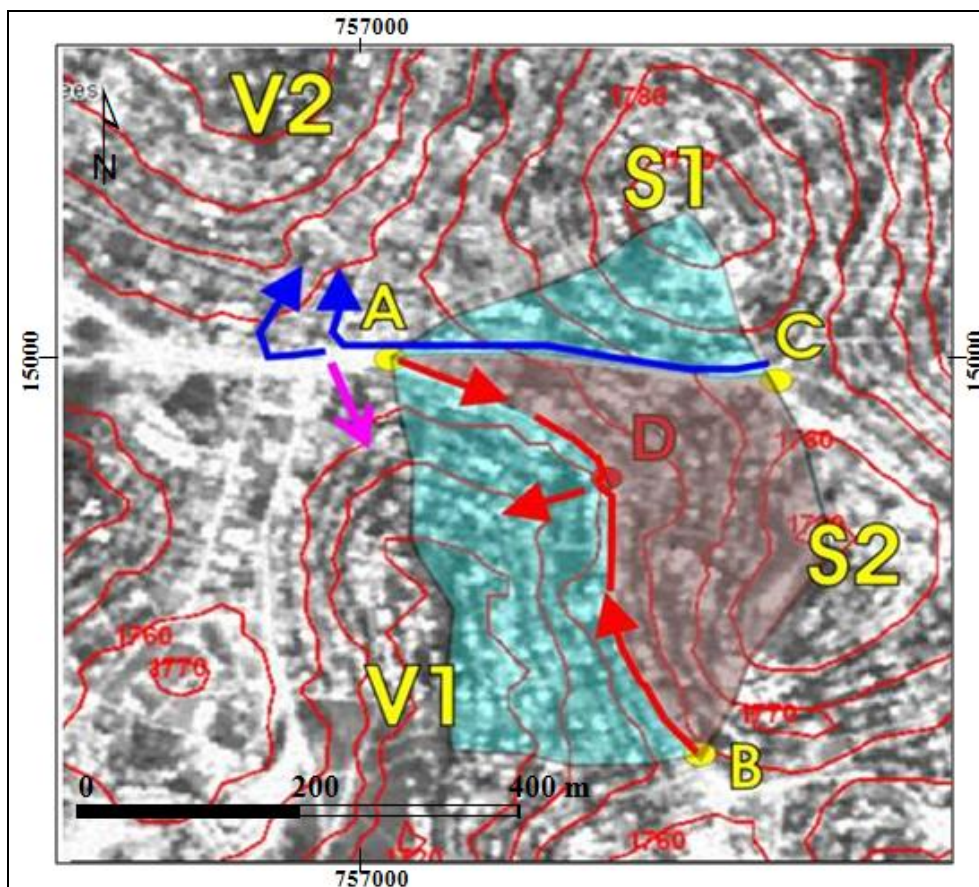


Figure 4.12. Réorganisation du ruissellement par les routes dans le bassin versant de Kisingiri à Butembo.

La Figure 4.12 montre comment la route ADB ne laisse pas passer le ruissellement mais le conduit selon les flèches rouges vers son point le plus bas en D d'où il relâche les eaux librement sur une pente de 15°. Ainsi, la section transversale de passage du ruissellement se réduit à 2 m environ (Fig. 4.13). En tenant compte du fait que artificiellement la route AC

dévie (flèches bleu foncé) les eaux venant du sommet S1 vers la vallée V2 (Vatolya), la surface drainée par la section de 2 m en D (Kisingiri) se réduit à 71070 m², ou 35535 m²/m. Par cette configuration des routes, la surface drainée en D est donc montée de 194 m²/m à 35535 m²/m, c'est à dire une multiplication par un facteur de 182.

Le caniveau qui est en train d'être aménagé au niveau où se trouve un « pseudo col » va augmenter sensiblement la quantité d'eau qui est déviée vers la vallée V1 (flèche rose). Ces travaux vont dramatiquement exacerber les risques de ravinement collinaire et auront des répercussions quasi irréversibles sur les ravinements progressifs.

En plus, on observe sur le terrain que les surfaces qui génèrent le plus de ruissellement sont les surfaces des routes durcies, leur capacité d'infiltration étant sensiblement réduite. Un simple calcul permet de saisir que seule la production de ruissellement par la route peut générer en D un torrent ayant un débit considérable. La route étant large de 5 m au niveau de la section considérée, avec une longueur de 536, m signifie alors une surface de 2680 m². En prenant en considération le cas de la pluie du 6 octobre 2009 qui a provoqué une inondation dans les fonds de vallée, on arrive à une intensité moyenne de 70,2 mm en 150 minutes, ce qui signifie un apport de pluie sur la route de 0,008 l/s par m² du tronçon de route considéré, ou encore 20,9 l/s de débit en D.

Etant donné que pendant la première partie de la pluie on a probablement atteint des intensités de l'ordre de 200mm/h, on arrive à un débit de pic en D pendant la partie la plus intense de l'orage, soit 150 l/s. Il s'agit ici seulement de la contribution par la surface de la route. A cela il faut ajouter le ruissellement généré par la surface de drainage entre la route ADB et AC. Cette surface est de 71070 m². En admettant un taux d'écoulement de 10%, ce qui n'est certainement pas une exagération pour un quartier plein de routes et de parcelles habitées, on peut déduire que la contribution de cette surface pendant la tranche de l'orage de 200mm/h, était de 395 l/s. On comprend donc que le débit au point D de débordement peut facilement atteindre les 500 l/s, ce qui suffit pour emporter un enfant ou creuser des marmites dans le sol.

La figure 4.13 présente la situation de collecte d'eau par les routes à Kisingiri immédiatement en amont de la rue dans laquelle s'engouffrent les eaux de ruissellement. La route à ce niveau fonctionne comme une corniche.



Figure 4. 13. Route Kisingiri-Mukuna : point de débordement de la route fonctionnant en corniche.

Il est à noter que sur la figure 4.13, la route AC drainant une partie du bassin original de la vallée V1 vers la vallée V2 fonctionne en fait comme ‘corniche’ du sommet S1 et relâche ses eaux au pied de colline, une situation typique de ‘col’, quoique dans ce cas-ci, il ne s’agit pas d’un vrai col puisqu’il n’y a plus de colline du côté Ouest de l’endroit où les eaux dévalent dans la vallée (flèches bleu foncé à la Figure 4.12).

Actuellement, le caniveau a modifié cet écoulement et toutes les eaux de ruissellement sont canalisées vers la vallée V1 (Kisingiri) (flèche violette). Les dégâts sont déjà bien manifestes aussi bien sur le versant de la colline (érosion progressive) par la formation des marmites, que dans la vallée de Kisingiri par érosion régressive.

Les autres sites similaires à la base des érosions progressives catastrophiques se trouvent sur les collines de Ngere et sur l’axe Abattoir-Katsya (Fig.4.14).



Figure 4.14. Ravines collinaires liées au ruissellement torrentiel. a). Colline de Ngere ; b). Axe routier Abattoir-Katsya à la latitude de Kasongomi.

4.3.3. Axes routiers de torrentialité potentielle

La carte produite indique les routes principales, qui par leur position topographique, donc un critère qualitatif, risquent de créer des problèmes de torrentialité du ruissellement (ANNEXE III) Il s'agit d'un inventaire des routes principales qui fonctionnent comme des corniches à travers la ville. Les routes augmentant la torrentialité par leur propre longueur sont aussi inventoriées. La carte en (ANNEXE III.2) répertorie les axes routiers principaux. Mais il faut noter que tous les axes routiers qui suivent la pente procèdent aux transferts rapides des eaux vers les vallées. Certaines d'entre elles présentent déjà des marmites, au niveau des collines, le long du parcours.

Comme le souligne Bocher *et al.* (2007), en développant les effets des éléments linéaires permanents, la route affecte significativement les processus hydrologiques et géomorphologiques. Elle est souvent identifiée comme la cause de l'accélération des transferts de surface et de l'augmentation des transports de sédiments vers les cours d'eau. La position topographique de la route par rapport au versant va dans ces conditions définir son action sur les écoulements de surface. Dans le cas où la voirie est dans l'axe de l'écoulement naturel, donc dans le sens de la pente, elle est conductrice et va accélérer l'écoulement. Si elle est perpendiculaire à l'axe de l'écoulement, elle pourra agir comme un obstacle en créant une cuvette artificielle sur l'un de ses bords comme dans le cas de Kisingiri.

4.4. Conclusions partielles

4.4.1. Les causes fondamentales de l'augmentation du ruissellement

Même s'il est difficile de mesurer de façon précise les facteurs anthropiques, ceux-ci sont les éléments déclencheurs du phénomène du ruissellement sur les versants dans la ville de Butembo. L'analyse des événements pluviométriques révèle une tendance à la baisse. On ne pourrait donc pas attribuer la recrudescence du ruissellement aux pluies, comme laisse croire l'opinion de la population urbaine de Butembo, toutes les pluies de ces dernières années ayant un caractère normal pour la contrée. Ce n'est donc pas le climat qui est en cause, mais bien l'urbanisation. Cette urbanisation agit de deux manières différentes :

1. elle conduit à une augmentation du coefficient de l'écoulement : des pluies de même intensité pic produisent des débits de pic croissants ;
2. les routes forment des allées privilégiées des eaux de ruissellement. Elles augmentent la connectivité hydrologique des bassins versants et transfèrent les eaux de ruissellement vers les zones vulnérables dans un laps de temps plus court.

4.4.2. L'effet de l'urbanisation sur la disponibilité en eau sur les collines

L'urbanisation affecte significativement l'écoulement superficiel des eaux. L'infiltration et l'alimentation de la nappe phréatique deviennent de moins en moins faibles. La position topographique des routes par rapport au versant va définir l'action érosive des écoulements de surface. Les routes vont occasionner des ravinements progressifs. L'incision créée par cette érosion progressive, lorsqu'elle accède à la nappe phréatique, va sensiblement abaisser le niveau atteint par cette dernière déjà affectée par une sous-alimentation liée à une très faible infiltration. Il va s'ensuivre un abaissement accru avec des répercussions sur la disponibilité en eau dans les collines.

4.4.3. L'effet de l'urbanisation sur l'érosion par le ruissellement des versants

L'analyse de la situation à Kisingiri permet de conclure en ces termes :

1) Par leur propre longueur, les routes qui sont dans l'axe de l'écoulement naturel sont conductrices des eaux de surface et accélèrent les transferts d'eaux sur les pentes en exacerbant la torrencialité.

2) Celles qui sont perpendiculaires à l'axe de l'écoulement agissent comme des obstacles et dans les conditions particulières, en créant une cuvette artificielle, elles fonctionnent en corniche. Par le relâchement des eaux en aval de celles-ci, un ravinement progressif se produit.

Le cas de Kisingiri traduit la réorganisation des écoulements de surface et donne une indication des risques collinaires qui sont susceptibles de perturber de façon dramatique la

structure urbaine déjà entamée par les effets néfastes qui se produisent dans les fonds plats des vallées. Si les écoulements de surface ne sont pas maîtrisés, ce cas typique montre comment des sections mouillées suffisamment réduites continueront à surprendre les riverains dans les zones collinaires où des cas de noyade à la suite de torrencialité risquent de devenir récurrents.

4.4.4. Prévisions et carte des risques

Cette carte se trouve en ANNEXE III. Elle présente les axes routiers favorisant la torrencialité. Les routes sont indiquées à présent sur base d'un jugement qualitatif.

4.4.5. Interventions possibles

Les stratégies de mitigation devraient s'inscrire dans les programmes visant à réduire très sensiblement la genèse du ruissellement. En plus, les actions à mener devront aussi éviter toute concentration de ruissellement. L'aménagement des caniveaux devra être solide et continu jusque dans les fonds des vallées où une bonne base servirait à atténuer la vitesse de l'eau.

Chapitre cinquième

Ravinement de fond de vallée à Butembo : Causes et conséquences

Chapitre V : Ravinement de fond de vallée à Butembo : Causes et conséquences

5.1. Introduction

5.1.1. Problème de ravinement de fond de vallée à Butembo

A Butembo le ravinement de fond de vallée ne présentait pas un risque majeur il y a 60 ans. Désormais, ce phénomène s'amplifie d'année en année et génère des problèmes connexes, notamment les affaissements ainsi que d'autres types de mouvements de masse. On se demande d'ailleurs si l'incision verticale dans les dambos ne conduit pas à une pénurie en eaux dans les fonds de vallée. L'incision linéaire est très active, dans les dambos. La figure 5.1 présente le réseau de dambos au niveau du territoire urbain. A l'heure actuelle, il n'existe pas encore une connectivité entre les incisions linéaires dans les dambos et les ravinelements dans les collines. Mais à considérer la dynamique actuelle de ces deux types de ravinement, on peut prévoir dans un avenir non lointain la fusion des deux systèmes. On remarque sur le terrain que le ravinement des fonds de vallées s'étend par recul des têtes vers les bords des dambos, alors que le ravinement collinaire s'étend progressivement vers l'aval pour y rejoindre dans l'avenir les têtes du ravinement régressif. La figure 5.2 illustre quelques exemples de ravinement de fond de vallée rencontrés dans la ville de Butembo.

Les ravinelements de fond de vallée font des ravages au niveau des avenues et des ponts. Des répercussions se produisent aussi sur les lignes de courants électriques et les conduites des eaux. Suite aux affaissements récurrents le long des ravins, des dizaines de maisons subissent chaque année des conséquences dommageables dans la zone urbanisée.

Le rapport de la cellule de crise de l'administration urbaine révèle que pour la période 2008-2009, des dommages d'une valeur de 481300 \$ ont été causés par les ravinelements à Butembo, notamment la destruction de 102 ponts en bois (15 300 \$), 4 ponts construits en matériaux durables (200 000 \$), 42 maisons en pisés (126 000 \$) et 7 maisons en matériaux durables (140 000 \$). Les décès causés par des noyades et dont les corps sans vie sont retrouvés dans les ravins ainsi que des pertes de bétail et d'autres biens n'ont pas été pris en compte dans ce total. Des quartiers entiers sont isolés les uns des autres à la suite de ravinement. Le coût des infrastructures appropriées peut être considérable. Ces dommages constituent un frein pour le développement durable de la circonscription urbaine et perturbent

considérablement la structure urbaine. Ils génèrent localement des atteintes psychosociales préjudiciables à la santé.

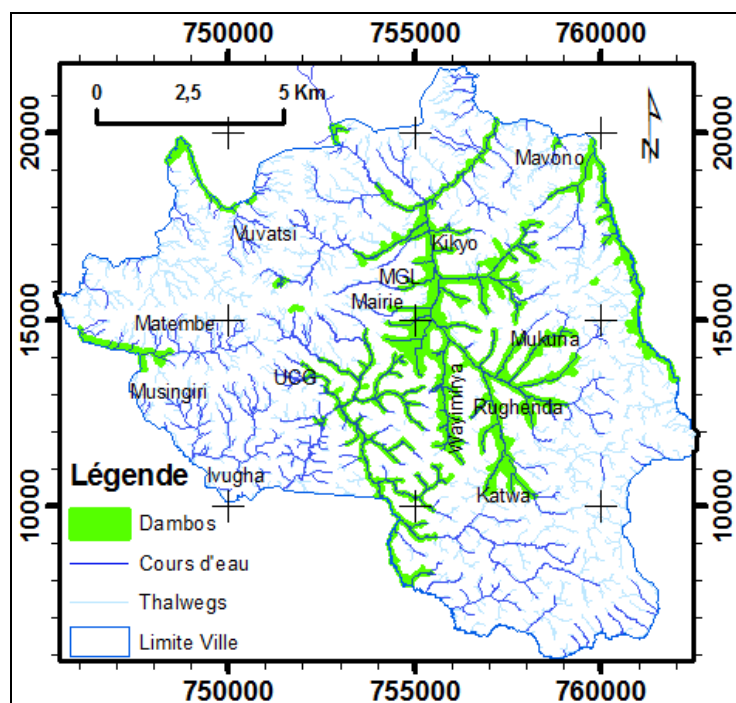


Figure 5. 1. Réseau hydrographique et systèmes des dambos en ville de Butembo.



Figure 5. 2. Quelques exemples de ravissements rencontrés dans les dambos à Butembo.

a) Ravin longeant une rue à Butembo sur le bord d'un dambo ; b) Stratification nette sur un profil, preuve de l'incision verticale intense dans le dambo de la Wayimirya à l'école des kimbanguistes ; c) Incision latérale et verticale très active à Kaputru dans la vallée de la Wayimirya (en avant plan : tourbière en déliquescence dans le dambo) ; d) système de ravissement à l'abattoir public de Butembo.

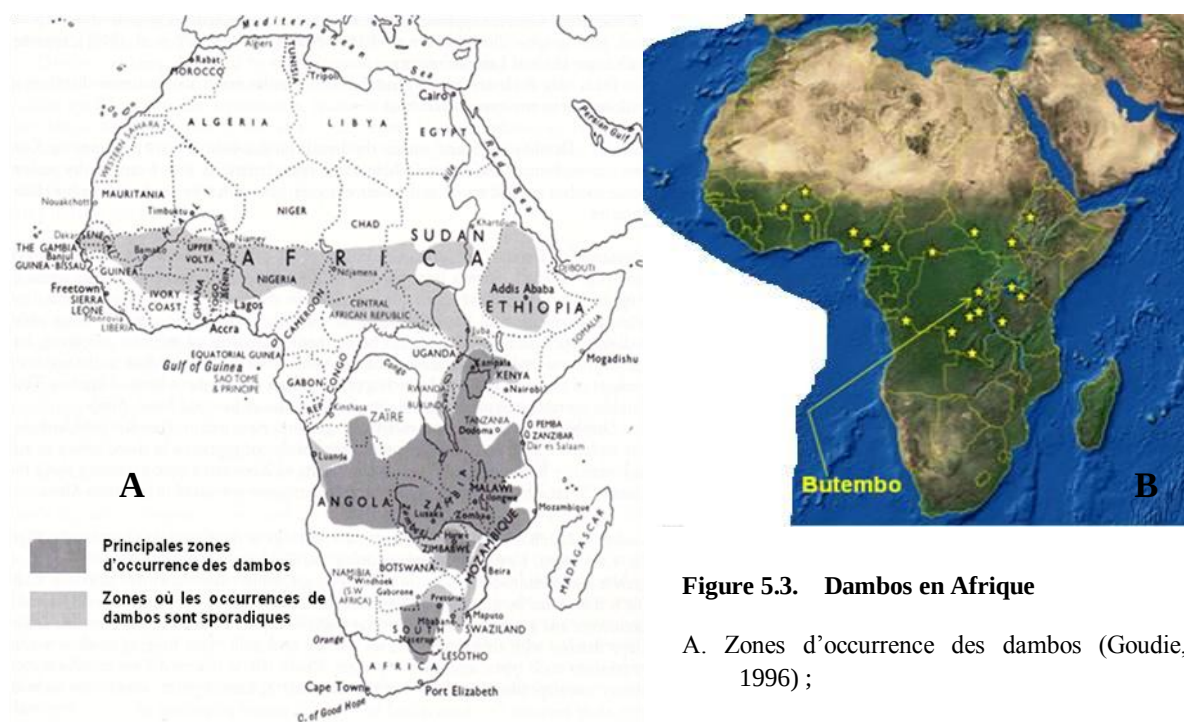
5.1.2. Contexte général du ravinement en Afrique centrale

Dans de nombreuses régions d'Afrique, on rencontre des anciens réseaux fluviaux « dambo » (Acres *et al.*, 1985), «fond de vallées tropicales» ou «marais des bas de vallées» (Raunet, 1985), caractérisés par un petit chenal des vallées.

Le mot dambo est un concept Bantu qui a été utilisé pour décrire les prairies se trouvant dans les parties amont au sein des bassins versants en Afrique centrale. Ce mot a été adopté en géomorphologie pour décrire des dépressions larges à fond plat peu profondes et principalement linéaires dans les zones régressives des cours d'eau. Ce terme est probablement synonyme d'autres noms locaux tels que *mbuga* en Afrique de l'Est comparable au terme français « bas-fonds » (Goudie, 1996). A Butembo, dans la langue locale « *kinande* », une zone aux caractéristiques similaires à celles-ci est dénommée « *Kitovero* ».

Ces vallées et leurs vestiges ont été - et sont encore aujourd'hui - caractérisées par la présence saisonnière ou même pérenne de l'eau liée à l'affleurement de la nappe phréatique vers les côtes les plus basses de la vallée. Sur le plan stratigraphique, ces fonds des vallées sont marqués par la superposition des alluviaux/colluviaux principalement argileux, parfois sous forme d'horizon vertique ou des couches de tourbes. La figure 5.3 présente les principales zones d'occurrence des dambos ainsi que les régions où Moeyersons et Trefois (2008) ont déjà observé les dambos qui sont affectés par des ravinelements de fond de vallée.

Moeyersons (2001) mentionne des dépôts tourbeux au Rwanda, âgés de plus de 5 ka BP à la base. D'autres descriptions de dépôt de dambo viennent du Nigeria (Van Noten et De Ploey, 1977) et de l'Éthiopie (Carnicelli *et al.* 2009). Le réseau de dambos rencontré à Butembo est illustré par la figure 5.1. Les manifestations des incisions verticales et latérales dans ces dambos sont illustrées par la figure 5.2. Dans le dambo de la Wayimirya (Fig. 5.2b), les stratifications des couches de tourbe et de grandes terres tourbières, caractérisées par une forte conductivité hydraulique, sont nettement identifiables. Selon Acres *et al.*, (1985) et Raunet (1985), l'hydrogramme d'un dambo montre un débit de base relativement constant et la réponse aux inondations retardées et limitées à la pluie, les tempêtes ou une saison des pluies. Ce retard est dû au fait que les vallées sont principalement alimentées par des sources.



Les dambos étaient hydrologiquement compatibles avec les conditions humides en Afrique sub-saharienne au cours de la première moitié de l'Holocène (Moeyersons *et al.*, 2010). Aujourd'hui, les hydrographes dans le sous-continent montrent des pics beaucoup plus élevés, liés à des crues soudaines, alors que le débit de base est resté plus bas qu'auparavant, voire inexistant (Fig. 4.2).

5.1.3. Objectifs de ce chapitre

Ce chapitre veut traiter le problème du ravinement de fond de vallée en milieu urbain de Butembo en s'appuyant sur trois aspects fondamentaux :

- 1) Vérifier l'effet de l'urbanisation sur l'augmentation du ruissellement et sur le risque de ravinement de fond de vallée en s'appuyant sur deux aspects :
 - Comparer l'extension spatiale des réseaux de ravins et l'accroissement de l'emprise urbaine pour les années 1957; 2005 et 2008.

- Comparer le taux d'incision à long terme et le taux d'expansion du réseau des ravins pour la période 2005-2009 incluant la période de retour de précipitations normales pour la ville.
- 2) définir la dynamique de la nappe phréatique dans le dambo raviné de la rivière Wayimirya au cours des dix dernières années en s'appuyant sur des observations faites sur onze sources et trente et un puits. En effet, Il est généralement admis que l'incision des ravins de fond de vallée conduit à des problèmes d'eau, spécifiquement le long de la ravine, mais aussi dans la vallée en général (Avni, 2005), et que l'abaissement de la nappe phréatique le long des ravins, réduit la disponibilité en eau. Ces changements ont des conséquences économiques graves et peuvent perturber les moyens de subsistance (Valentin *et al.*, 2005).
- 3) Déterminer les causes fondamentales de ravinement dans les fonds des vallées

5.2. Matériels et méthodes

5.2.1. Cartographie diachronique des réseaux de ravins de fond de vallée en ville de Butembo

La cartographie des ravins en milieu urbain de Butembo a été faite dans un environnement SIG qui a été créé sur base de l'outil ArcGIS 9.2. Un modèle numérique de terrain (MNT) a été dérivé du couple stéréoscopique de SPOT5 de 2008 à 2,5 m de résolution. Aussi les images anaglyphes correspondants ont été obtenues à partir de ces images SPOT stéréo avec Leica Imagine 9.1. La figure 5.4 présente les anaglyphes issus de SPOT5 de 2008 qui ont permis de localiser les ravines de 2008.

Sur base de ces images, les traits morphologiques tels que les dambos, linéaments, des ravines et les glissements de terrain ont pu être identifiés. Toutefois, la majorité des ravines étant localisée dans la zone sans couverture nuageuse, des découpages en fonction de la zone d'intérêt ont été effectués facilitant ainsi une analyse diachronique de la dégradation de la végétation et/ou de l'urbanisation.

Les réseaux de ravines ont été cartographiés sur base des photographies aériennes de 1957, l'image QuickBird de 2005 et l'image SPOT5 de 2008. La carte de 2009 a été faite sur

base des données de terrain récoltées à l'aide du GPSmap60CSx avec une précision de ± 3 m en x et en y et un altimètre barométrique pour la valeur de z (altitude).

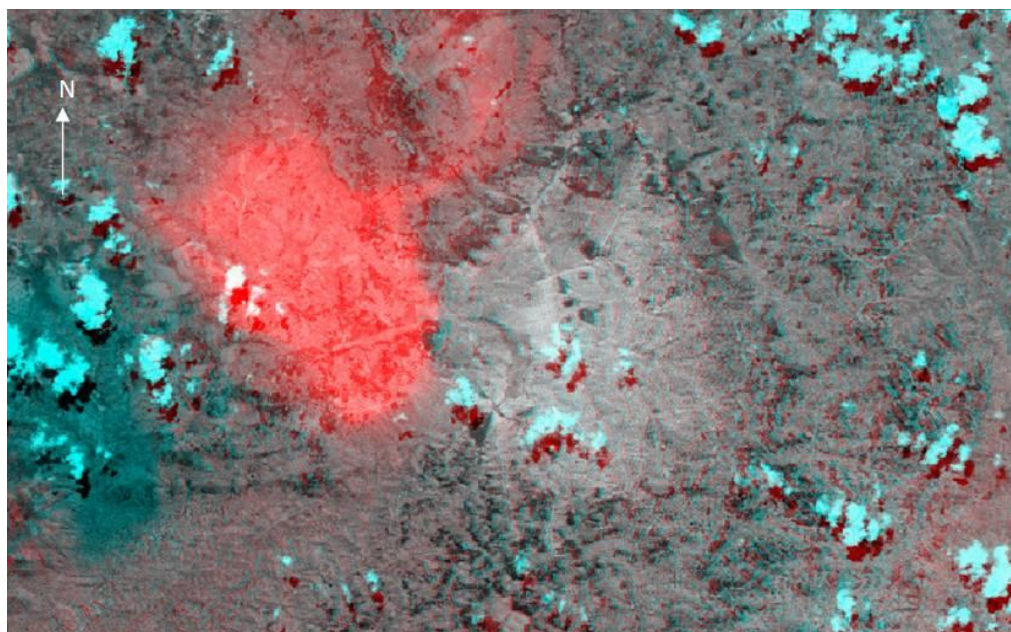
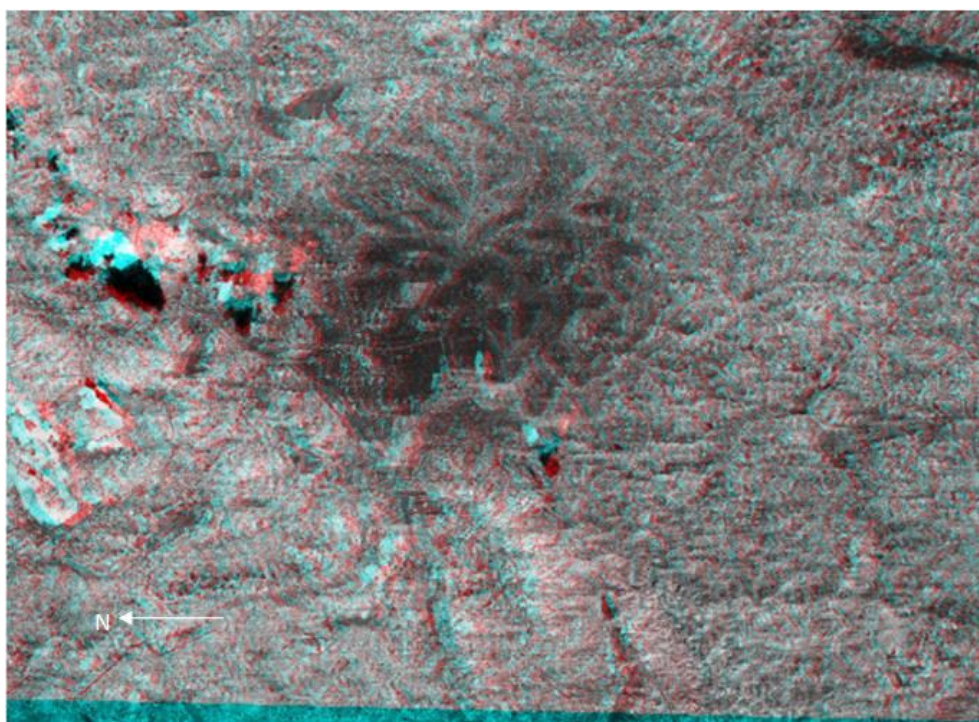


Figure 5. 4. Anaglyphes de SPOT5 (2008) centrée sur la ville de Butembo (Cyan à l'œil droit).

La figure 5.5 présente les anaglyphes issus de l'image ASTER de 2006 pour février la localisation de certains traits morphologiques du paysage urbain.



**Figure 5. 5. Anaglyphes de l'Image ASTER (2006) centrée sur la ville de Butembo (Cyan œil droit).
N.B. Le Nord se trouve du côté gauche de l'image.**

Outre l'extension spatiale du réseau des ravins il s'est avéré également intéressant d'avoir une idée sur la variation du taux d'incision verticale des ravines dans le temps. Pour cette raison, les profondeurs des 9 ravins les plus spectaculaires de Butembo ont été mesurées en 2009 *in situ* en plusieurs points. Une profondeur moyenne a été calculée pour chaque ravin. La profondeur des ravins pour les années 2005 et 2008 a été déduite de la largeur moyenne de chaque ravin, mesurées en utilisant les images SPOT et Quickbird. L'hypothèse de base dans ce cas, afin de trouver rétrospectivement la profondeur atteinte pour les périodes antérieures, s'effectuait proportionnellement au rapport entre la largeur moyenne et la profondeur moyenne, ce rapport ayant été supposé constant au fil du temps. Cette procédure a permis de recourir à l'estimation approximative du taux d'incision verticale depuis 2005. La moyenne à long terme du taux d'incision verticale pourrait aussi être déduite de l'âge des ravins établi par l'entrevue de la population locale en 2009.

5.2.2. Collecte de données au niveau des sources

La collecte des données s'est effectuée au niveau de 11 sources localisées aussi bien dans le dambo de la Wayimirya que dans celui de la Kimemi. Le choix était porté sur les sources situées dans les environs proches des ravines et quelques sources localisées au sein des dambos ou à la base des collines à la limite des dambos.

La figure 5.6 présente la localisation des sources dans les dambos de la Wayimirya et de la Kimemi. L'évolution du débit des sources le long des zones ravinées au niveau de dambos de la Wayimirya et de la Kimemi entre 2002 et 2009 pour les périodes considérées est présentée en ANNEXE V.

L'ANNEXE VIII répertorie les 314 sources inventoriées sur le territoire urbain de Butembo. Ces sources sont systématiquement localisées sur la carte des risques hydrologiques en ANNEXE III. La valeur de l'altitude a été corrigée sur base du MNT de SPOT5. Le niveau du lieu de puisage atteint au fil du temps lors de leur descente a été aussi corrigé sur base de ces valeurs issues de ce fichier raster.

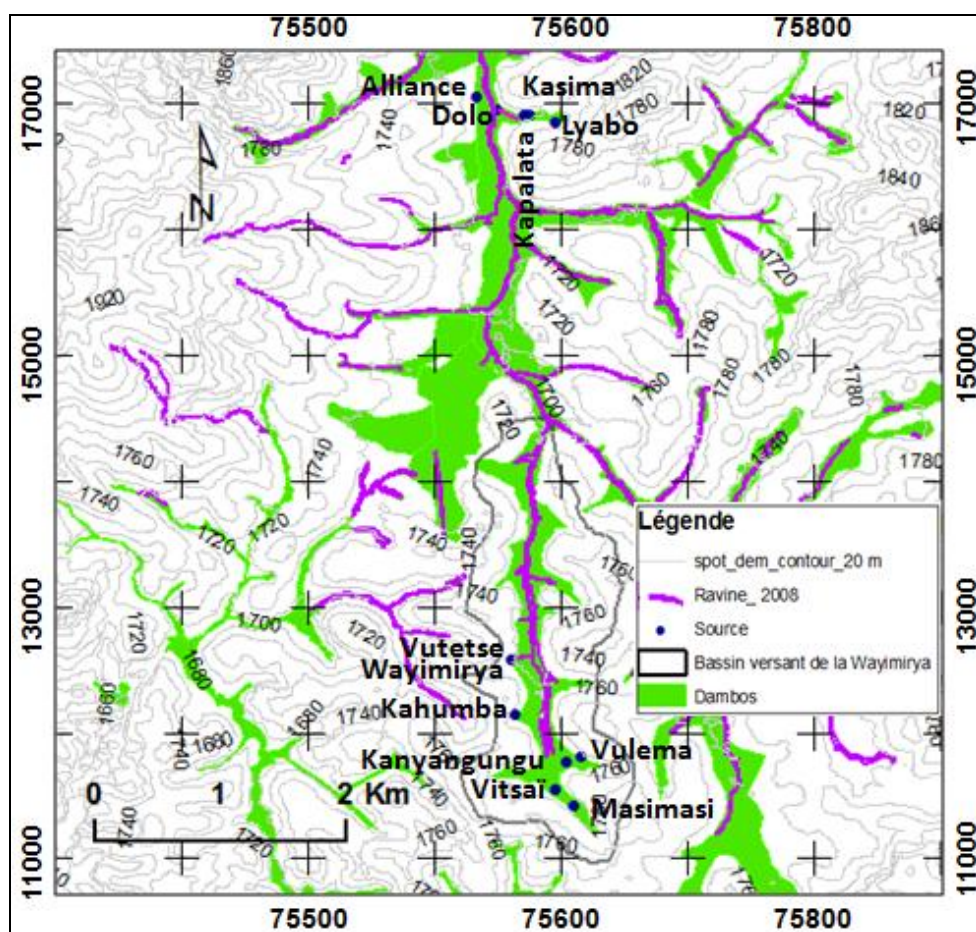


Figure 5.6. Localisation des sources investiguées le long des ravins dans les dambos de la Wayimiryia et de Kimemi à Butembo

Les données récoltées au niveau des sources sont essentiellement :

- **Le débit :**

Les débits de ces sources ont été mesurés pour les périodes 2002-2003 et 2007-2009. La collecte des données a été effectuée par le CAUB (Consortium de l'Agriculture Urbaine de Butembo) au sein du Groupement Eau. Les données utilisées dans le cadre de ce travail sont échelonnées sur la première période allant du mois de mai 2002 au mois d'avril 2003 alors que celles de la deuxième période vont du mois de décembre 2007 au mois de novembre 2009. Une petite bouteille transparente de 1 litre a servi pour recueillir l'eau dans la matinée. Un chronomètre a été employé pour déterminer le temps qui s'écoule entre l'amorce du puisage et le remplissage du récipient. Nous répétons l'opération à trois reprises pour la mesure et la valeur indiquée était la valeur moyenne de ces trois prises d'eau. Une moyenne par période a été calculée en vue de faire une comparaison entre les deux périodes. Cette bouteille était suffisante vu le faible débit des sources. En guise de contrôle, pour la deuxième

période surtout, nous procédions au contrôle par le biais du temps écoulé entre le début de puisage et le temps qu'un bidon de 20 litres utilisé par les usagers soit rempli. Pendant ce temps, une interview dirigée permettait de recueillir les informations supplémentaires par rapport aux sources auprès des usagers.

- **La position topographique des sources**

La position des sources et des puits a été matérialisée à l'aide d'un GPS de ± 3 m de précision en x et y. Les altitudes mesurées ont été corrigées sur base du MNT issu de SPOT. Sur terrain, on se rendait compte de l'évolution de la position altitudinale des sources. Dans les environs proches de fonds des vallées, le niveau des sources était au plus bas à tel point que les usagers aménageaient des sortes d'escaliers pour accéder au lieu de puisage dans les fonds de vallées. L'évolution de la situation des différents lieux de puisage au fil du temps a été estimée sur base soit des vestiges des tuyaux émergents pour les anciennes sources et se complétait à la suite des interviews avec les riverains et les usagers afin de vérifier la période d'utilisation de chaque niveau de puisage. La figure 5.7 montre la relation entre le niveau de la nappe phréatique dans la vallée et le chenal principal de la ravine centrale ; elle montre la possibilité de la descente topographique d'une source à proximité du ravin en fonction de l'incision verticale du système de ravin. La figure 5.7 illustre l'influence du ravinement sur le rabattement de la nappe phréatique dans le dambo de la Wayimirya à la source de Vutetse-Wayimirya. Les vestiges de l'ancien lieu de puisage sont visibles. Un puits a été aménagé sur le lieu pour accéder à l'eau.

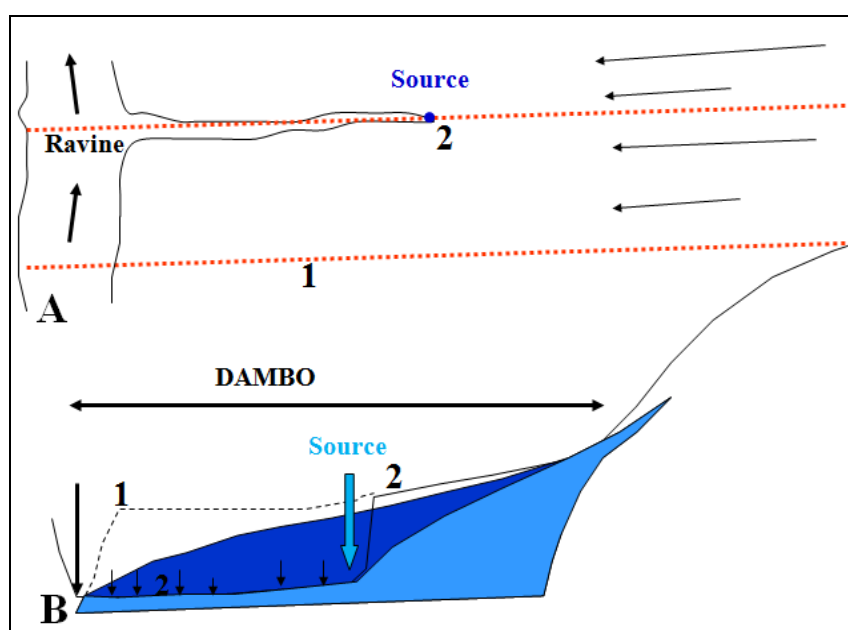


Figure 5.7. Esquisse de la situation générale des puits et des sources dans la vallée de la Wayimirya. A. Superposition de la vue en plan; B. Sections 1 et 2 dans A. La section 1 montre la nappe aquifère en

couleur bleu ciel si elle est drainée directement par le chenal central. La section 2 montre, en cyan, la position de la nappe aquifère autour de la source de tête d'un ravin affluent.



Figure 5.8. Influence du ravinement sur le rabattement de la nappe phréatique dans le dambo de la Wayimirya à la source de Vutetse-Wayimirya. Les vestiges de l'ancien lieu de puisage sont visibles. Un puits a été aménagé sur le lieu pour accéder à l'eau.

5.2.3 Collecte des données au niveau des puits

Des investigations ont été menées sur 31 puits dans le dambo de la Wayimirya (Fig. 5.9). Le niveau de l'eau dans les puits a été mesuré entre 2002-2003 et 2008-2009 respectivement de la 13^e semaine de l'année 2002 à la 20^e semaine de l'année 2003 et de la 2^e semaine de l'année 2008 à la 18^e semaine de l'année 2009. Les données étaient prélevées le matin, quand la nappe phréatique a été rétablie après la consommation d'eau de la veille. La précaution primordiale consistait à prélever les données avant que le puisage ne soit amorcé. Une jauge portant des marques centimétriques était utilisée. Les valeurs moyennes ont été comparées entre les périodes 2002-2003 et 2008-2009. L'analyse des caractéristiques des événements pluviométriques révèle que ces deux périodes sont respectivement moins arrosées (2002-2003) et plus arrosées (2008-2009) dans la ville de Butembo.

La figure 5.9 présente la localisation des puits ayant fait l'objet des investigations.

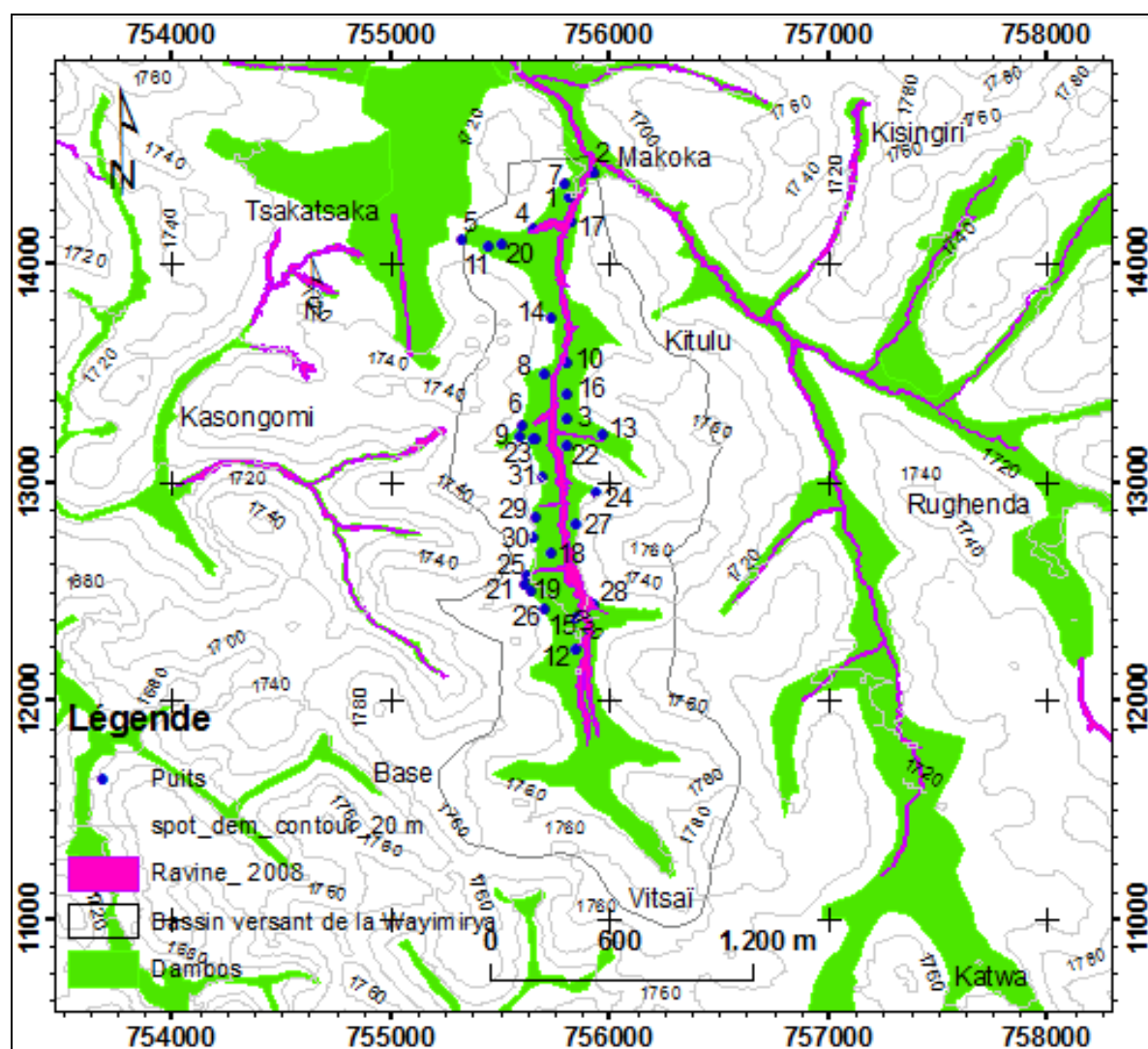


Figure 5.9. Localisation des puits investigués le long des ravins dans les dambos du bassin versant de la Wayimirya

5.3. Résultats

5.3.1. Synchronisation entre développement des ravins de fond de vallée et urbanisation

La figure 5.10 montre l'évolution diachronique des réseaux des ravins dans les dambos, cartographiés, et les zones urbanisées correspondantes.

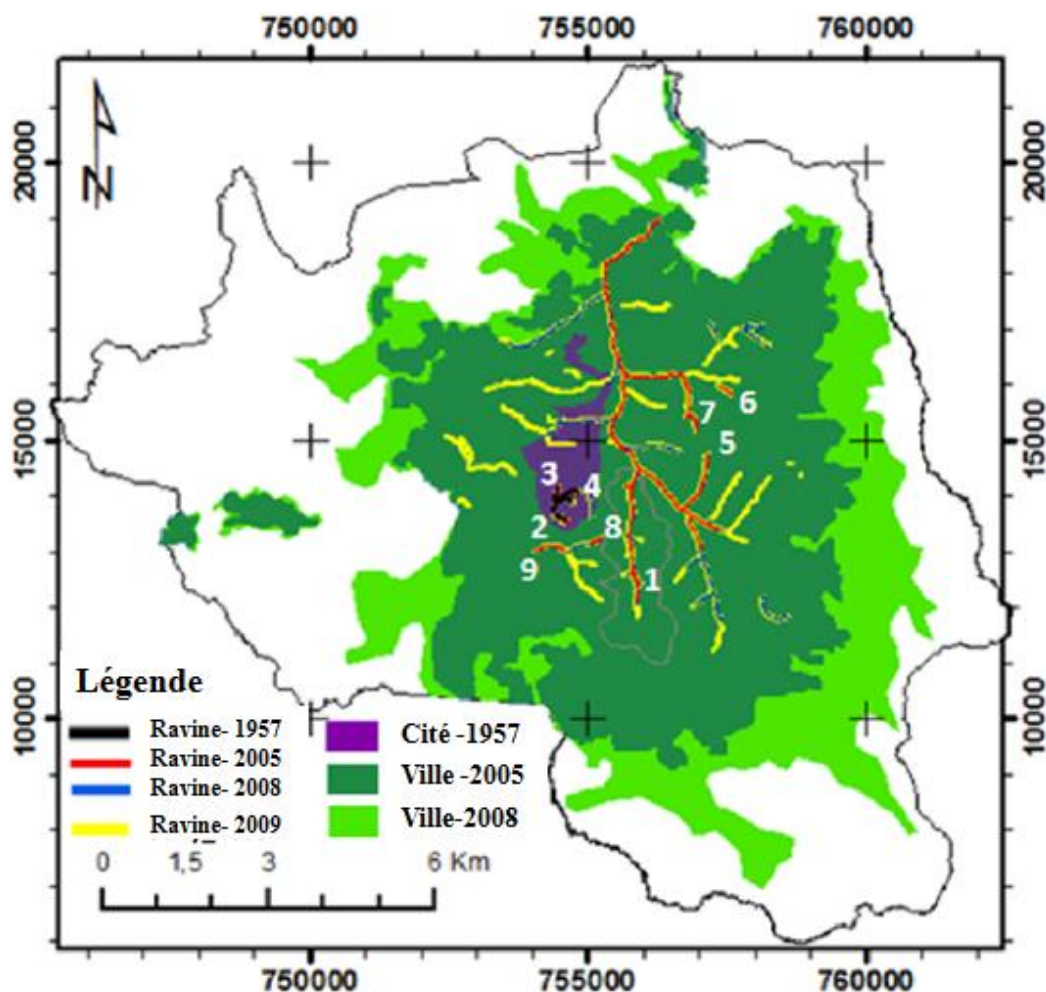


Figure 5.10. Localisation de neuf ravins les plus spectaculaires de Butembo. (1: Wayimirya; 2: Abattoir; 3: Tsakatsaka; 4: Ambiance; 5: Kisingiri; 6: Saba; 7: Vatolya; 8: Ngule; 9: Katsya) et développement diachronique des réseaux de ravines et de la zone urbanisée en 1957, 2005, 2008.

Le ravinement en 1957 est resté confiné dans le rayon de l'ancien noyau urbain de Butembo. Les réseaux de ravins pour 2005 et 2008 sont également restés confinés dans les extensions urbaines respectives.

Les fonds de vallées qui ne sont pas soumis à une forte anthropisation et qui se trouvent en dehors de la zone urbanisée ne sont quasiment pas affectés actuellement par les

phénomènes d'incision. Ces zones sont rencontrées dans les vallées irriguées par les rivières Lwirwa et Virendi, à l'est de la ville ainsi que celles irriguées par les rivières Mubunge et Lukwaliha vers l'ouest. Certaines de ces zones, à l'intérieur de la limite administrative, portent des plantations d'*Eucalyptus* avec une strate inférieure herbacée dense. La figure 5.11 illustre la rivière Lwirwa qui présente une très faible incision verticale et horizontale. Elle irrigue une vallée très large avec une strate ligneuse et herbacée très dense. Elle constitue la limite Est de la ville de Butembo. La photo est prise au niveau du pont sur l'axe routier Butembo-Bunyuka.



Figure 5.11. Rivière Lwirwa sans incision importante constituant la limite Est de la ville de Butembo

La figure 5.12 présente une zone peu anthropisée avec un lit de rivière non affecté par les incisions dans le fond de la vallée, alors que la figure 5.13 illustre une zone urbanisée dont la rivière dans le fond de la vallée commence à présenter des incisions verticales et latérales.

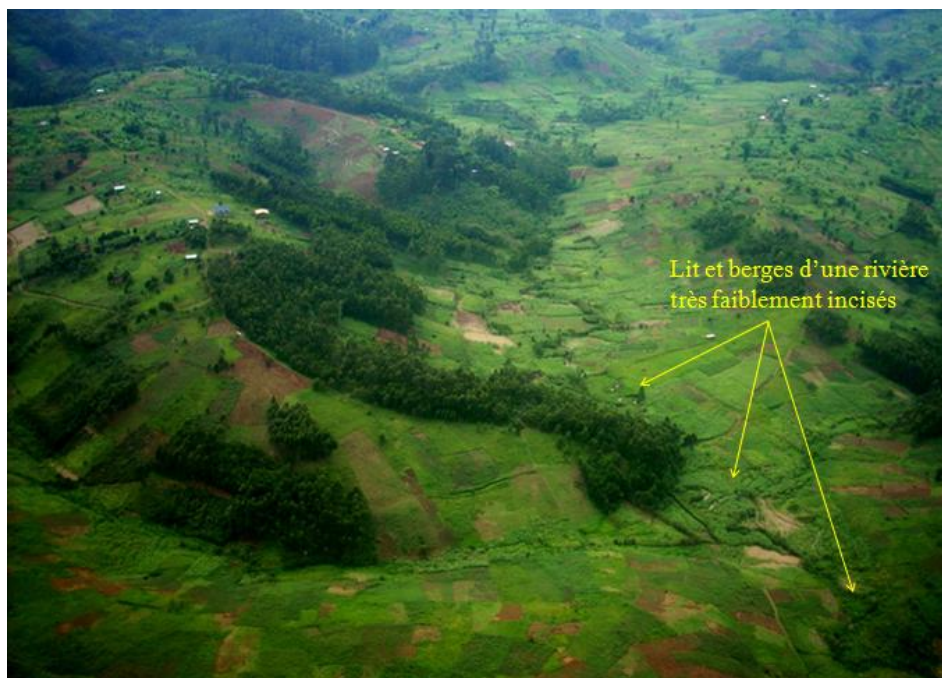


Figure 5.12. Lit et berges de la rivière Mususa très faiblement incisés (dans la vallée) Figure 5.13. Incisions verticale et horizontale à Rughenda (Est de Butembo).

Il s'avère clairement que l'urbanisation précède le développement de ravines et que de toute évidence les incisions des ravins sont limitées à des sections de vallée où l'on peut s'attendre à l'augmentation du coefficient de ruissellement en raison de l'urbanisation.

Le tableau 5.1 indique les données relatives au SIG (années 1957, 2005 et 2008) et celles mesurées sur le terrain (2009) respectivement en terme de longueur, surface planimétrique et la largeur moyenne pour les 9 ravines les plus spectaculaires de la ville.

Tableau 5.1. Analyse diachronique et volumétrique de 9 principaux ravins les plus spectaculaires de Butembo (Surface, longueur, volume, profondeur).

Age	Année	Wayimirya	Abattoir	Tsakatsaka	Ambiance	Kisingiri	Saba	Vatolya	Ngule	Katsya	Total	Moyenne
		43	75	82	77	35	25	36	31	37		
Bassin versant [m²]		3091078	148916	84941	352868	635747	1065564	597894	105849	1412705	7495562	
Longueur [m]	GIS	1957	0	250	230	820	0	0	0	0	1300	144,44
	GIS	2005	2780	400	240	880	1130	280	1110	180	7540	837,78
	GIS	2008	3120	500	240	910	1170	290	1160	190	8120	902,22
	In situ	2009	3720	510	260	930	1210	340	1170	210	8910	990,00
Surface [m²]	GIS	1957	0	582	739	4168	0	0	0	0	5489	609,89
	GIS	2005	31020	3686	2850	13241	9635	1595	14696	2551	84004	9333,78
	GIS	2008	53084	5666	4488	16685	15357	3255	23723	4276	133843	14871,44
	In situ	2009	90556	6674	5239	17231	17991	4369	26921	5340	184089	20454,33
Largeur [m²]	GIS	1957	-	2,80	3,10	4,20	-	-	-	-	10,10	1,12
	GIS	2005	17,20	10,80	11,50	13,90	13,20	10,90	15,90	14,40	118,30	13,14
	GIS	2008	22,30	14,10	15,50	14,60	14,80	13,10	19,30	16,80	144,70	16,08
	In situ	2009	24,14	14,70	16,20	15,80	15,40	13,70	21,80	17,90	155,64	17,29
Profondeur [m]	calculer	1957	-	1,49	0,77	1,41	-	-	-	-	3,66	0,41
	calculer	2005	3,63	5,73	2,84	4,66	4,29	7,96	3,79	5,63	42,47	4,72
	calculer	2008	4,71	7,48	3,83	4,90	4,81	9,56	4,60	6,57	51,78	5,75
	In situ	2009	5,10	7,80	4,00	5,30	5,00	10,00	5,20	7,00	55,40	6,16
Volume [m³]	calculer	1957	-	520	273	2.426	-	-	-	-	3.219	358
	calculer	2005	86.877	12.378	3.919	28.517	31.963	12.141	33.468	7.298	227.724	25.303
	calculer	2008	163.896	26.373	7.119	32.534	41.603	18.163	51.533	10.485	372.122	41.347
	calculer	2009	228.992	29.238	8.424	38.939	46.585	23.290	66.316	13.157	481.821	53.536
A:	2009	4,73	1,88	4,05	2,98	3,08	1,37	4,19	2,56	2,67		

5.3.2. Evolution en longueurs de neuf principales ravines dans la zone urbaine

La figure 5.14 illustre l'évolution en longueur de neuf principales ravines dans la zone urbaine de Butembo.

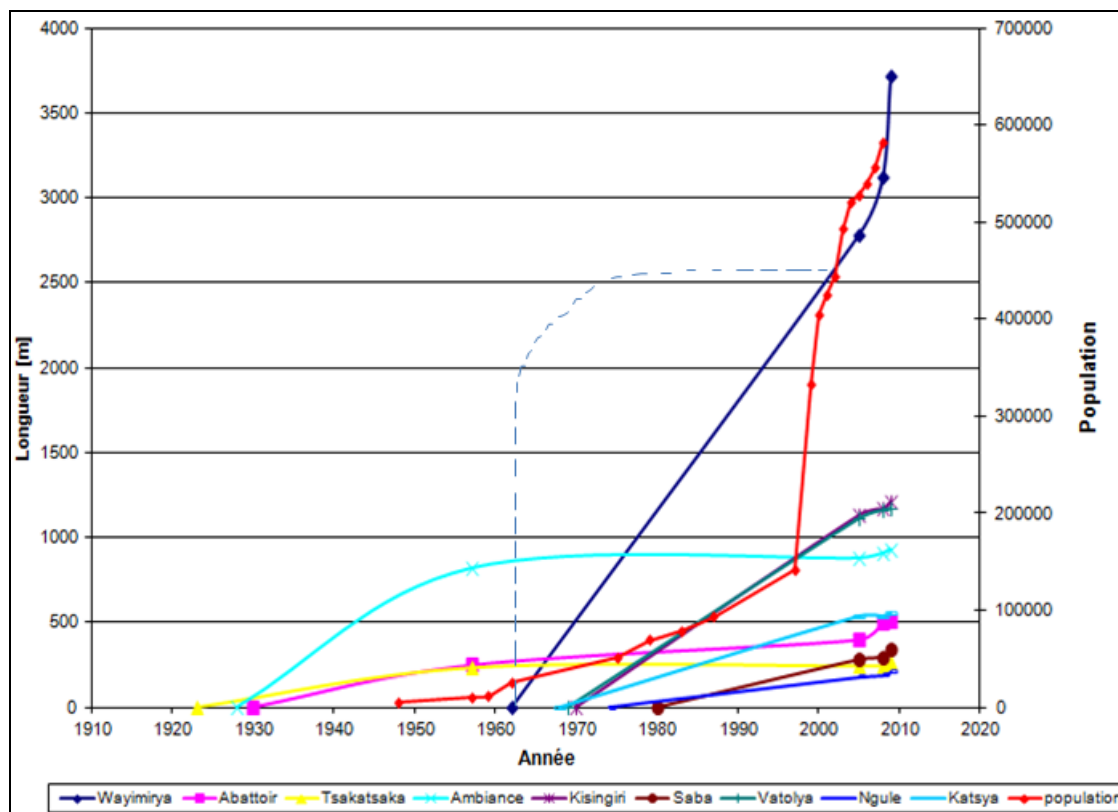


Figure 5. 14. Evolution en longueur des neuf ravines les plus spectaculaires dans la ville de Butembo.

Le développement en longueur des trois plus anciennes ravines (Fig. 5.14) (Abattoir, Tsakatsaka et Ambiance) est compatible avec un développement rapide dans les stades juvéniles de ces ravins. Cependant, depuis les mesures relatives à l'année 2005, la longueur de ces ravines n'a que peu évolué. Graff (1977) et Rutherford *et al.* (1997) ont démontré qu'un ravin qui se développe par érosion régressive atteint environ 90 % de sa longueur totale au bout de 5 % du temps nécessaire pour son développement complet.

L'évolution en longueur des 6 autres ravines bien que caractérisée par un manque de mesures en suffisance dans le temps peut laisser supposer sans risque (confirmation par les observations sur le terrain) que ces ravines ont également évolué rapidement au stade juvénile, comme provisoirement indiqué par la ligne pointillée pour le cas du ravin de la Wayimirya, où le taux de développement en longueur devrait être proche de zéro pour la

période qui date d'avant 2005. Mais pour la Wayimirya ainsi que pour tous les autres ravins, il y a une redynamisation depuis les mesures de 2005, conduisant à une réduction de la surface drainée si l'on tient compte de la tête de la ravine.

À la lumière de Montgomery et Dietrich (1994), où la superficie drainée vers la tête de l'incision est un proxy pour le débit de pointe de ruissellement, cette redynamisation ne peut être expliquée que par une augmentation des pics de débit de pointe au niveau de la surface drainée depuis peu de temps avant 2005 ou, au moins depuis cette même année 2005.

5.3.3. Analyse de l'évolution en surface et en volume pour les neuf ravines les plus spectaculaires dans la zone urbaine de Butembo

La figure 5.15 montre l'accélération dans l'agrandissement de la surface planimétrique des ravins à partir des mesures de 2005. Cela signifie qu'un élargissement généralisé des ravins s'est produit sur toute leur longueur depuis 2005. Cet élargissement actif des ravins correspond à l'incision verticale très active que l'on peut observer sur le terrain.

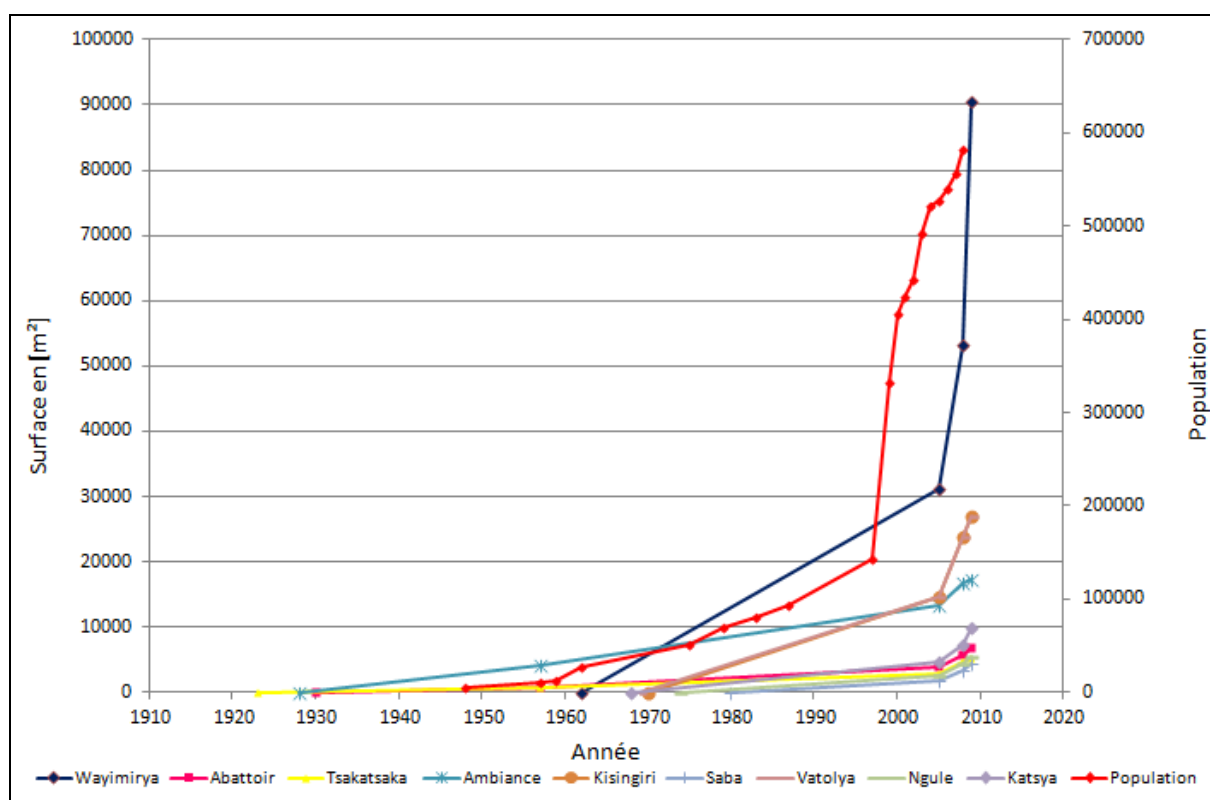


Figure 5. 15. Evolution de la surface de neuf ravines les plus spectaculaires de Butembo.

La redynamisation générale des ravins en termes de longueur et de surface planimétrique a été évaluée en se basant sur la largeur moyenne pour en déduire le volume. Pour ce faire, la profondeur moyenne des ravines a été mesurée sur le terrain en 2009 (tableau 5.1). Quant aux autres années, la profondeur a été calculée en considérant que les profils transversaux de tous les ravins sont principalement triangulaires et que la relation profondeur/largeur de 2009 (A dans le tableau 5.1) est resté constant par ravine.

On peut confirmer que les proportions (ratios) largeur/profondeur montrent des relations avec la composition lithologique du substrat raviné. Les ratios > 3 se trouvent là où les dépôts importants de tourbe sont intercalés entre les argiles grisâtres et noirâtres fissurées à l'interfluve. Les valeurs < 3 se réfèrent principalement à l'absence de la tourbe.

En 2009, les mesures effectuées *in situ* et les valeurs moyennes des profondeurs calculées sur base des mesures des longueurs, des surfaces planimétriques et des largeurs moyennes de 2008 ; 2005 et 1957 effectuées dans l'environnement SIG permettent de calculer le volume approximatif des neuf ravines les plus spectaculaires pour chacune des années et par ravine respectivement dont les valeurs sont présentées à la base du tableau 5.1.

Sur base de ces valeurs, l'évolution temporelle du volume des sédiments érodés par les ravins est présentée par la figure 5.16.

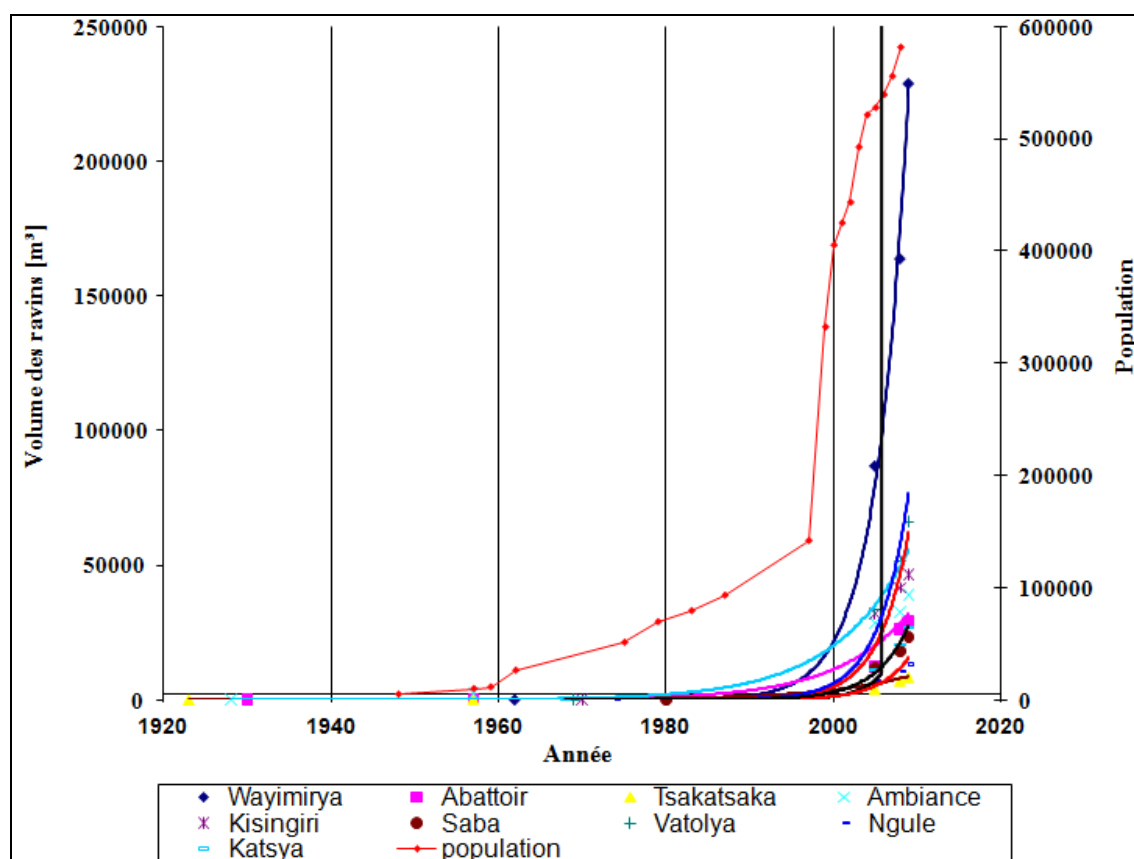


Figure 5. 16. Evolution du volume des ravins dans le temps versus explosion démographique dans la ville de Butembo.

Le graphique montre que toutes les ravines connaissent une augmentation considérable dans leur évolution à partir de 1999 en dépit de la diminution des précipitations annuelles qui ont caractérisé la période allant de 2000 à 2005. En particulier, l'accroissement de la ravine de la Wayimirya est spectaculaire et représente à elle seule près de la moitié du volume des ravinements des fonds de vallées en 2009.

On se rappellera que les années 1998-1999 coïncident avec la période pendant laquelle la population a plus que doublé, passant de 141 707 habitants en 1997 à 332 083 en 1999 (Fig. 5.13). Cette discontinuité extrême dans la croissance de la population urbaine de Butembo doit être entièrement attribuée à l'arrivée des déplacés de guerres suite à l'insécurité grandissante dans les zones périphériques, outre l'exode rural surtout celui des jeunes à la recherche de l'emploi ou du mirage urbain.

La carte issue des indices de végétation normalisés relatifs aux années 1987, 2004 et 2006 montre que les périmètres présentant des surfaces avec de moins en moins de végétation, censés correspondre principalement à des maisons, des routes et d'autres surfaces imperméables sont dans une phase de croissance exponentielle. Ces surfaces artificialisées sont considérées comme de principales zones qui augmentent considérablement le ruissellement. Mais, il convient également de souligner qu'à l'intérieur de la zone urbanisée de 1987 des taches présentant moins de végétation apparaissent en 2004 et 2006. Cela suggère plutôt la concentration croissante des surfaces imperméables à l'intérieur de la zone urbanisée. Ces assertions sont confirmées par l'analyse de la dégradation de la végétation par la méthode de classification par maximum de vraisemblance témoignant de l'artificialisation de la zone urbaine et donc de l'augmentation des surfaces productrices de ruissellement.

5.3.4. Dynamique de la nappe phréatique dans la vallée de la Wayimirya

La figure 5.17 montre l'évolution du niveau de l'eau dans les 31 puits au sein de la vallée de la Wayimirya entre 2002 et 2009, en fonction de la distance séparant chaque puits individuel du chenal central du ravin dans la vallée, en considérant la largeur de la vallée prise localement comme unité de distance. Ainsi, les puits dont la distance est proche de 1 sont, par conséquent, situés au pied de la colline.

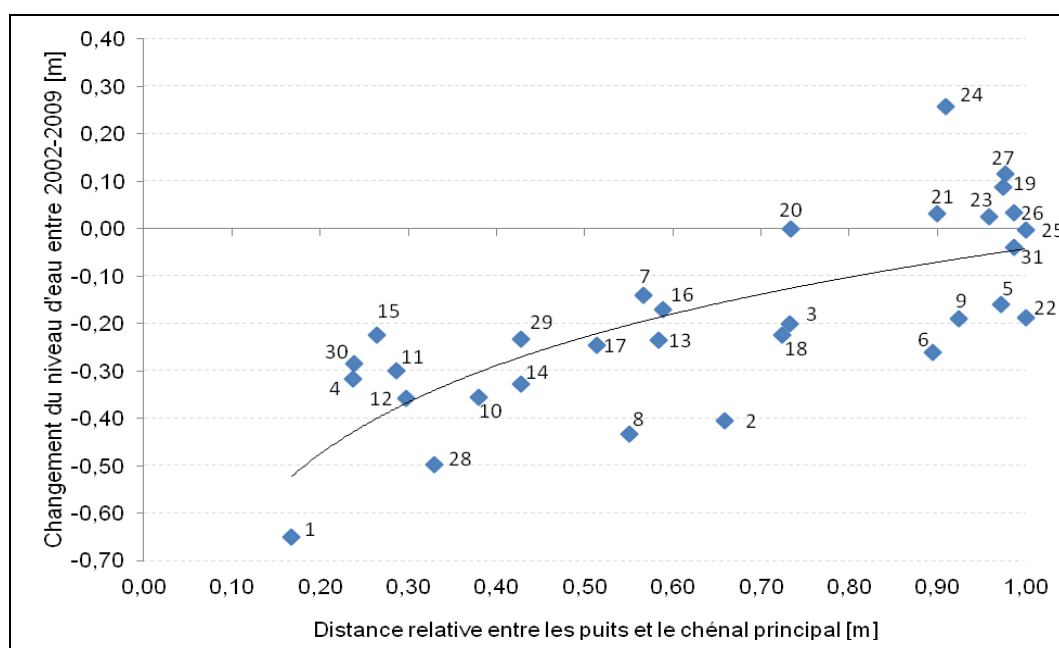


Figure 5. 2. Abaissement du niveau de l'eau dans les 31 puits de la vallée de la Wayimirya entre 2002 et 2009.

Sur base de la largeur moyenne de l'incision du ravin central de la Wayimirya en 2009 (24 m) et 2005, la moyenne de l'incision verticale totale de ce canal entre 2005 et 2009 devrait être de l'ordre de 1,47 m (tableau 5.1). Si l'on ajoute pour les années 2002-2004 la valeur de 0,24 m, calculée à partir du taux, à long terme de l'incision verticale de 0,08 m / an, nous arrivons à une incision verticale de près de 1,71 m pour le ravin de Wayimirya. En outre, il semble que l'incision verticale du ravin de la Wayimirya entre 2002 et 2009 est accompagnée principalement d'un abaissement de la nappe phréatique le long de la vallée mais s'avère de moins en moins importante avec la distance entre le fond du ravin dans la vallée et le pied de la colline le long du dambo. Il y a, en effet, 6 puits au pied de la colline dont le niveau ne descend pas, mais augmente (Fig. 5.17). Il s'agit des puits 24 ; 27 ; 19 ; 21 ; 23 ; 26. L'abaissement de la nappe phréatique dans les dambos ne se limite pas à la période de 2002-2009. Les investigations faites auprès de 11 sources dans les dambos de la Wayimirya et de Kimemi montrent une affectation à la baisse du niveau du lieu de puisage en réponse à l'incision de la ravine constituant le canal central dans la vallée depuis 1987 (Fig. 5.18).

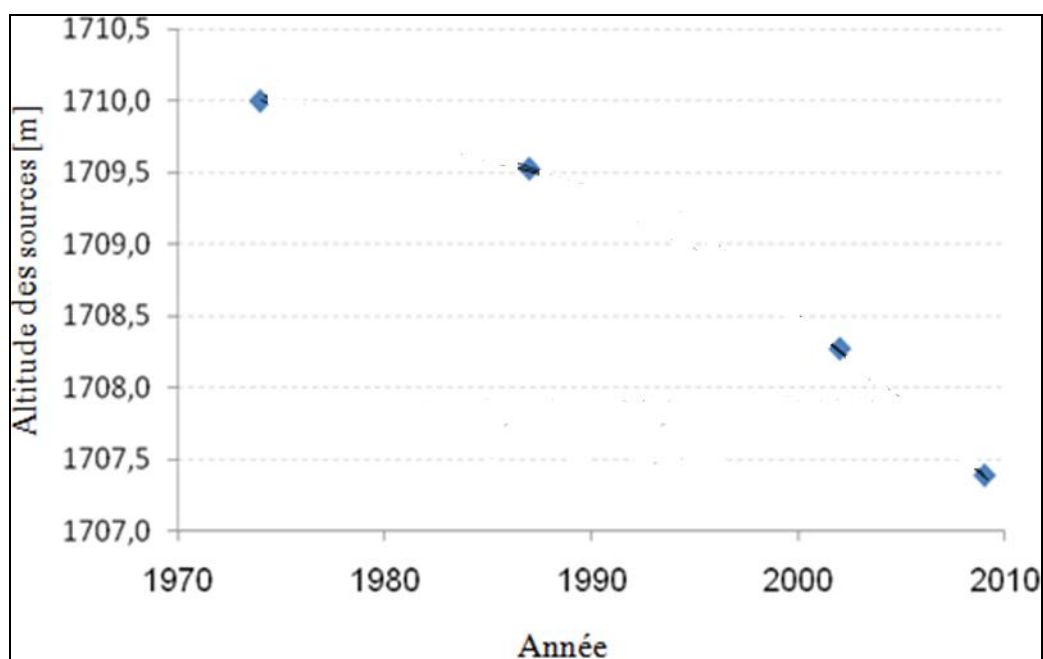


Figure 5.18. Représentation de descente topographique des points de puisage des sources

On se rend compte que le point de puisage est ramené progressivement au plus bas niveau par les usagers, probablement, pour poursuivre la nappe suite au débit qui devient de plus en plus faible (Fig. 5.18).

Il convient de mentionner que l'abaissement de niveau atteint par les sources se produit généralement en raison de l'érosion régressive dans les fossés des ravins et les tranchées de raccordement avec le ravin principal au centre de la vallée. L'abaissement du niveau du lieu de puisage à la suite de l'érosion régressive à partir du chenal central est la cause et non la conséquence de l'abaissement de la nappe phréatique au niveau des sources. La relation entre le ravin de la Wayimirya et la nappe phréatique à proximité de l'incision est présentée par la figure 5.19. Ceci fait comprendre pourquoi le débit entre 2002 et 2009 de 6 sources sur 11 le long des dambos de la Wayimirya et de la Kimemi monte alors que toutes les sources ont subi la baisse du moins par rapport au niveau du lieu de puisage (Fig.5.19). L'augmentation du débit d'une source qui descend pourrait être expliquée par l'augmentation du gradient hydrostatique qui se produirait dans la nappe phréatique immédiatement en amont des sources, suite au bombement plus prononcé de la surface de la nappe dû à la baisse des sources. On constate donc que le drainage du fond de dambo s'accélère dans le temps à la suite de ce phénomène.

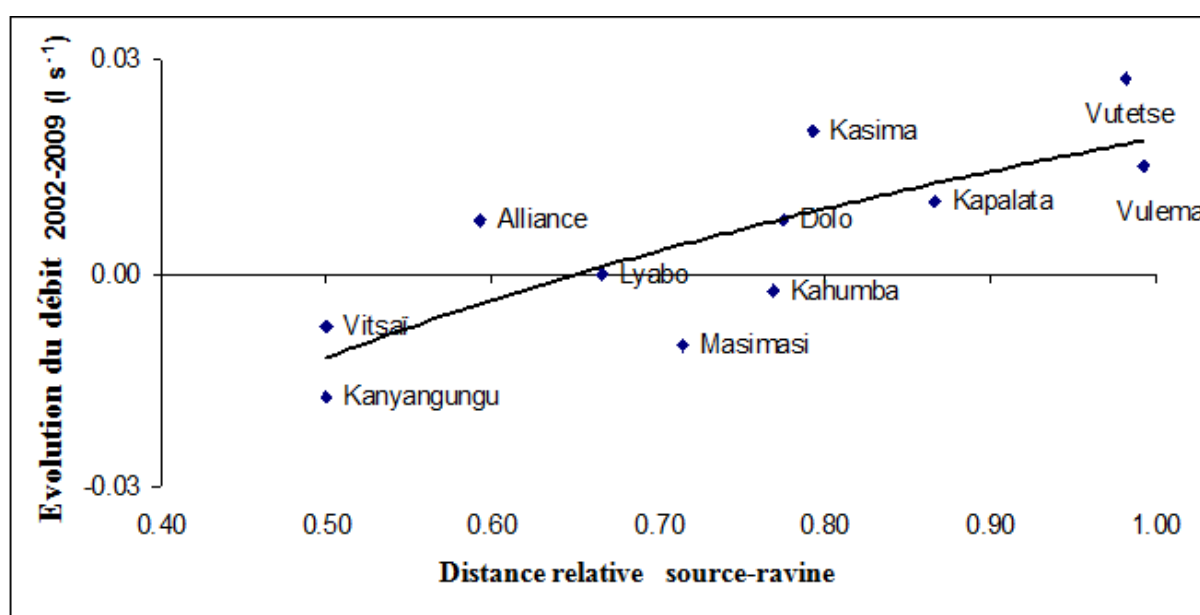


Figure 5.19. Evolution des débits des sources dans les dambos de Wayimirya et de Kimemi

5.4. Conclusions partielles et discussions

1) L'incision verticale qui se manifeste dans le réseau hydrographique au sein des anciens dambos coïncide, dans le cas de la ville de Butembo, avec l'augmentation du ruissellement. Cette incision verticale est la conséquence directe de l'urbanisation dont l'expansion spatiale sans cesse croissante conduit à l'augmentation des surfaces de production de ruissellement. Une preuve directe est donnée par trois arguments :

a). Le réseau des ravines de fond de vallée reste toujours confiné à l'intérieur de l'extension spatiale de la zone urbanisée. Dans les dambos qui restent en dehors de l'emprise de l'urbanisation on remarque une absence d'incision dynamique. Dans ces zones, le débit d'étiage est resté important et les crues sont modérées. Ces dernières se présentent avec un retard alors qu'à l'intérieur de la zone urbanisée le débit d'étiage est devenu bas avec des crues éclairs beaucoup plus puissantes qu'auparavant.

b). Le doublement de la population entre 1997 et 1999, dû à l'afflux massif des réfugiés a provoqué une expansion spatiale accélérée des zones présentant de moins en moins de végétation et donc culminant dans l'accroissement des surfaces susceptibles de produire un ruissellement considérable.

L'approche par télédétection, couplée aux mesures réalisées *in situ*, révèle une augmentation spectaculaire de la longueur, de la surface planimétrique des ravins et du volume des sédiments érodés par ravinement depuis ce doublement de la population urbaine. Cependant, il convient de noter que la réactivation des ravines a commencé pendant la période moins arrosée avant 2005 écartant de ce fait toute tentative d'imputer une éventuelle augmentation des eaux de ruissellement aux pluies avant 2006. Cette redynamisation aurait pu continuer à se produire quelle que soit la pluviométrie qui aurait prévalu dans la contrée.

2) Les cours d'eau de fond de vallée sont alimentés par la nappe phréatique et leur incision verticale abaisse cette dernière. Le mécanisme d'abaissement de la nappe phréatique est double. Tout d'abord, il y a écoulement souterrain direct vers le ravin central. Ensuite, les sources situées aux pieds des collines subissent un abaissement topographique à cause de l'érosion régressive émanant du ravin central et remontant vers la source. C'est le cas

notamment de la source Vutetse-Wayimirya où les riverains ne sachant plus accéder à l'eau ont creusé un puits pour atteindre la nappe phréatique, déjà au plus bas niveau.

L'abaissement du niveau des lieux de puisage dans les têtes secondaires des ravins contribue à celui de la nappe phréatique à une plus grande distance du canal central. Les mesures de débits des sources montrent aussi que les sources situées vers la tête de ravins peuvent voir leur débit augmenter momentanément à la suite de l'approfondissement lié à l'incision latérale. Ceci n'est que normal étant donné que cela implique une augmentation temporaire du gradient hydraulique dans la nappe phréatique en amont de la tête de la ravine.

3) Depuis l'augmentation des précipitations moyennes annuelles passant de 1185 mm entre 2000-2005 à 1453 mm pour la période 2006-2010, il n'y avait pas de stabilisation dans la dynamique de ravinement. Au contraire, on assiste à une intensification du processus d'incision verticale dans les vallées, et en conséquence, à un abaissement accéléré du niveau de la nappe phréatique. L'augmentation du ruissellement collinaire, qui provoque les crues érosives dans les vallées pourrait être attribuée à l'accroissement des zones de production de ruissellement ainsi qu'à l'augmentation des précipitations jusqu'à leur valeur normale pour la contrée.

Ces conclusions conduisent à des considérations intéressantes dans le domaine de la compréhension du processus de ravinement et la problématique de la disponibilité de l'eau en zone urbaine de Butembo.

Les techniques qui consistent à placer des systèmes d'égouts ouverts, des tubes et des drains ainsi que toute autre stratégie focalisée sur la canalisation et l'évacuation rapide des eaux de ruissellement vers les vallées s'avèrent nocives. L'augmentation de la connectivité créerait des phénomènes qui agiraient par rétroaction car elle provoquerait des inondations qui à leur tour favoriseraient les incisions dans les fonds des vallées avec comme conséquence le rabattement de la nappe phréatique.

Les incisions des ravins dans les fonds des vallées pourraient être arrêtées temporairement par d'énormes travaux et des infrastructures tels que les barrages dans les lits

des ravins. Mais suite à l'augmentation prévisible de débit de pointe à l'avenir, ce genre de solutions exigera des investissements continus pour améliorer ces œuvres.

Il appert *in fine* que la bonne stratégie de prévention des ravins de fond de vallée devrait inclure tous les moyens techniques nécessaires pour empêcher ou réduire au minimum la genèse du ruissellement sur les versants et pour contrarier la connectivité hydrologique créée par les routes au niveau du bassin versant.

À la lumière de l'évolution mondiale en cours, la question se pose sur la possible influence de l'augmentation du nombre de jours de pluies ≥ 10 mm ainsi que de la lame d'eau comme observé au niveau régional (New *et al.*, 2006) et localement (Sahani *et al.*, 2011).

L'augmentation des précipitations dans un contexte non urbain pourrait éventuellement influencer positivement la couverture de la végétation et de cette manière conduirait à l'augmentation de la capacité d'infiltration des sols et à la réduction corrélative des crues des cours d'eau. En revanche, en milieu urbain, où le développement de la végétation libre est quasi impossible, les eaux de ruissellement ne devraient croître qu'avec l'augmentation de la pluie ou avec un nombre croissant de grandes pluies. Retarder et prévenir des eaux de ruissellement sont autant de stratégies constituant, dans le contexte climatique de la ville de Butembo, les principaux défis.

En termes de prévention, il s'avère aussi urgent de mettre en place des stratégies de mitigation pour empêcher la connectivité entre les systèmes de ravins régressifs et progressifs.

Chapitre sixième

Les inondations catastrophiques du 6 octobre 2009. Inventaire, causes et perspectives d'avenir

Chapitre VI : Les inondations catastrophiques du 6 octobre 2009. Inventaire, causes et perspectives d'avenir

6.1. Introduction

6.1.1. Des risques hydrologiques relativement récents : les inondations

Quoique les rivières au fond des vallées montrent une tendance nette à s'inciser, comme décrit dans le chapitre précédent, les incisions ne sont pas toujours capables de véhiculer immédiatement toutes les eaux de ruissellement lors des événements pluvieux d'allure exceptionnelle. L'augmentation des débits de pic du ruissellement collinaire des dernières décennies conduit à une augmentation de la récurrence et de l'ampleur d'événements où l'apport soudain de grandes masses d'eau dans les vallées dépasse la capacité d'évacuation des fonds de vallées. Ainsi les débordements des lits des rivières s'étalent dans les vallées à fond plat. A cet effet, la ville de Butembo dont une partie importante de sa circonscription est bâtie dans une dépression est aux prises, ces dernières années, avec des inondations périodiques qui rendent les populations de plus en plus vulnérables. On se rappellera que la capacité d'évacuation des fonds de vallée du bassin de la Kimemi dépend de la barrière liée à la tectonique ancienne dont le linéament est marqué par des schistes avec intercalation continue de quartzites. Il constitue le niveau de base local de la rivière Kimemi, sous le pont de Biasa en aval d'une dépression, longtemps restée marécageuse. Des décennies dépourvues de crues très importantes ont renforcé la méconnaissance des possibilités de débordement. Dès lors, à la suite de l'explosion démographique, les lotissements ont envahi très largement les zones inondables et les versants en amont, sans précaution particulière.

Un éveil brutal s'est produit sous l'effet d'une inondation catastrophique intervenue dans l'après-midi du 6 octobre 2009 à la suite d'une pluie diluvienne de 70,2 mm qui a duré 2 heures et 30 minutes, entre 13 h 00' et 15 h 30'. Cette pluie était accompagnée d'un vent violent. Elle a rappelé aux riverains et aux pouvoirs publics l'existence du risque.

Pourtant, les effets ont été durement ressentis du fait de la concentration de biens, des activités et des personnes dans les zones submersibles, bien plus que les décennies antérieures, périodes pendant lesquelles les conséquences n'avaient pas la même ampleur. Hormis les dangers que font courir ces crues à la population, elles provoquent aussi

d'importants dégâts aux activités relatives à l'agriculture urbaine et à la voirie par inondations et sapements des berges. Des quartiers entiers, des avenues et des rues ont été envahis par les eaux. Le marché Bwanandeke de Biasa a été inondé et les marchands qui sont allés s'abriter ont perdu tous leurs biens. Le Parking la Victoire a été complètement inondé. La briqueterie de la Procure, installée en pleine zone inondable avant 1957 comme on peut le voir sur les photos aériennes, a perdu toutes les briques rangées pour le séchage. Des animaux domestiques se sont noyés. Certaines maisons commerciales ont vu leurs marchandises submergées d'eau.

Sans être exhaustif, le tableau 6.1 présente un inventaire des infrastructures ayant été touchées par les inondations du 6 octobre 2009.

Tableau 6. 1. Infrastructures ayant été affectées par les inondations du 6 octobre 2009.

Zone inondée	Maisons	Hôpitaux	Ecole	Marché	Eglise	Usine	Parking
Makasi	344	4	1	1	3	0	0
Kimemi	724	1	1	1	3	2	1
Vutsundo	7	0	0	0	0	0	0
Mususa	12	0	0	0	0	0	0
Katsya	22	0	0	0	0	0	0
Total	1109	5	2	2	6	2	1

Il n'est pas du tout aisé d'estimer le coût de biens endommagés, mais l'ampleur des dégâts et la superficie « captive » des eaux sont énormes. L'inventaire des biens endommagés ne peut être exhaustif que si chacun individuellement déclare ce qu'il a perdu avec le soutien d'une commission ad hoc et d'une sensibilisation soutenue dans le domaine du risque.

Parmi les maisons, 22 sont à vocation commerciale avérée. Toutefois, le centre ville est caractérisé par des maisons dont la façade tournée vers la rue sert à la commercialisation de produits de première nécessité. Il convient de noter aussi que certaines parcelles sans maison ont, pour une bonne partie, des matériaux de construction entreposés, un signe de construction imminente. Les parcelles qui disposaient de sable, de tas considérables de matériaux ont été vidées par les eaux qui déferlaient à grande vitesse des avenues et des parcelles.

Les usines les plus exposées étaient notamment l'usine de traitement du café de CUGEKI et la Briqueterie de la Procure de Butembo. Outre le parking La victoire, une multitude d'autres où se garent les taxis moto ont été inondés. La figure 6.1 présente les manifestations des inondations à travers la ville de Butembo.



Figure 6. 1. Manifestations des inondations dans la ville de Butembo a). Rue kinshasa au niveau de l'Institut Vungi. La toiture emportée jonche la rue Kinshasa ; b). Une rue de Kitovero à CUGEKI; c). Boulevard conduisant vers Muchanga ; d). Avenue du centre à la latitude de la Station Sylkas; e). Boulevard anciennement dénommé Monseigneur Kataliko à CUGEKI ; f). Briqueterie de la Procure de Butembo.

Pendant l'étiage, les sédiments sont déposés le long du parcours des eaux de ruissellement et sont à la base des dégâts causés aux cultures dans les zones inondables.

La figure 6.2 illustre les dépôts des limons le long de la Kimemi après l'étiage en aval du ruisseau Kalwikira qui prend sa source dans la vallée situé entre Malkia wa Mbingu et

l'Auberge de Butembo. La couleur de l'eau témoigne d'un charriage des limons, preuve d'une érosion accrue au niveau du bassin versant de la Kimemi.



Figure 6. 2. a) Début d'étiage après une forte inondation de la Kimemi et dépôt des limons dans les champs de colocases le long du cours d'eau; b). Inondation au Marché Bwanandeke à Biasa. Les marchands observent impuissants les pertes de leurs étalages et leurs biens.

Ces manifestations s'observent également le long des berges ou des maisons qui se déchaussent graduellement.

Pour être complet, l'orage qui a provoqué les écoulements et inondations du 6 octobre 2009 était également accompagné de coups de vent assez forts. La toiture de l'Institut Vungi a été emportée par le vent ; et beaucoup d'autres dégâts ont été enregistrés à travers les entités parcourues par les eaux (Fig.6.1.a).

Etant donné que les conditions pluviométriques connaissent une affectation à la baisse (Sahani *et al.*, 2011), il faut envisager essentiellement le degré d'urbanisation dans l'avenir pour pouvoir se prononcer sur le risque d'inondation future dans les fonds de vallées. Or, si rien ne change dans la politique d'urbanisation, notamment les initiatives privées de morcellement de terrain, il va de soi que l'urbanisation contribuera à l'extension de la ville, mais également à 'l'intensification' de l'urbanisation à l'intérieur de la ville, les deux augmentant encore largement les débits de ruissellement et ensuite les inondations. Il est à prévoir que la pluie efficace pour produire le ruissellement et l'inondation qui l'accompagne et qui est de l'ordre de 70 mm en 2 heures et 30 minutes avec une récurrence de 2 à 3 ans (Sahani *et al.*, 2011) sera moins importante dans l'avenir à la suite de l'imperméabilisation du sol consécutive à l'urbanisation sans cesse croissante.

6.1.2. Etat de nos connaissances sur les inondations des villes en Afrique centrale

ONU-Habitat, (2010) montre que les inondations récurrentes de plusieurs villes d'Afrique centrale procèdent de multiples facteurs mais sont surtout consécutives au comportement humain, notamment la croissance démographique soutenue, associée à l'implantation des populations dans les zones sujettes aux inondations. Des études récentes (Vandecasteele *et al.*, 2010 ; 2011) montrent que de plus en plus de villes en Afrique centrale et le long du *rift albertin* sont confrontées à des problèmes d'inondation suite à la dégradation de l'environnement et à l'imperméabilisation des terrains urbains. Dans la partie traitant du ravinement de fond de vallée, il a été démontré que l'augmentation de l'imperméabilisation du terrain se manifeste à des allures toujours croissantes à Butembo et conduit à des crues éclairs de rivières de fond des vallées en exacerbant les phénomènes de ravinements au fil du temps avec un éventail considérable de conséquences environnementales. La figure 6.3 présente les zones confrontées aux inondations en République Démocratique du Congo et dans la région du *rift albertin*, (Vandecasteele *et al.*, 2009). Il s'avère que Butembo ne fait pas exception.

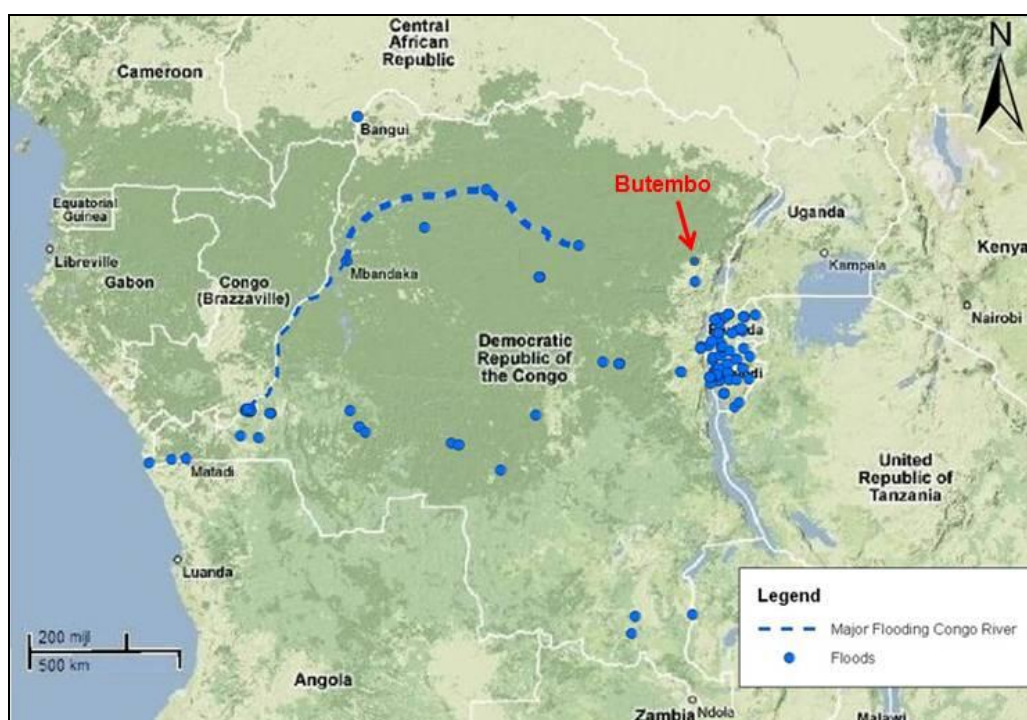


Figure 6.3. Zones confrontées aux inondations en République Démocratique du Congo et dans la région du rift albertin (Vandecasteele *et al.*, 2009).

6.1.3. Objectifs de cette étude

Cette partie de la thèse se fixe les objectifs suivants :

1. Reconstitution de l'inondation du 6 octobre 2009
2. Une carte du périmètre inondé en 2009 et
3. des prévisions dans le futur en l'absence de mesures de prévention

Les détails des zones inondées et les zones présentant un risque d'inondation dans le futur sont illustrés sur la grande carte reprenant les risques hydrologiques de Butembo qui se trouve en ANNEXE III de cette thèse.

Dans un environnement SIG, l'identification par une cartographie des zones affectées par les inondations permet de délimiter l'aléa et d'identifier spatialement le niveau pour lequel les populations riveraines occupent des zones à fort risque. L'outil servira d'aide à la décision pour les autorités municipales. Cette analyse sert aussi comme strate de base pour les scientifiques soucieux d'affiner la compréhension des phénomènes hydrologiques en territoire urbain de Butembo. L'approche peut donc être appliquée dans les autres entités confrontées à des risques similaires. L'option d'intervention de base est la réduction de la genèse du ruissellement sur l'entièreté du bassin versant avec une attention particulière sur les collines.

6.2. Matériel et méthodes

6.2.1. Caractères physiques du bassin versant de la Kimemi qui favorisent les inondations

Les caractéristiques physiques qui sont propices à la formation des inondations dans les fonds de vallées au sein du bassin versant de la Kimemi sont présentées dans cette section. La figure 6.4 présente le relief du bassin versant de la Kimemi, la zone qui a été affectée par les inondations intervenues le 6 octobre 2009 ainsi que les principaux cours d'eau. Ce relief est accidenté. Mais le centre de la ville, irrigué par la rivière Kimemi elle-même, est presque plat.

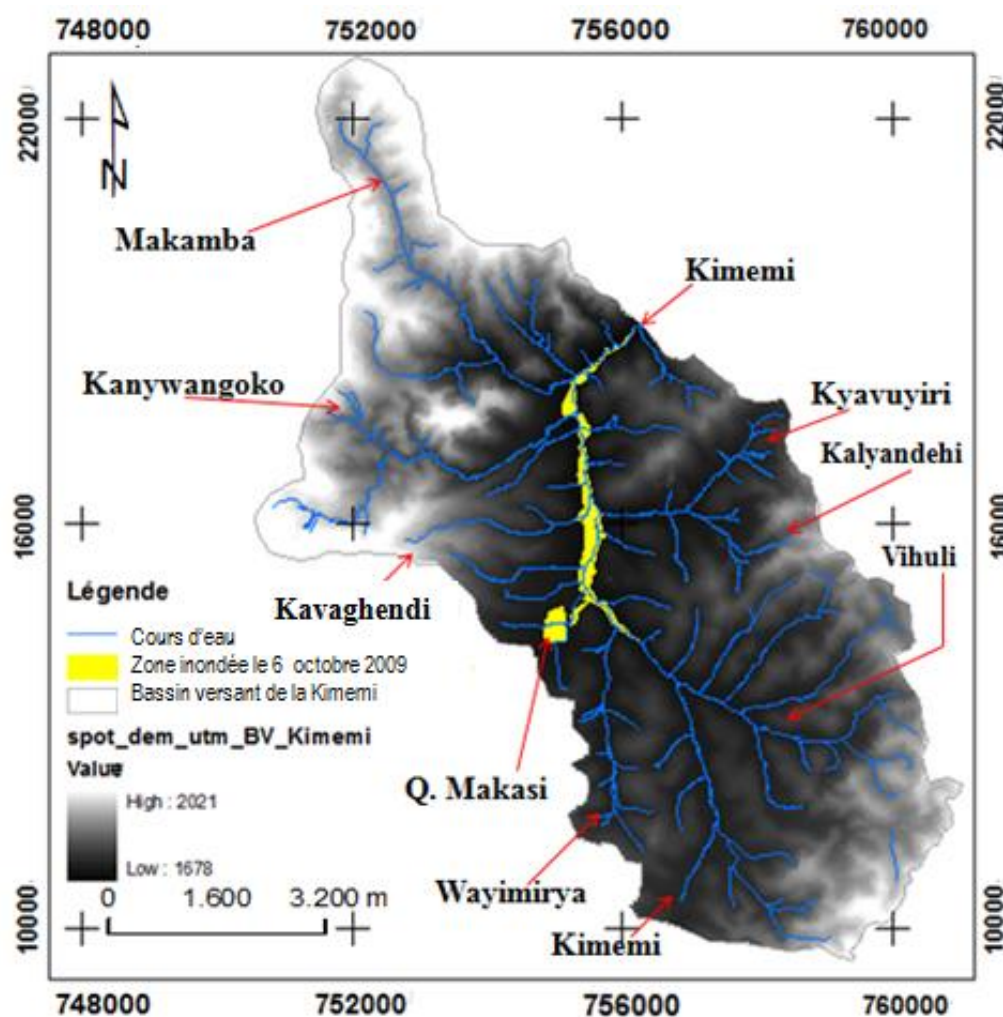


Figure 6. 4. Relief, zone inondée le 6 octobre 2009 et principaux cours d'eau du bassin versant de la Kimemi. Traitement de l'image SPOT5 de 2008.

Le tableau 6.2 présente les gradients de pentes suivant les principaux cours d'eau au sein du bassin versant de la Kimemi.

Tableau 6.2. Gradient de pente des principaux cours d'eau du bassin versant de la Kimemi.

Cours d'eau	Altitude en amont [m]	Altitude en aval [m]	Dénivelé [m]	Longueur [m]	Gradient de pente [m/m]
Kimemi	1736	1682	54	8800	0,61
Makamba	1886	1677	209	5124	4,08
Kanywangoko	1891	1686	205	3682	5,57
Kavaghendi	1886	1690	196	2783	7,04
Wayimirya	1754	1699	55	3376	1,63
Vihuli	1823	1707	116	3653	3,18
Kyavuyiri	1744	1695	49	3100	1,58

Le gradient de pente de la rivière Kimemi elle-même est faible, soit 0,61 m/m. Il en est de même pour la Kyavuyiri (1,5) un de ses confluent et qui irrigue une zone relativement

plane. En revanche, les autres affluents présentent un gradient de pente considérable allant de 3,18 à 7,04. Ces affluents prennent leur source dans les deux versants opposés de l'est et de l'ouest qui sont à une altitude élevée par rapport au centre ville où coule la rivière Kimemi. Ces gradients de pente considérables font que les eaux de ruissellement sont transférées rapidement vers la vallée de la Kimemi. Dans les chapitres précédents il a été montré que l'urbanisation contribue à l'augmentation de ce transfert.

En outre, le seuil en aval constituant le niveau de base local de la Kimemi vers la ville basse contrarie l'évacuation rapide des eaux. Ce seuil, par sa lithologie (filons de schistes avec intercalation de quartz encore sains), ne s'est pas incisé profondément. On peut toutefois noter que la crue elle-même peut être intensifiée à la suite des limons qui se déposent en aval et qui favorisent le rehaussement du fond en amont du seuil de Biasa réduisant considérablement la hauteur des berges. La rupture de pente au niveau des vallées de Kikyo ralentit le flux qui dépose progressivement sa charge solide vers la base des collines par sédimentation progressive.

6.2.2. Evaluation de l'évolution de l'imperméabilisation du sol dans le bassin de la Kimemi

Nous cherchons à comprendre le rôle joué par l'affectation du sol à la suite de l'urbanisation, dans l'augmentation des débits pic du ruissellement dans le bassin versant de la Kimemi.

Cet exercice a déjà été fait au chapitre IV sur la genèse du ruissellement au niveau de l'entité administrative dans son intégralité. La plupart des inondations se produisant au sein du bassin versant de la Kimemi, dans cette section nous focalisons l'attention sur l'affectation du sol en adoptant la même classification par maximum de vraisemblance.

6.2.3. Délimitation des zones inondées des fonds de vallées en date du 6 octobre 2009.

La méthode de transect a été utilisée pour récolter les données. La méthode adoptée était le transect suivant certains axes dictés par la présence de l'eau. Elle consistait à parcourir les zones inondées suivant les axes accessibles (route, rue, avenue, parkings, marché et quelques parcelles) en indiquant aussi les périphéries des zones atteintes par l'eau. Les

coordonnées GPS de ces points étaient marquées dans un carnet dans lequel une colonne était réservée à la hauteur de l'eau à chaque station ayant fait l'objet des mesures.

Pour les sites visités après la décrue, la mesure de hauteur atteinte par l'eau s'effectuait en se basant sur les signes du niveau atteint par l'eau qui étaient encore bien nets sur les murs des maisons et sur les arbres. La profondeur atteinte par l'eau faisait l'objet des mesures. Un mètre ruban était utilisé. La précision est de l'ordre du centimètre. Les informations recueillies ont été transformées en *shapefile* et intégrées dans le projet SIG de cette étude. La figure 6.5 présente un exemple d'échantillonnage.

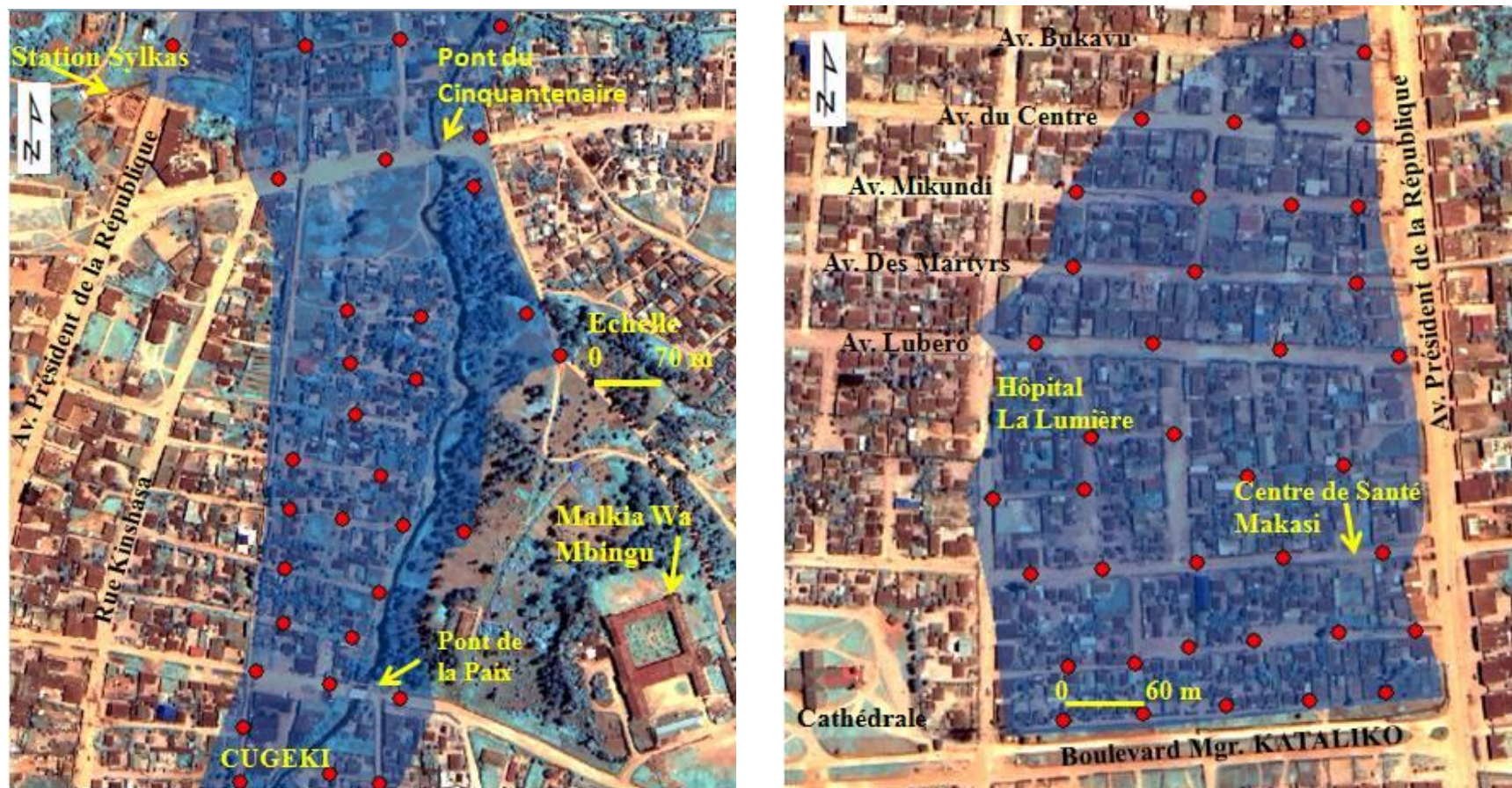


Figure 6. 5. Exemples d'échantillonnage par transects. Les points rouges représentent les stations de mesures. Fond, Image Quickbird du 18 avril, 2005. Les zones inondées dans les bas fonds ont également été localisées le long d'un profil longitudinal de la Kimemi ainsi que sur le réseau hiérarchisé du bassin de cette rivière.

6.3. Résultats

6.3.1. Facteurs de la recrudescence des inondations

Il a été démontré dans le chapitre sur la caractérisation des pluies que ce n'est pas le climat qui est à la base de l'augmentation du ruissellement. On peut supposer que les inondations de ces dernières années s'expliqueraient plus par l'imperméabilisation du bassin versant de la Kimemi.

La dégradation du couvert végétal depuis des décennies a marqué le bassin versant de la Kimemi. L'analyse des images satellitaires de SPOT5, pour la période allant de 1987 à 2004, prouve une occupation du sol dont l'augmentation de la surface productrice de ruissellement est considérable. Cette action anthropique élimine donc l'effet retardateur de la concentration des eaux de pluie et des écoulements que jouait la végétation auparavant.

La figure 6.6 illustre l'évolution de l'occupation du sol entre 1987 et 2004 sur le bassin versant de la Kimemi.

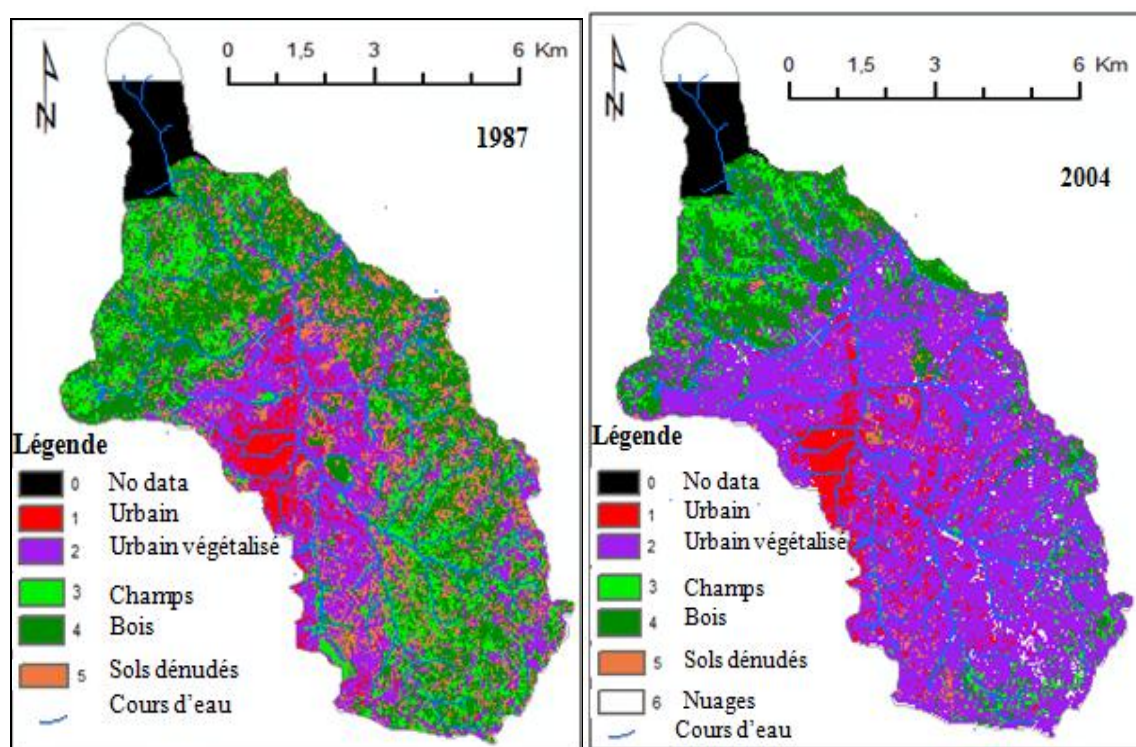


Figure 6.6. Evolution de l'occupation du sol au sein du bassin versant de la Kimemi à Butembo entre 1987 et 2004. Traitement des images SPOT.

On se rend compte que l'urbanisation s'est considérablement intensifiée entre 1987 et 2004.

La figure 6.7 présente l'évolution de la composition de l'occupation du sol entre 1987 et 2004 (en km²) au sein du bassin versant de la Kimemi tandis que la figure 6.8 montre l'évolution comparée de la spatialisation des zones artificialisées productrices de ruissellement comparativement aux zones susceptibles d'atténuer cet écoulement superficiel par sa couverture végétale.

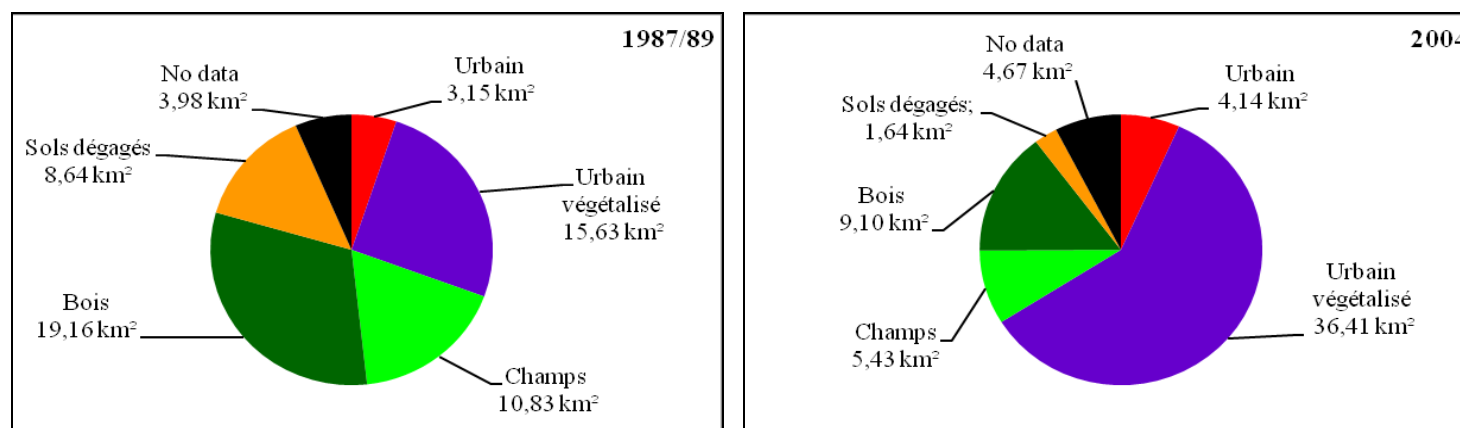


Figure 6.7. Evolution de la composition de l'occupation du sol entre 1987 et 2004 (en km²) au sein du bassin versant de la Kimemi. L'exutoire est considéré ici comme le point aval excentré de la zone qui s'est inondée en 2009.

Les zones productrices de ruissellement (urbain, urbain végétalisé et sols dégagés) ont considérablement évolué au fil du temps (Fig. 6.8).

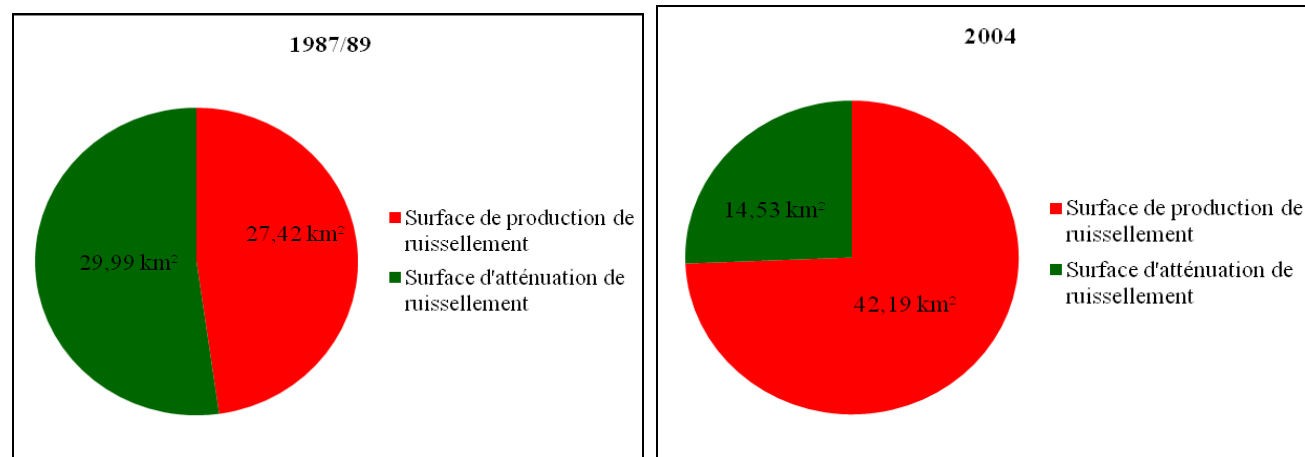


Figure 6.8. Evolution comparée de la spatialisation des zones artificialisées et des zones boisées et champs emblavés au sein du bassin versant de la Kimemi à Butembo entre 1987 et 2004.

Entre 1987 et 2004, la surface productrice de ruissellement est passée de 27,42 km² à 42,19 km². Cette dégradation notoire des écosystèmes susceptible de retarder le transfert des eaux vers les zones vulnérables ne peut que se solder par un accroissement de ruissellement. Les écoulements superficiels s'accroissent même si les pluies restent inchangées ou si elles continuent à tendre à la baisse.

6.3.2. Localisation des zones inondées en date du 6 octobre, 2009

Quelques replats que l'on peut remarquer en faisant le profil longitudinal du cours d'eau principal lui-même (fig. 6.9) constituent des zones où se produisent des inondations qui durent longtemps. Ces zones sont rencontrées entre le croisement de la Kihumulire et la Kimemi dans la circonscription du quartier Makoka et la jonction entre la Kalwikira et le pont de la Paix sur la route menant vers Muchanga. Cette zone est communément appelée « *Kitovero* » pour signifier zone marécageuse, autrement dambo. Il convient de noter aussi que les inondations durent longtemps entre Makerere et le pont de Biasa qui se trouve immédiatement après le cours d'eau venant de la source de Lyabo à Kikyo.

La figure 6.9 illustre le profil longitudinal de la rivière Kimemi, de la source de Kavughavugha à la limite de la zone qui a été inondée en 2009. La briqueterie de la procure, le pont de Vulindi, juste à côté du marché de Biasa, Kiriva et Busigha sont aussi des zones les plus vulnérables. Ces zones sont matérialisées par des traits rouges.

Les noms marqués sur le profil représentent soit les cours d'eau qui se jettent dans la Kimemi, soit le quartier ou la cellule connue d'une grande majorité de la population de Butembo.

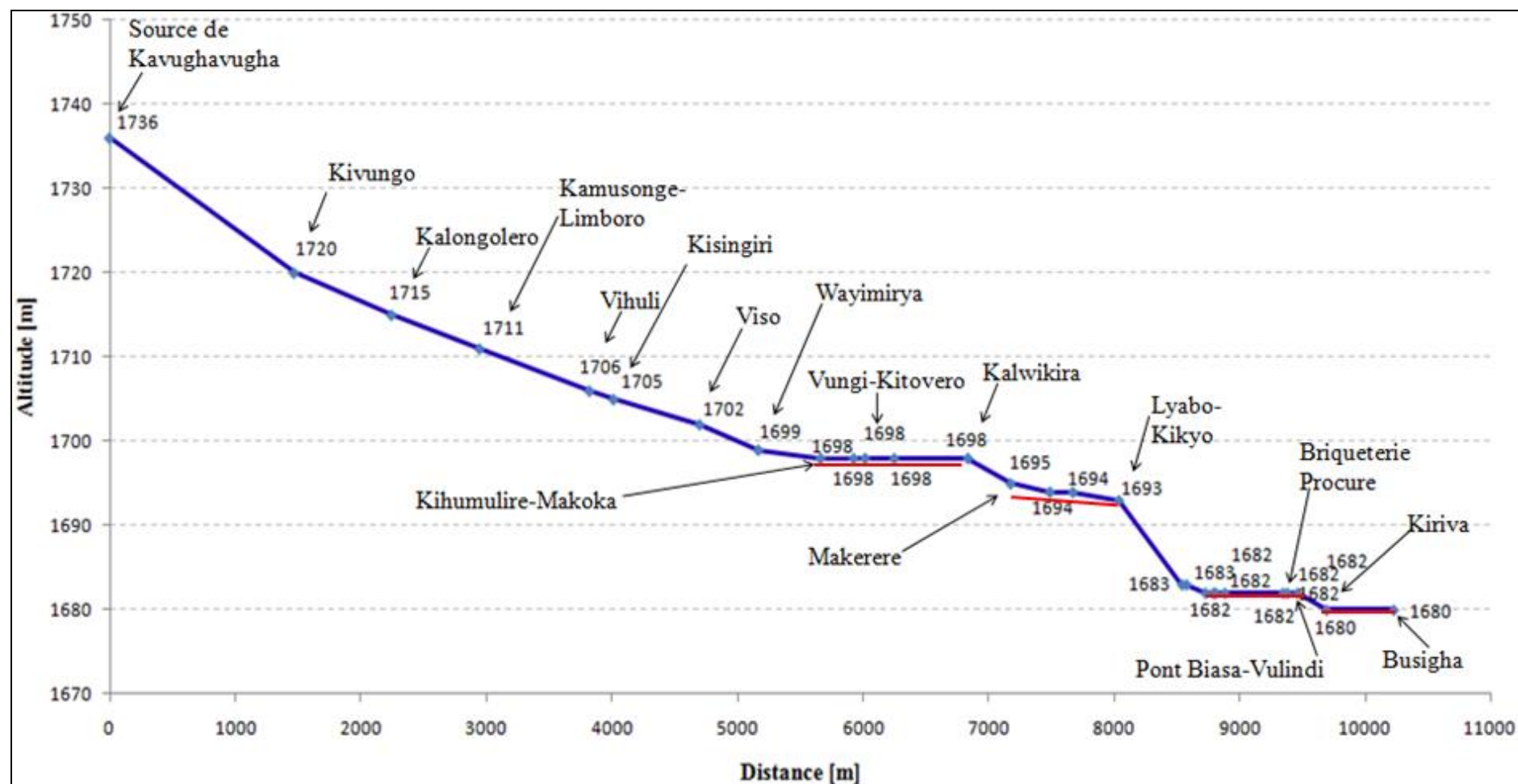


Figure 6. 9. Profil longitudinal de la rivière Kimemi circonscrite dans la zone inondée en date du 6 octobre 2009.

6.3.2.1. Localisation des inondations dans la juridiction administrative de la ville de Butembo.

La figure 6.10 présente la localisation des zones inondées en date du 6 octobre 2009.

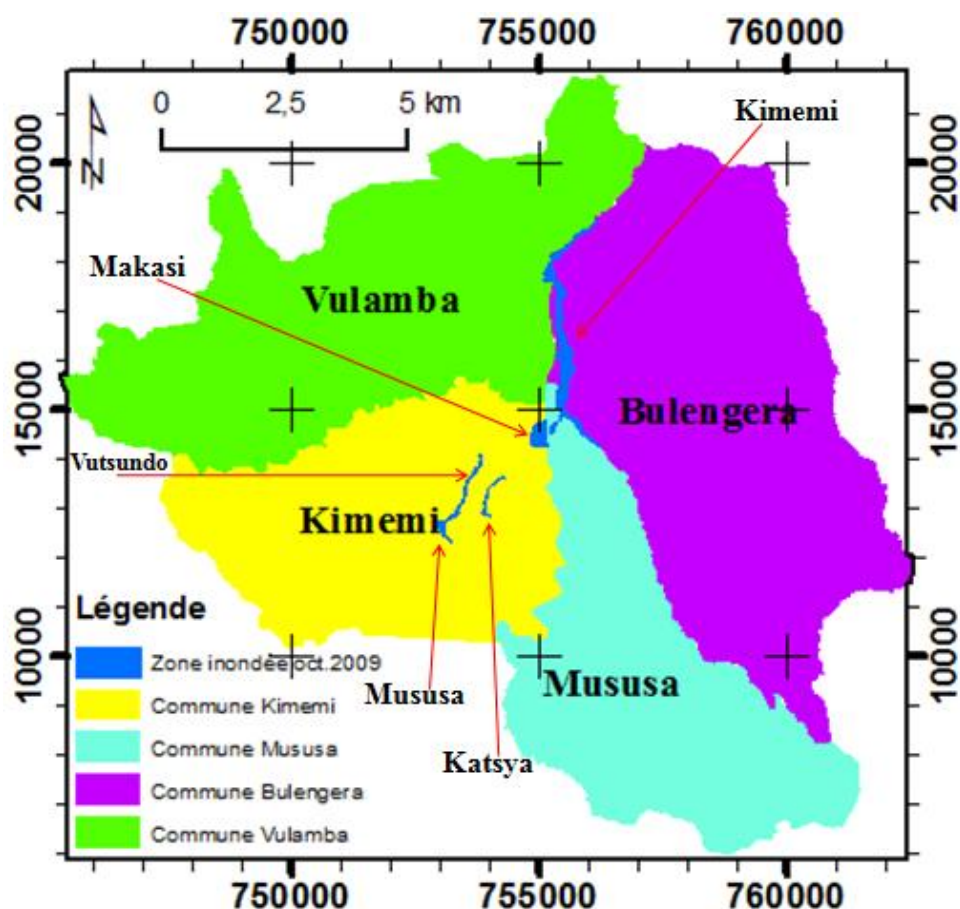


Figure 6. 10. Localisation des zones inondées en date du 6 octobre 2009 en fonction de la juridiction administrative de la ville de Butembo.

Toutes les quatre communes de la ville de Butembo sont confrontées aux risques d'inondation. Le tableau 6.3 présente les superficies des zones ayant été affectées par les inondations en date du 6 octobre 2009.

Tableau 6. 3. Superficies affectées par les inondations du 6 octobre 2009.

N°	Zone affectée	Superficie [ha]
1	Kimemi	68
2	Makasi	13
3	Katsya	3
4	Mususa	4
5	Vutsundo	4
Total		92

92 hectares de terres en zone urbaine ont été affectés par les inondations du 6 octobre 2009. Les déferlements des eaux à travers les rues et les avenues ont eu des conséquences désastreuses aussi bien sur les infrastructures que sur les activités en perturbant l'harmonie de la ville.

6.3.2. 2. Carte de risque d'inondation future en ville de Butembo

La figure 6.11 présente la zone à risque d'inondation dans les fonds des vallées dans les jours à venir si jamais les précautions ne sont pas prises dès maintenant.

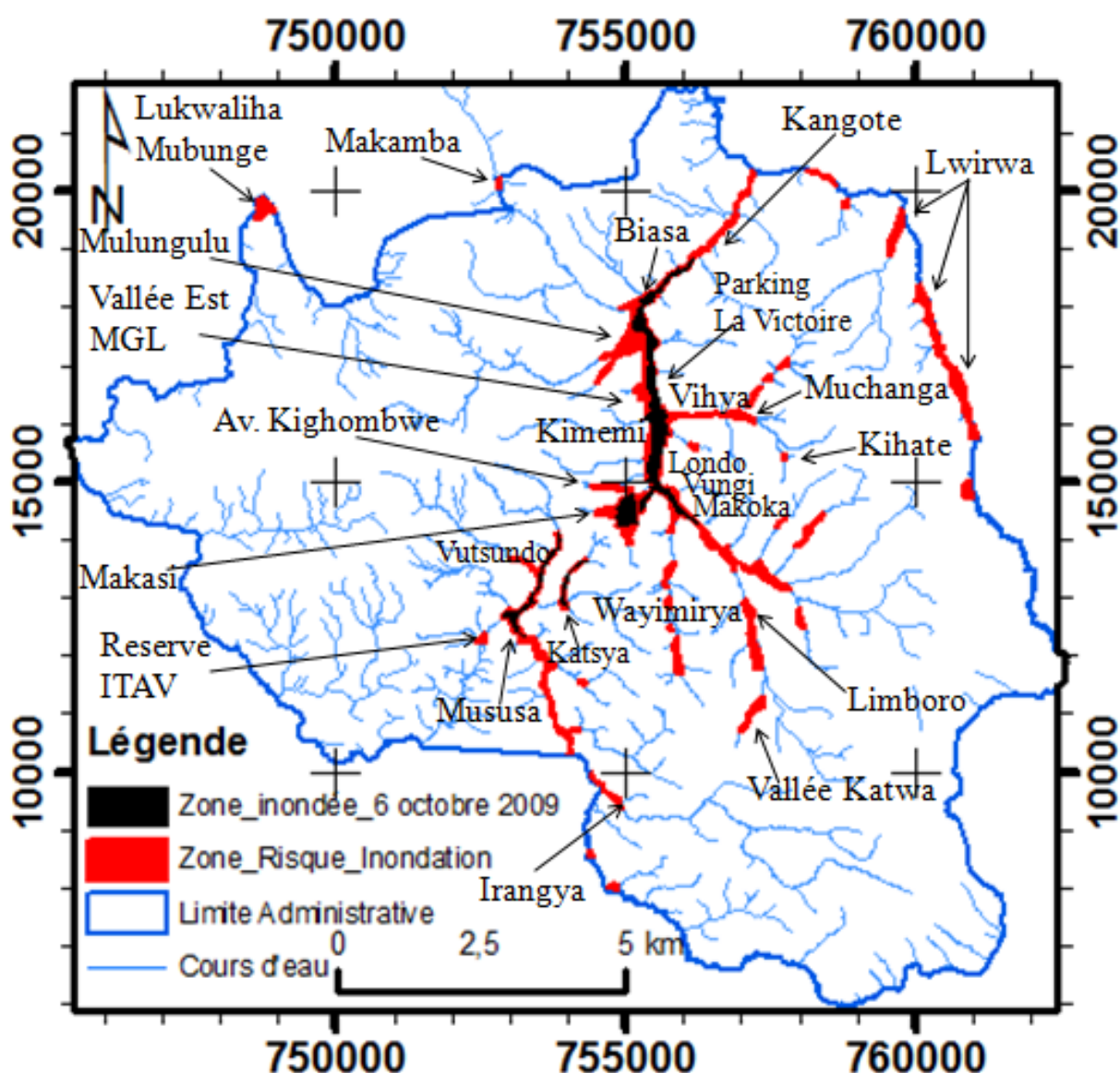


Figure 6. 11. Carte de risque d'inondation dans les bas fonds de la ville de Butembo.

Ces zones sont indiquées en détail sur la carte de la ville de Butembo au 1/25000 en ANNEXE III.

Les zones présentant des risques futurs d'inondation s'échelonnent sur une superficie de 315 ha.

Beaucoup d'autres anciens dambos anthropisés, mais sans cours d'eau important, notamment au quartier Makasi, au centre ville, sont confrontés aux inondations liées essentiellement aux eaux de ruissellement venant de l'ensemble du bassin versant. La situation est exacerbée par des seuils anthropiques liés au relèvement des chaussées lors des aménagements des ponts. Les buses dimensionnées dans le temps n'arrivent plus à évacuer rapidement l'eau suite à l'augmentation des débits de pic du ruissellement liée à l'imperméabilisation, due à son tour à l'urbanisation toujours croissante. Le taux de prévalence des maladies hydriques dans ces zones est considérable selon les analyses faites par le CAUB. En effet, les eaux d'inondations charrient les contenus des WC et les évacuent en les répandant le long de leur parcours. Le centre de santé de Kivika non loin du Parking la Victoire est le plus touché. Le risque est important, mais doit être quantifié objectivement sur des bases scientifiques.

En tenant compte d'une urbanisation galopante, les inondations vont devenir plus fréquentes et également affecter des superficies plus importantes. Il est réaliste de considérer que les fonds plats de la quasi-totalité du réseau hydrographique de la ville de Butembo seront sujets d'inondations dans l'avenir. Toutes ces zones ont été indiquées en détail sur la nouvelle carte de la ville de Butembo à 1/25.000 en ANNEXE III.

En outre, la pluie seuil pour produire plus d'inondation risquera d'être moins importante que celle qui déclenche ce phénomène à mesure que l'imperméabilisation des surfaces considérables ne cessera de croître. On peut s'attendre dans l'avenir à des récurrences plus élevées des inondations avec des conséquences plus désastreuses sur l'environnement. La réponse hydrologique réservée à ce changement du régime hydrologique se traduira certainement par l'amplification des risques dans les zones déjà affectées et pourra déclencher des nouveaux cas si les mesures ne sont pas prises pour l'instant.

Le comble est que toutes ces zones sont déjà habitées, exception faite de la zone circonscrite le long de la Lwirwa. Dans toutes ces zones, on pratique l'agriculture urbaine et

périurbaine. Les coûts de pertes liées aux inondations actuelles et futures seront énormes, mais restent à calculer de façon détaillée pour mesurer la vulnérabilité induite par ces phénomènes devenus récurrents sur le territoire urbain.

6.4. Conclusion partielle

6.4.1. Les causes fondamentales des inondations

Même s'il est difficile de mesurer de façon précise les facteurs anthropiques, ceux-ci sont les éléments déclencheurs du phénomène d'inondation en ville de Butembo. L'analyse des événements pluviométriques révèle une tendance à la baisse. On ne pourrait donc pas attribuer ces occurrences des inondations aux pluies comme laisse croire l'opinion de la population urbaine de Butembo, toutes les pluies de ces dernières années ayant un caractère normal pour la contrée. Ce n'est donc pas le climat qui en est la cause, mais plutôt l'urbanisation.

Cette urbanisation agit de deux manières différentes :

1. elle conduit à une augmentation du coefficient de l'écoulement : des pluies de même intensité produisent plus d'eau de surface ;
2. les routes forment des allées privilégiées pour des eaux de ruissellement. Elles augmentent la connectivité hydrologique des bassins versants et transfèrent les eaux de ruissellement vers les zones vulnérables dans un laps de temps de plus en plus court. L'apport massif d'eau dans les fonds de vallée dépasse de plus en plus la capacité d'évacuation d'eau des vallées. Il s'ensuit un débordement des cours d'eau conduisant à des inondations.

6.4.2. Evolution de la pluie seuil créant des inondations

En 2009, la pluie qui a produit les inondations catastrophiques était de 70,2 mm en deux heures et demie. Etant donné que le coefficient d'écoulement ainsi que la connectivité hydrologique à la suite d'une urbanisation galopante vont s'accroître dans l'avenir, on peut s'attendre à ce que des pluies plus petites vont avoir les mêmes effets que celle de 70,2 mm en 2009. Selon les analyses climatiques, des inondations se produiront alors plusieurs fois par année.

6.4.3. Prévisions et carte des risques

Cette carte se trouve en ANNEXE III. Elle présente les inondations du 6 octobre 2009 en cyan. Les endroits de risque d'inondation dans l'avenir sont indiqués en bleu foncé. Les populations riveraines des zones inondables de Butembo demeurent toujours vulnérables et les problèmes d'inondation restent entiers. Si les précautions ne sont pas prises en temps réel, l'expansion ininterrompue de la ville, les conséquences spatiales, sociales et environnementales finiront par devenir hautement indésirables.

L'urbanisation sans cesse croissante va augmenter la torrencialité collinaire ainsi que les inondations de fond de vallée. Si les pluies de 2009 ont conduit à l'inondation s'étendant sur 92 ha, la torrencialité s'amplifiant, les zones affectées par les inondations vont aller au-delà de 315 hectares.

6.4.5. Interventions possibles

Les stratégies de mitigation devraient s'inscrire dans les programmes visant à réduire très sensiblement la genèse du ruissellement et à ralentir son transfert vers la vallée.

Chapitre septième

Seuils topographiques des glissements de terrain à Butembo

Chapitre VII. Seuils topographiques des glissements de terrain à Butembo

7.1. Introduction

Le terme « glissement de terrain » est utilisé dans le cadre de ce travail dans son sens ‘américain’, c’est-à-dire un mot qui comprend tout le spectre des mouvements de masse. Concrètement, il s’agit à Butembo, essentiellement de mouvements de masse du type ‘affaissement’, ‘chute’, ‘coulée’ et ‘glissement’ sur un plan de rupture du sol. La nomenclature de Dikau *et al.*, (1996) a été utilisée.

7.1.3. Le contexte du glissement de terrain en Afrique

Les glissements de terrain sont présentés comme des processus géologiques et géomorphologiques naturels concourant significativement à façonner les paysages de la terre (Hovius *et al.*, 2000, Malamud *et al.*, 2004 ; Dadson *et al.*, 2004). Globalement, il y a lieu de penser, en se basant sur les statistiques avancées par Gares *et al.*, (1994) et par Alcántara-Ayala (2002) que les glissements de terrain ne sont responsables que d’un très faible pourcentage, en termes de victimes et de dégâts causés par les catastrophes naturelles. Cependant, il y a lieu de noter avec Schuster (1996) que ceux-ci sont à la base de pertes socio-économiques énormes comparativement à celles qui leur sont imputées.

Malgré les conséquences sociales et économiques inhérentes aux glissements de terrain sur le continent africain (Ngechu et Ichang’I, 1999 ; Ayonghe *et al.*, 2004 ; Knapen *et al.*, 2006) et leur rôle reconnu pour le développement des versants (Ayalew et Yamagishi, 2004 ; Knapen *et al.*, 2006) des renseignements sur ce processus géomorphologique sont restés, jusqu’à nos jours, beaucoup plus restreints en Afrique, comparativement aux autres continents. En guise d’illustration, dans une étude axée sur les glissements de terrain avec des cas de pertes de vie humaine au niveau mondial en 2007, seulement 13 cas sur 359 sont rapportés par Petley (2008) pour l’Afrique suggérant, en outre qu’un certain nombre d’autres glissements de terrain mortels ferait partie des données manquantes en raison de leur occurrence dans des zones éloignées ou parce qu’elles sont déclarées en langues locales. Pourtant, un seul cas isolé de glissement de terrain meurtrier s’est produit en Uganda la nuit du 1^{er} au 2 octobre 2010 avec trois villages ravagés et plus de 400 morts (http://www.lemonde.fr/afrique/2010/03/02/glisement-de-terrain-meurtrier-en-uganda_1313444_3212.html) et témoigne une sous-estimation de ces événements sur le continent africain.

Vu le risque encouru et le manque d'information en rapport avec les glissements de terrain en Afrique, plusieurs études relatives aux glissements de terrain mortels et destructeurs ont été menées durant ces dernières décennies (Moeyersons, 1981, 1989, 2001, 2003 ; Moeyersons *et al.*, 2004, 2008 ; 2009 ; Garland et Olivier, 1993 ; Temple et Rapp, 1972 ; Ibe et Ebe, 2000 ; Nyssen *et al.*, 2003 ; Ngechu et Ichang'I, 1999 ; Ngecu et Mathu, 1999 ; Ngechu *et al.*, 2004 ; Claessens *et al.*, 2007 ; Knapen *et al.*, 2006 ; Zogning *et al.*, 2007).

En Afrique centrale où plusieurs villes sont confrontées à ces processus, des études récentes font état d'une vulnérabilité de plus en plus prégnante induite par des glissements de terrain et des pertes de vies humaines qui excèdent de loin les accidents liés aux mouvements sismiques (Vandecasteele *et al.*, 2009 ; 2010 ; Vandecasteele *et al.*, 2011). Les villes profondément affectées par les risques liés aux glissements de terrain sont notamment : Bukavu, Uvira, Bujumbura (Base des données des catastrophes naturelles en Afrique centrale: <http://www.africamuseum.be/collections/browsecollections/naturalsciences/earth/hazard>), mais toute la zone le long du Rift Albertin est en cause. Butembo, milieu longtemps resté enclavé par rapport au monde scientifique n'échape donc pas à ce phénomène qui prend de l'ampleur en Afrique centrale. La figure 7.1 présente la distribution spatiale des mouvements de masses qui se produisent le long du Rift Albertin.

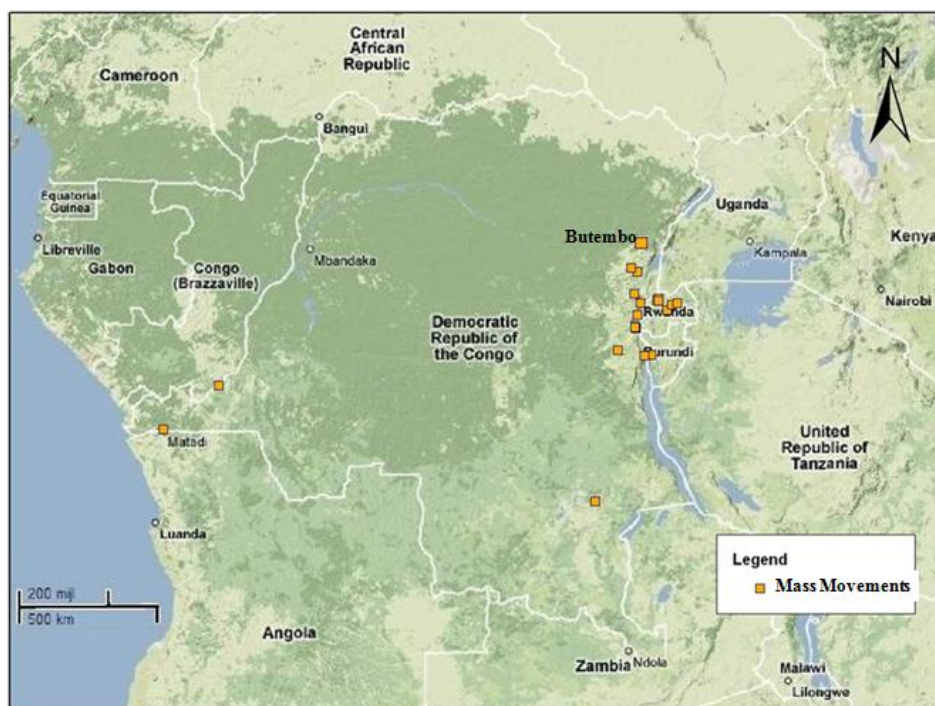


Figure 7.1. Distribution spatiale des mouvements de masses le long du Rift Albertin (Vandecasteele *et al.*, 2009).

7.1.1. Problèmes de glissements de terrain à Butembo

La ville de Butembo est confrontée à pas mal de petits glissements de terrain :

1) Le long des incisions des ravins de fond de vallée : les ravines mordent dans les alluvions des anciens dambos où les incisions sans cesse croissantes entraînent le dégagement des berges qui atteignent rapidement une hauteur critique pour laquelle elles deviennent potentiellement instables conduisant aux affaissements des berges. Ces affaissements le long des berges des ravins sont très prononcés là où les eaux de ruissellement sont concentrées par les routes et les avenues. Ils s'accompagnent des pertes importantes de maisons et de la destruction des ponts. Par ces affaissements, les profils transversaux prennent une forme triangulaire en V.

2) Un événement soudain de glissement de terrain collinaire s'est déclenché à Kavitero en juillet 2007. 6 maisons ont été détruites, 16 autres sont affectées et présentent des signes de destruction progressive. Plus de 3 hectares de terres sont touchés. En amont, une pente abrupte, curvilinéaire fait penser à une zone de décrochement d'un ancien glissement de terrain qui a prédisposé ces sols à des remobilisations futures. Des études sur les glissements de terrain montrent que la réactivation des masses ayant déjà glissé était un phénomène plus fréquent et représente par conséquent un aléa plus important (Pike *et al.*, 2003 ; Reichenbach *et al.*, 2005 ; Catani *et al.*, 2005). Ce processus suscite beaucoup de curiosité et nous a poussé à faire une étude minutieuse sur l'inventaire de glissements de terrain dans la partie de la ville couverte par des photos aériennes sans couverture nuageuse

3) Des traces d'anciens glissements de terrain qui sont restés actifs pour la plupart et dont l'âge reste inconnu donnent une indication des glissements de terrain qui se seraient déclenchés au moins pendant la période de couverture forestière à travers le territoire urbain.

Etant donné que l'évolution des versants des cours d'eau ou des ravins par glissement est liée directement à l'incision verticale des ravins, la prévention de ces types de glissements réside essentiellement dans la prévention ou le freinage de l'incision verticale par le biais de la réduction du ruissellement et de ses débits pic. Mais, le cas de Kavitero est différent. Il s'avère indispensable de connaître les causes de la remobilisation en ce lieu parce qu'il existe

encore beaucoup d'autres anciens glissements de terrain dans le périmètre urbanisé qui pourraient se réactiver et causer beaucoup de dommages.

La figure 7.2 donne une représentation du phénomène de la réactivation du glissement de Kavitero. Quant à la figure 7.3, elle illustre certains faits saillants sur le même site affecté par la remobilisation de terres. **a)** Glissement de terrain multiple (Hutchinson, 1988) ; **b)** Maison qui penche en amont de la réactivation dans l'ancienne loupe, signe d'un glissement qui est resté actif ; **c)** Tige de cyprès qui penche dans le sens opposé du glissement dans la loupe de la zone réactivée ; **d)** Fissures vers le pied du glissement où le bombement est progressif, signe d'une masse de terre en mouvement **e)** Présence de flaques d'eau claires dans les masses de terre affaissées en aval du glissement multiple ; **f)** Ravinement et basculement de blocs en aval, dans une zone où se développent des plantes hydrophiles liées à la présence des flaques d'eau ; **g)** Fissure rectilinéaire séparant la masse qui a bougé et celle qui n'a pas bougé ; **h)** Fissures et affaissement typiques des dommages structurels aux bâtiments (Flageolet, 1999) ; **i)** Fissures alimentées par l'eau claire venant des écoulements souterrains ; **j)** Fissures dans les bâtiments au sein de la loupe ; **k)** Fissures limitant la zone qui s'est réactivée et témoignage de vulnérabilité des maisons voisines situées dans l'ancienne loupe ; **l)** Fissures liées aux affaissements dans le salon de la maison fortement affectée à la limite du point de rupture.



Figure 7.2. Représentation du phénomène du glissement de terrain de Kavitero



Figure 7.3. Différentes caractéristiques de manifestations du glissement de terrain de Kavitero

Les figures 7.4, 7.5 et 7.6 présentent les manifestations de glissement de terrain le long des berges des cours d'eau.



Figure 7.4. Glissement des terres le long des berges des cours d'eau dans la vallée de la Wayimirya.

- a** : tiges des bananiers le long des berges. Le poids de la phytomasse amplifie le risque
b : tiges des bananiers avec rejets ayant glissé sur les berges de la Wayimirya sous l'effet gravitationnel et restées verticales au fond de la ravine



Figure 7.5. Processus de glissement de terrain le long des berges des cours d'eau à Butembo



Figure 7.6. Glissement des terrains le long des ravins de Kisingiri. a) Glissement important en aval de l'ancien cimetière de Kisingiri ; b) des vieux tombeaux interceptant de l'eau et prédisposant au glissement ; c) glissement et élargissement du ravin.

7.1.2. Objectifs de cette étude

Cette étude se fixe un double objectif. D'une part, elle cherche à trouver la cause de la remobilisation du glissement de Kavitero. D'autre part, elle focalise son attention sur les causes des autres glissements de terrain inventoriés dans la zone d'étude.

L'étude des glissements de terrain dans la contrée se heurte à notre ignorance quant à la contribution relative de la sismicité et des pressions des eaux interstitielles dans le sol pour susciter des glissements de terrain. A partir de l'équation de l'accélération critique de Newmark (1965),

$$a_c = (FS-1)g \sin \alpha$$

où

a_c est égale à l'accélération critique ;

FS est le facteur de sécurité statique, déterminé par les conditions hydrologiques ;

α est la pente.

il y a moyen de démontrer que des vibrations critiques conduisent à la mise en marche de glissements de terrain sur des pentes moins fortes et avec des teneurs en eau dans le sol réduites.

Compte tenu de l'absence dans toute la région du *rift albertin* de données de mécanique des sols et d'analyse statistique sur les facteurs causaux, Moeyersons *et al.*, (2004 ; 2009) ont appliqué avec un certain succès le modèle de contrôle topographique de Montgomery et Dietrich (1994) mais adapté aux conditions géomorphologiques du Sud du Rwanda sur les glissements de terrain à Bukavu et à Uvira. Chaque fois on constate qu'un nombre restreint de glissements qui reposent sur des structures tectoniques actives, comme de failles, montrent une combinaison de pente naturelle à l'endroit de l'entaille et la surface drainée vers la tête de l'entaille, nettement plus petite que les autres glissements pour lesquels l'origine sismique est moins évidente.

Ce modèle est appliqué dans le cadre de cette étude en vue d'apporter un jugement sur la cause probable de la remobilisation du glissement de Kavitero. Cette analyse constitue l'ultime objectif de cette partie de la thèse. Elle est clôturée par l'énonciation de mesures de prévention et la mise en place de stratégies de mitigation afin de minimiser les dommages causés par les glissements de terrain.

7.2. Matériels et méthodes

7.2.1. Contrôle topographique des glissements de terrain

Montgomery et Dietrich (1994) ont observé que les entailles collinaires d'une région 'homogène' en termes de lithologie, climat, topographie, utilisation des sols forment un nuage allongé quand on les range dans un graphique avec en X la superficie (en ha) de la zone drainée vers la tête de l'entaille et en Y la tangente de l'angle naturel à l'endroit de la tête de l'entaille. La figure 7.7 montre l'exemple de Coos Bay (Orégon), où l'échelle des deux axes sont logarithmiques.

Une enveloppe linéaire délimite le nuage d'en bas. L'équation de cette enveloppe pour Coos Bay est indiquée. Cette enveloppe constitue en quelque sorte une combinaison seuil de pente et de surface drainée, au-delà de laquelle les entailles, y compris les glissements par pressions d'eau, peuvent se développer. En résumé Montgomery et Dietrich (1994) considèrent la zone au-dessus de l'enveloppe comme hydrologiquement instable, tandis que la zone sous l'enveloppe serait stable. En principe, des entailles occasionnées par la force hydrique ne peuvent donc pas se retrouver dans cette zone.

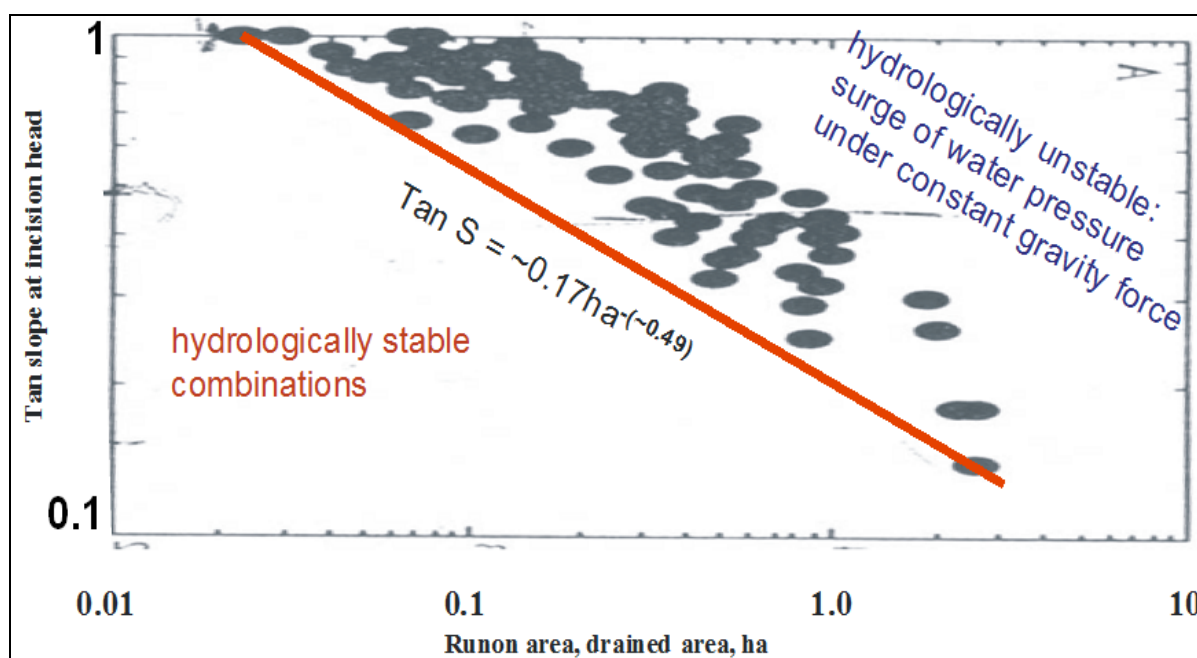


Figure 7.7. Enveloppe linéaire de Coos Bay, (Montgomery et Dietrich, 1994)

Les données dans l'article de Montgomery et Dietrich (1994) permettent de construire plusieurs enveloppes régionales pour les Etats de l'Oregon, Californie et Nevada (Fig. 7.8).

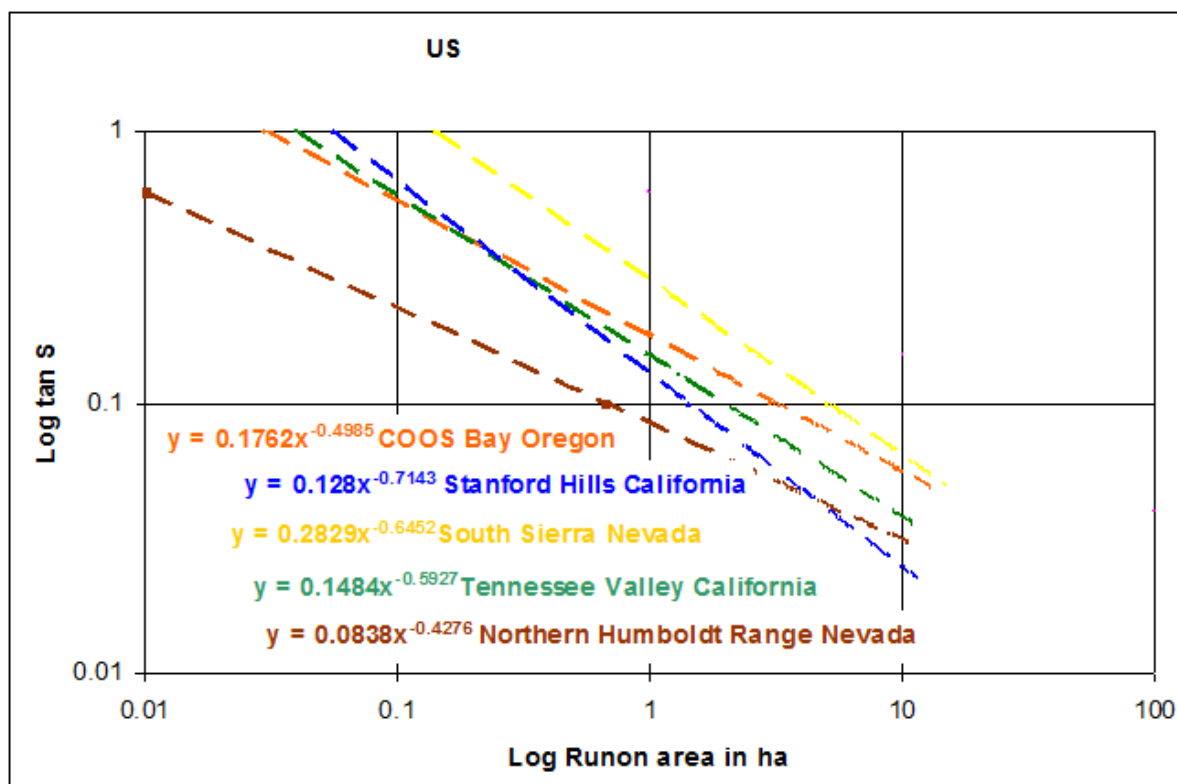


Figure 7.8. Enveloppes régionales pour les Etats de l'Orégon, Californie et Nevada (Montgomery et Dietrich, 1994)

Inspiré par les Américains, Moeyersons (2003) a établi aussi une enveloppe régionale pour le Sud du Rwanda (fig.7.9). Mais la manière dont cette enveloppe a été établie est différente. Au lieu de se servir d'un nuage de données pour construire l'enveloppe, Moeyersons décrit en détail quelques cas d'incision collinaire qui se sont développés à la suite de l'intervention humaine sur l'organisation de l'écoulement superficiel. Cette méthode a été adoptée pour éviter toute influence sismique sur l'enveloppe. Moeyersons obtient une enveloppe de combinaisons seuil de pente et de surface drainée, qui correspond à l'équation :

$$\tan S = \sim 0.6 \text{ ha}^{(-0.6)}$$

où S est la pente naturelle à l'endroit de la tête d'entaille,
ha = hectare

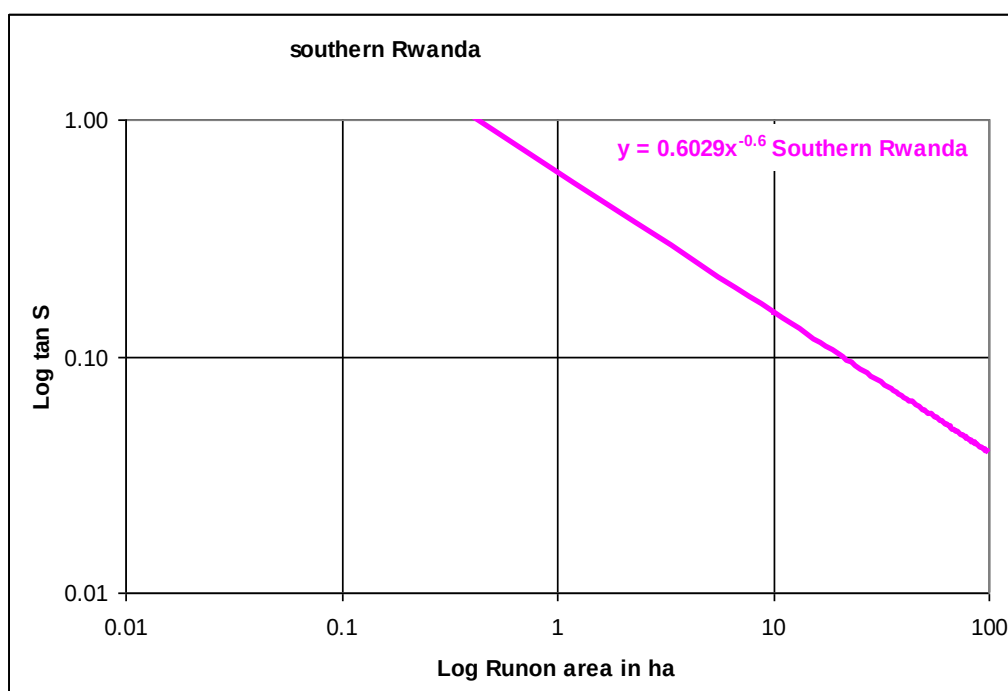


Figure 7.9. Enveloppe de combinaison de seuil topographique au sud du Rwanda (Moeyersons, 2003).

C'est donc cette équation qui est testée à Butembo.

Moeyersons *et al.* (2009) ont montré que dans le cadre des ravinements, cette équation indique que dans la plupart des cas, les interventions humaines dans l'organisation spatiale des eaux de ruissellement sont à la base de la formation des ravins laissant supposer qu'il s'agit de phénomènes « contre nature » dans la région. Cette approche ouvre des perspectives pour la compréhension et le suivi des glissements de terrain dormants qui peuvent se réactiver. Les figures 7.10 et 7.11 représentent schématiquement cette approche.

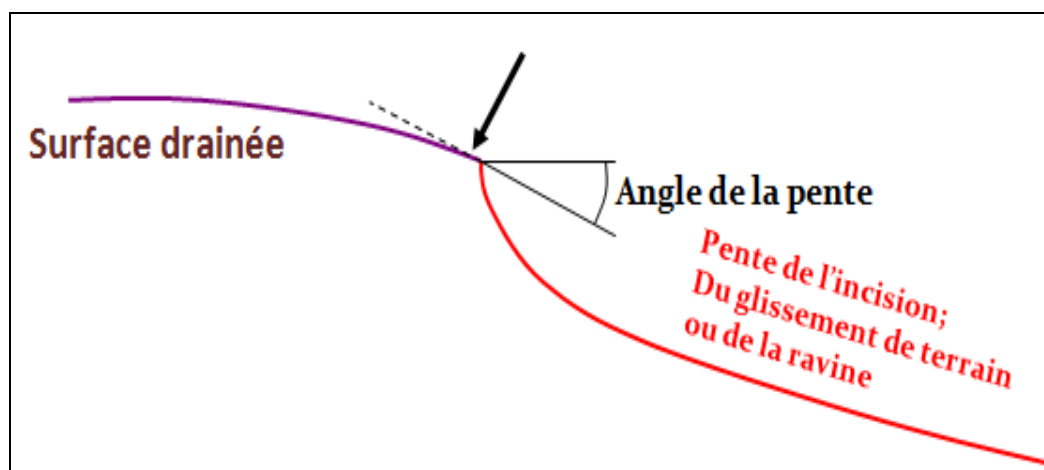


Figure 7.10. Principe de cartographie des glissements de terrain : mesure de surface drainée et de la pente

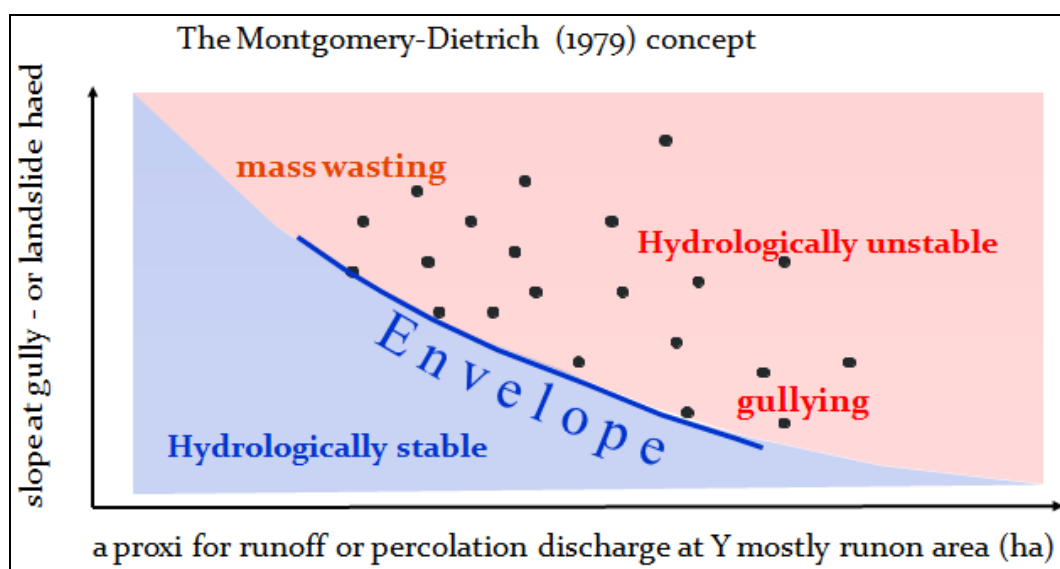


Figure 7.11. Conceptualisation du principe de Montgomery et Dietrich (1994)

Les caractéristiques morphologiques et topographiques importantes des glissements de terrain ont été obtenues en combinant les données de terrain et les données numériques dans un environnement SIG.

7.2.2. Profil longitudinal du glissement de Kavitero

Les prélèvements des coordonnées (x, y et z) ont été effectués au moyen du GPSmap60Csx et d'un mètre ruban. Ce GPS est doté d'une précision de ± 3 m. Les données

altimétriques issues de ce prélèvement ont été corrigées sur base du MNT de SPOT. Les escarpements moins importants ont été prélevés par un mètre ruban. Certaines observations ont été faites dans les environs proches des points ayant fait l'objet des mensurations. Une observation fouillée du site s'est soldée par des entrevues avec les riverains et par des observations plus détaillées des caractéristiques morphologiques et topographiques des environs proches.

Les informations recueillies sur le site étaient essentiellement (1) les signes témoignant d'un récent glissement de terrain grâce à la présence des essences ligneuses inclinées ou présentant des arcures à la base et des dommages (fissures sur la route, les avenues et au niveau des parcelles et des habitations) ; (2) l'existence des sources, des puits et de l'eau d'exfiltration ; et (3) les interventions anthropiques qui pourraient avoir contribué à l'amplification du phénomène, notamment la mauvaise gestion des eaux superficielles et souterraines, la présence des conduites d'eau défectueuses, les surcharges, la dénudation de végétation sur des superficies importantes par les activités champêtres, la suppression du support latéral à la pointe du glissement de terrain, les travaux de génie civil de grande envergure sur la route et l'histoire des grands glissements de terrain *in situ* et dans les autres quartiers de la ville.

La hauteur de la nappe a été mesurée en considérant le niveau de l'eau atteint dans le puits en amont des fissures. Les basculements des blocs ainsi que les ravinements ont été observés vers le pied de la remobilisation. Les mesures ont été effectuées jusqu'au niveau où le pont de Kavitero s'est cassé à la suite des incisions latérales.

7.2.3. Méthode de cartographie des glissements de terrain

Les photographies aériennes de 1957 à l'échelle de 1/40 000 ont été utilisées pour faire une analyse stéréoscopique dont la vue à trois dimensions facilitait la compréhension du phénomène. Le scannage a été fait à 300 dpi au Musée Royal de l'Afrique centrale. Les glissements observés ont été rapportés dans un environnement SIG sur un fond des courbes de niveau générées sur base du MNT. Notons que la bande des photos aériennes disponibles ne couvre que 48% de l'emprise urbaine. Des anaglyphes issus de la stéréophotogrammétrie, des images SPOT et ASTER permettaient d'assurer le contrôle des zones affectées.

Les pentes ont été mesurées à l'entaille du glissement. Les données sont générées automatiquement en pointant le curseur à la limite de l'entaille. Nous avons considéré la valeur la plus élevée. Les surfaces drainées ont été prélevées en dressant un polygone recoupant perpendiculairement les courbes de niveau en amont jusqu'au point culminant. La figure 7.12 est une copie d'écran illustrant le couple stéréoscopique des photos aériennes de la série 5737, en relief, édité dans Leica imagine.

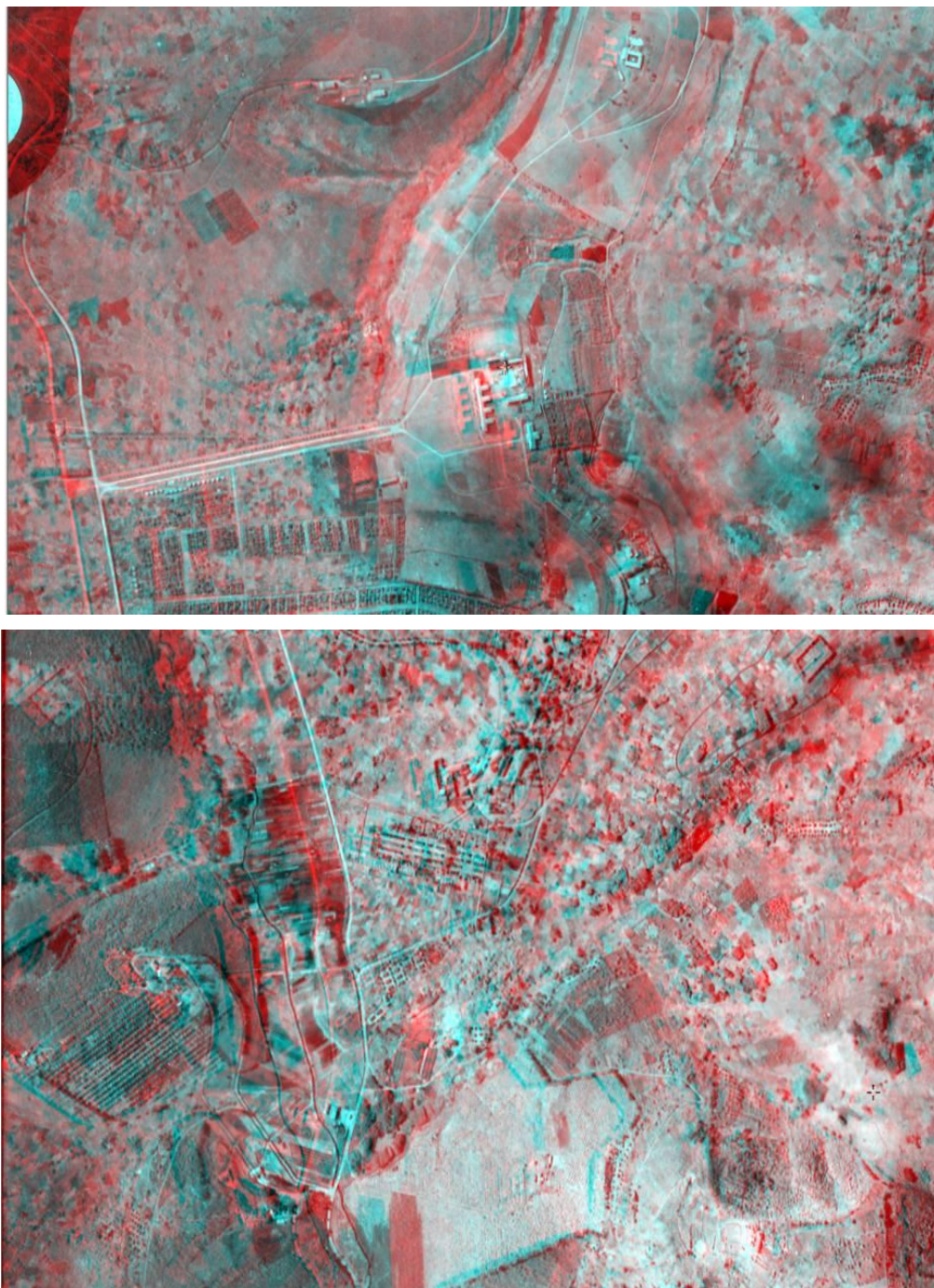


Figure 7.12. Copie d'écran des anaglyphes des photographies aériennes 5737_253 et 5737_254 (sites de l'ITAV, Vutsundo, Abattoir public (1) et Biasa, Kikyo, Kalemire, Lwamiso, Kitatumba (2)).

Pour les lunettes anaglyphes, prendre la couleur cyan pour l'œil droit. Le glissement de Makongobo (nord de Butembo) est visible sur la deuxième image au coin droit vers le bas.

Les cartographies étaient effectuées sur un fond des courbes de niveau comme précédemment à la différence que pour ces derniers, c'est exclusivement la photo-interprétation qui était à la base de la numérisation des limites des glissements de terrain.

Cette numérisation était soumise à plusieurs campagnes de vérifications de présence de glissements de terrain (Fig. 7.13(g) sous la supervision des experts (Fig.7.13(h)). Cette figure illustre la photo aérienne centrée sur les anciens glissements de terrain à Kalemire et à Kikyo (Fig. 7.13(a)) dont la vérification se faisait aussi sur l'estompage du MNT issu de SPOT à l'échelle 1:10.000 (fig. 7.13.(b)) sur lequel nous avons placé de façon comparée les courbes de niveau issues de l'image ASTER (Fig. 7.13(c) et celle issue de la stéréophotogrammétrie (photo aérienne de 1957) (Fig. 7.13 (d).

Au retour à Butembo une vérification de ces sites a révélé des signes des terres ayant subi des modifications témoignant des anciens glissements de terrain qui se seraient produits en ces lieux. Par contre, tous ces sites sont déjà fort anthropisés et les limites ne sont donc pas nettes.

Lors des descentes sur terrain, des témoignages de riverains prouvaient que les glissements de terrain à ces endroits se sont effectués pendant des périodes en dehors des mémoires humaines, surtout qu'aucun document écrit, ni un récit n'a jamais été fait dans la contrée. Même l'étang qui s'est formé à Muchanga depuis très longtemps dans la concession de CAFEKIK n'aurait jamais interpellé les riverains.

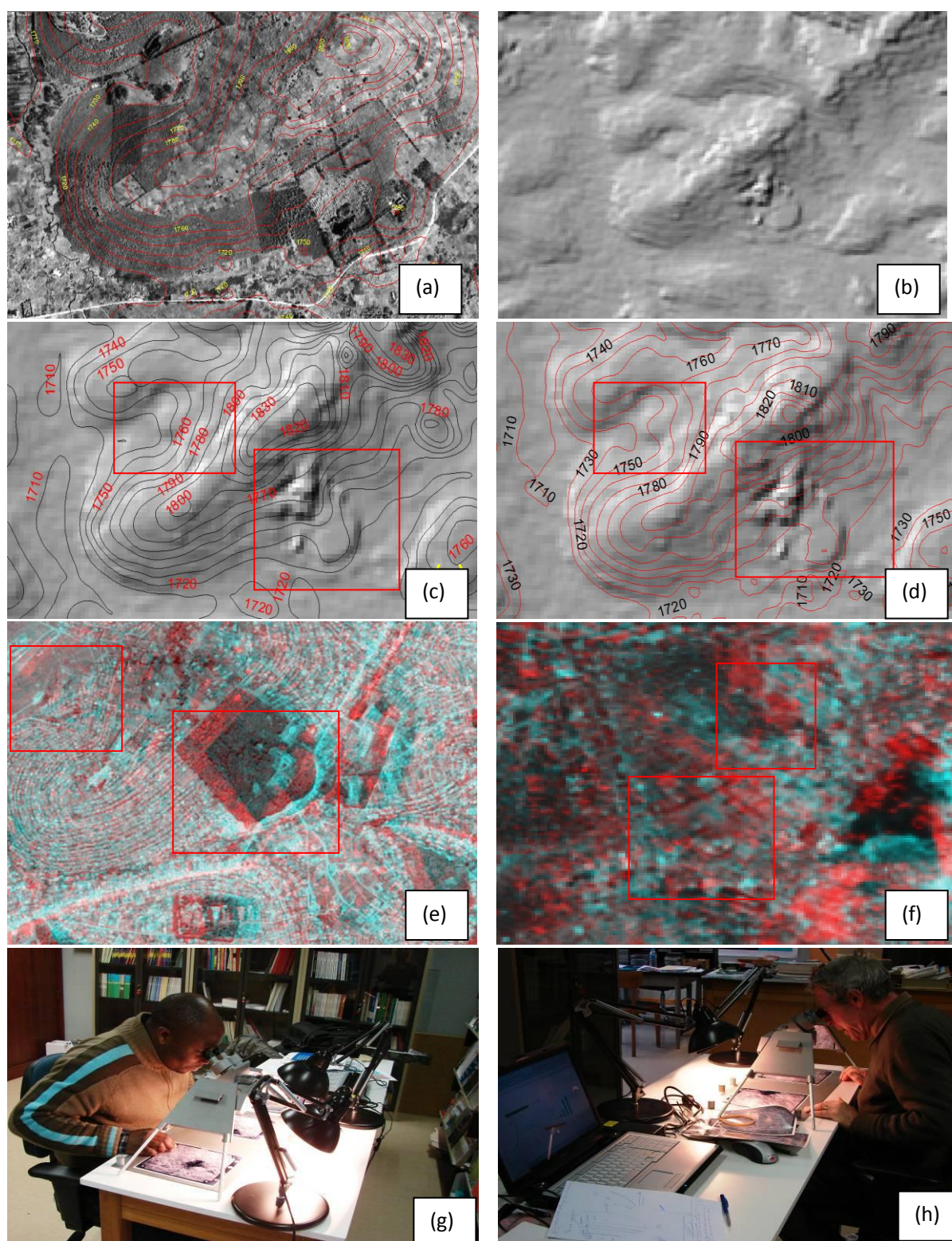


Figure 7.13. Procédure de vérification de présence de glissement de terrain. (a) : Photo aérienne de 1957 centrée sur Kalemire et Kikyo ; (b) : Estompage du MNT ; (c) : Courbes de niveau issues de la stéréophotogrammétrie sur estompage du MNT issu de l'image SPOT de 2006 ; (d) : Courbes de niveau issues de l'image ASTER (2006) sur estompage du MNT issu de SPOT (2006) ; (e) : Anaglyphes issus de SPOT 2008 (utilisez cyan pour l'œil droit) ; (f) : Anaglyphes issus de ASTER 2006 (utilisez cyan pour l'œil gauche) ; (g) : Photo-interprétation : M. Sahani (MRAC, ULg) ; (h) : Vérification et avis d'un expert :

7.2.4. Critère de classification des glissements de terrain affectant la ville de Butembo

Pour les anciens glissements de terrain, ces caractéristiques ont été obtenues exclusivement dans ArcGis. Les glissements de terrain ont été classifiés sur base des critères liés à la terminologie définie par la commission des glissements de terrain (1990) (Fig. 7.14). Les caractéristiques morphologiques comprenaient la longueur totale du glissement de terrain (L , m), la largeur de la surface de rupture (W , m), la superficie totale affectée par le glissement (A , ha) et la hauteur de l'escarpement principal (H_{scarp} , m).

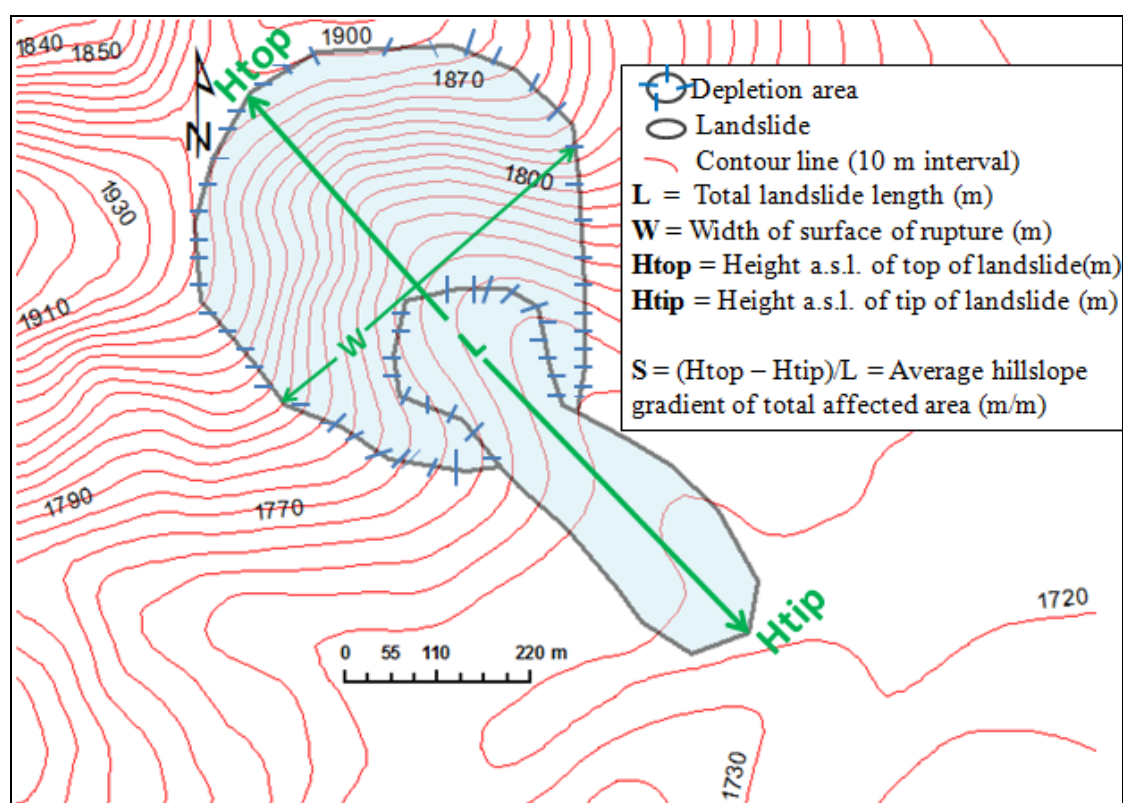


Figure 7.14. Les caractéristiques morphologiques et topographiques des glissements de terrain (exemple du glissement de Makongobo (au nord de Butembo)). La terminologie proposée par la commission IAEG des glissements de terrain (1990) est utilisée.

La longueur totale de glissement de terrain a été mesurée à partir de l'entaille sommitale jusqu'à la terminaison de la loupe comme illustré à la figure 7.14. La largeur de la surface de rupture est définie comme la largeur maximale entre les flancs d'un glissement de terrain, et est mesurée perpendiculairement à la longueur totale du glissement de terrain. La surface de l'ensemble de la zone affectée par le glissement est la somme de la surface de la zone de décrochement et de la surface occupée par la zone d'accumulation.

La dernière caractéristique morphologique est la hauteur de l'escarpement principal. Elle a été mesurée lors de la descente sur terrain à Kavitero. Les autres glissements ayant été fortement perturbés par la conjonction des actions anthropiques et de l'érosion géologique ne nous facilitaient pas la mesure des hauteurs d'escarpements principaux.

Le gradient moyen en rapport avec le versant affecté (S, m/m) a été calculé au moyen de la formule :

$$S = (H_{top} - H_{tip}) / L$$

où **H_{top}** est l'altitude au point le plus culminant du glissement de terrain (m) ; **H_{tip}** est l'altitude au point le plus bas à l'aval du glissement de terrain (m) et **L** la longueur totale du glissement de terrain.

Ces caractéristiques de glissement de terrain ont permis d'estimer le volume de terres déplacées par l'ancien glissement de Kavitero dont la profondeur à la surface de rupture est de 4 m et celle affectée par la réactivation dont la profondeur est estimée entre 3 et 4 m.

Le glissement de terrain de Kavitero ayant une surface de rupture curvilinéaire et vu sa profondeur qui rappelle celle des glissements profonds selon la littérature (>3 m), il peut donc se rapprocher d'un demi-ellipsoïde (Cruden et Varnes, 1996). Dans ce cas, le volume de terre (V, m³) déplacé par ce glissement de terrain peut être calculé par la formule :

$$V = (\pi.D.W.L) / 6$$

Où D est la profondeur de la surface de rupture (m), W est la largeur de la surface de rupture (m) et L la longueur de glissement de terrain.

De même, étant donné que la zone d'accumulation au niveau du glissement de la concession de Cafekit n'a pas été soumise à l'anthropisation et qu'elle a gardé sa convexité, nous avons pu assimiler cette forme à une demi-sphère. Ainsi, l'estimation du volume de terre qui s'est accumulé à ce site a été faite sur base de la formule :

$$V = 2/3(\pi R^3)$$

où R est le rayon de la demi-sphère (la zone d'accumulation, dans ce cas).

7.3. Résultats et discussions

7.3.1. La remobilisation du glissement de Kavitero

7.3.1.1. La position hydrogéologique du glissement

Un profil longitudinal (Fig. 7.15) a été tracé pour se rendre compte des caractéristiques topographiques du site soumis au risque afin de se rendre compte de la position hydrogéologique. La figure 7.15 illustre le profil longitudinal le long de la zone soumise au mouvement des masses à Kavitero.

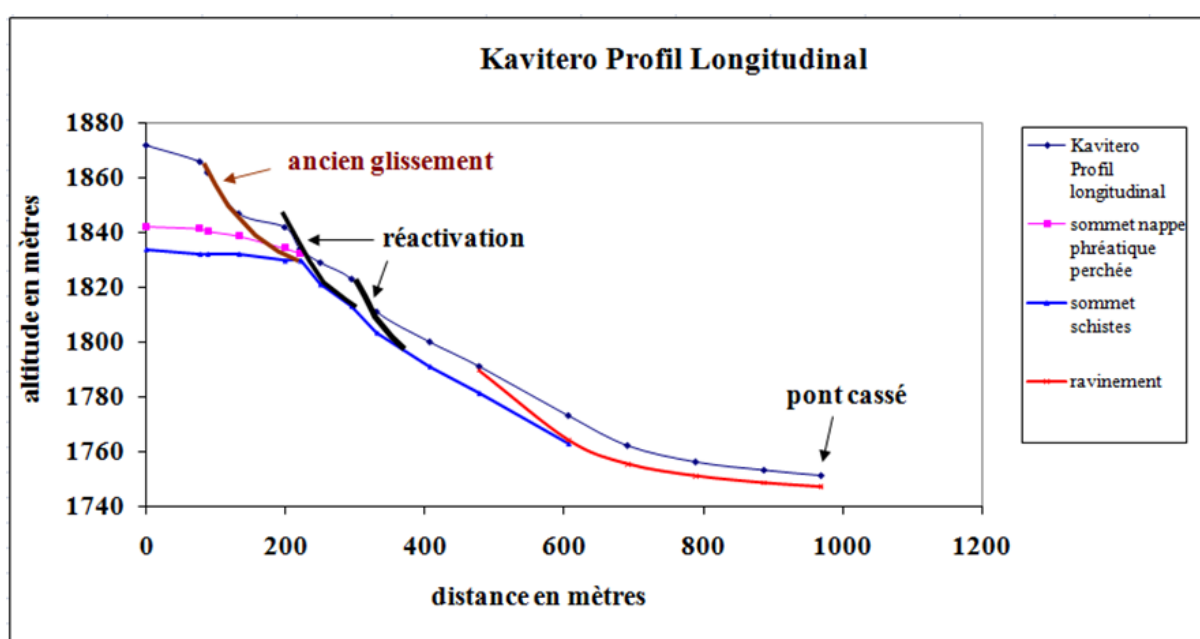


Figure 7.15. Profil longitudinal du site affecté par le glissement de terrain de Kavitero à Butembo. Exagération en hauteur : environ 4 fois

1) La position stratigraphique du glissement

La tête de l'ancien cirque de glissement s'est développée dans une couche de 'terres meubles'. La base du cirque jouxte le sommet d'un banc subhorizontal constitué de roches schisteuses. Il s'agit probablement de l'assise sédimentaire de la Luhule-Mobisio. En aval de cette tête de glissement, la loupe circonscrite dans cet ancien cirque est comprise entre le sommet des schistes et la surface de l'axe de la vallée. Deux plans de rupture qui correspondent au décrochement lors de la remobilisation en juillet 2007 sont indiqués en noir (fig. 7.15). Plus vers l'aval, la ligne rouge indique l'incision de ravin qui se développe sur les

deux bords latéraux de la loupe. A la latitude du pont de Kavitero qui est endommagé; les ravins se rejoignent au point qu'il ne reste plus que des vestiges de la loupe qui s'étendait jadis vers l'aval.

2) Les apports d'eau

On se rend compte que dans le fond de l'ancien cirque il y a une nappe phréatique perchée. Elle est matérialisée par la présence d'un puits que nous avons observé *in situ*. Pendant les observations, le niveau de l'eau dans le puits était à seulement 0,50 m de profondeur. Même pendant la saison sèche, une eau claire stagne à la base des masses des terres qui se sont remobilisées. Sans doute cette nappe suinte dans la loupe de l'ancien glissement. Les pressions hydrostatiques et de suintement ont dû jouer un rôle dans la remobilisation.

Mais outre cet apport d'eau souterraine, nous avons constaté sur le terrain qu'il y a également une source importante d'eaux superficielles, livrées par la route menant vers Manguredjipa et les avenues environnantes. Ces eaux disparaissent actuellement dans les fissures qui bordent latéralement la loupe.

7.3.1.2. Facteurs qui auraient défini le moment et l'endroit de la remobilisation

On peut invoquer trois raisons qui pourraient avoir été à la base de la remobilisation qui s'est effectuée en juillet 2007.

1) On a vu que le mois de février précédent, il s'est produit à Butembo un tremblement de terre de magnitude 4,7. Or, un séisme ne conduit pas toujours à une réponse immédiate. Il peut créer des fissures qui sont en même temps une source d'affaiblissement de la résistance interne du sol et un endroit privilégié pour l'établissement de pressions hydrostatiques lors des pluies subséquentes. L'effet de retard du séisme sur les glissements de terrain est décrit le long du rift albertin à Uvira (Weiss, 1959), Bukavu (Munyololo *et al.*, 1999) et Ruhengeri (Byers, 1992).

Le tableau 7.1 reprend les renseignements sur les tremblements de terres qui se sont produits dans les environs proches et ressentis dans la ville de Butembo.

Tableau 7.1. Mouvement sismique en région de Butembo

N°	Date	Heure (GMT)	Latitude	Longitude	Profondeur [km]	Magnitude	Région
1	11/05/2008	10 :34 :38.60	-	-	-	± 4.3	Butembo, Beni,...
2	12/03/2008	19 :07 :46.5	-	-	-		Butembo
5	19 -02-07	04 :34	-	-	-	4,7	Butembo, Beni, Bunia, Kilembe/Uganda
3	27/04/2006	02 :18	-	-	-	-	Beni et Butembo
4	22/01/2006	14 :18 :28	2.172°S	28.222°E	8	-	-
6	5/09/2005	6 :05 :38	0.286°S	29.643°E	17	-	Lac Edouard
7	3/08/2005	22 :02 :34	0°52.42S	29°14.72E	8	-	-
8	3/09/2005	06 :05 :38	0.172°S	29.386°E	8	≥3	Lac Edouard

La réactivation de Kavitero s'est déclenchée à partir du mois de juillet 2007 avec des manifestations de reptation. On se rend compte que cette réactivation a été précédée par des mouvements sismiques en date du 19 février 2007. Mais il s'agit ici d'un délai de 6 mois qui comprennent la grande moitié de la petite saison des pluies. Etant donné que les délais entre les tremblements et les glissements à Ruhengeri, Uvira et Bukavu étaient toujours de l'ordre de quelques jours pluvieux, nous ne pensons pas que la remobilisation de Kavitero soit un glissement purement sismique.

2) Dans le chapitre sur la caractérisation des événements pluviométriques, il s'est avéré que la saison des pluies de 2007 était la première saison 'normale' après quelques années de sécheresse. Il est fort possible que les pressions hydriques dans la loupe de Kavitero en 2007 étaient supérieures à celles des années précédentes et auraient ainsi peut-être franchi un seuil d'équilibre. En plus, on constate que le mois de juin 2007 a connu une pluviosité assez importante s'élevant à 217,6 mm. Le tableau 7.2 présente les quantités de pluies [mm] tombées de mai à septembre 2007.

Tableau 7.2. Précipitations allant du mois de mai au mois de septembre 2007 à Butembo

Année 2007	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Jour 1	0	0	3,5	0	2,9
2	0	0	8,5	0	2,6
3	0	0	19,2	10,7	6,5
4	0	19,5	0	15,1	8,5
5	0	0	0	6,5	8,5
6	0	0	0	0	7,5
7	1,5	22	0	5	0
8	0	2,6	0	7	0
9	0	18,5	1	35	4
10	0	0,5	0	3,5	5,5
11	0	30,5	0	5	0
12	0	0,2	0	16,2	14
13	0	6,3	6,7	17,2	9,4
14	0	19,7	0	1,8	9
15	10,2	18,2	0	0	0,5
16	15,3	0	0	0,2	2,6
17	6,9	2,4	0	0	0
18	0	0	0	2	6,9
19	0	27,8	0	0	0
20	0	0,7	0	0	17,2
21	0	1,4	0	0	7,5
22	0	35,1	0	0	0
23	26	0	0	0	0
24	5,5	0	18	0	0
25	5,4	0	0	0	1,4
26	8,8	0	2,7	0	5,8
27	0	0,9	0	0	0,4
28	0	0	9,2	1,8	7,7
29	0	4,3	0	9,5	0
30	1,4	7	2,8	35,2	0
31	1,7	0	2,3	13,1	0
Total	82,7	217,6	73,9	185	128,4

Le glissement à Kavitero était précédé d'une période assez importante de creep. Pendant cette phase, les premières fissures dans le sol se sont manifestées au mois de juillet. Le vrai mouvement de glissement s'est produit en septembre 2007. Depuis, ce mouvement de masse n'a fait que s'amplifier.

3) De 2004 à 2006, on a réaménagé la route Butembo-Manguredjipa via Kavitero.

Des travaux de génie civil de grande envergure ont été relancés sur la route menant vers Manguredjipa via Kavitero en 2006. Si l'on pouvait voir à travers la route, des griffes témoignant d'un ruissellement transversal sur toute sa longueur, les travaux de compactage ont réduit sensiblement la capacité d'infiltration. Les fossés créés le long de la route détournent les eaux qui, avant les travaux, traversaient la route et continuaient sur la pente sous la route (cfr. Fig.4.15). Ainsi les eaux de ruissellement coulent dans les fossés le long de la route. Ces aménagements ont transformé le fonctionnement de l'ensemble route-fossés en corniche: la route qui descend obliquement la pente collectionne ainsi les eaux de drainage superficiel d'une très grande superficie et les amène toutes vers la vallée, où la route relâche toutes ces eaux dans les fissures sur la loupe de l'ancien glissement. Ainsi le talweg, base d'une ancienne loupe ayant été remobilisé auparavant, engouffre toute l'eau venant d'une très grande surface drainée en amont vers une vallée encaissée où la section mouillée est sensiblement réduite.

Les routes ont quadruplé la surface drainée vers le point de remobilisation de l'ancienne loupe de Kavitero la faisant passer de 4,18 ha dans les conditions naturelles de drainage à 17,6 ha sous l'influence anthropique. La figure 7.16 illustre l'augmentation de la surface drainée en amont du point de rupture de la réactivation du glissement de Kavitero. L'écoulement et l'alimentation de la loupe du glissement par un grand excès d'eau se sont réalisés en 2007.

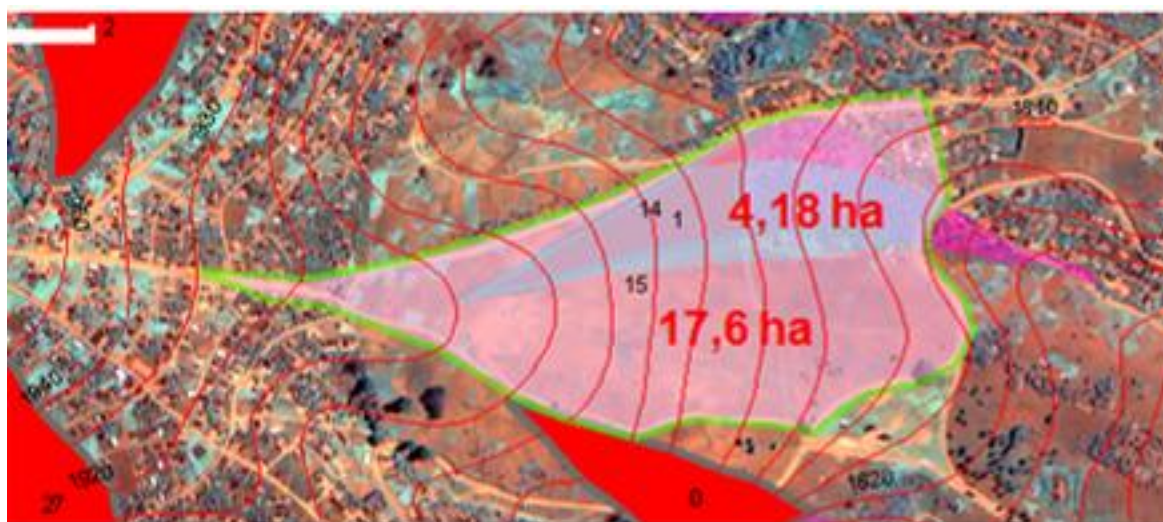


Figure 7.16. Augmentation de la surface drainée par la route vers Manguredjipa.

Mais l'argument le plus important pour imputer la remobilisation de Kavitero aux aménagements de la route s'appréhende sans ambiguïté à l'endroit du détachement. Le plan

de glissement supérieur se trouve en dessous de la route et affleure juste en amont (fig.7.16). Il s'agit ici d'une position classique du plan de glissement au rapport du point d'infiltration forcée comme il a été illustré au Rwanda dans le cas des tranchées (Moeyersons, 2003). Nous soupçonnons alors que la remobilisation de Kavitero serait essentiellement un évènement d'origine 'hydrique'

7.3.1.3. Analyse de la remobilisation de Kavitero par le contrôle topographique

Il y a moyen de représenter la situation de la tête de la remobilisation de Kavitero en termes de pente et de surface drainée avant 2007 et à partir de cette date (Fig. 7.17). La pente dans laquelle la tête s'est entaillée reste la même et est de 9°.

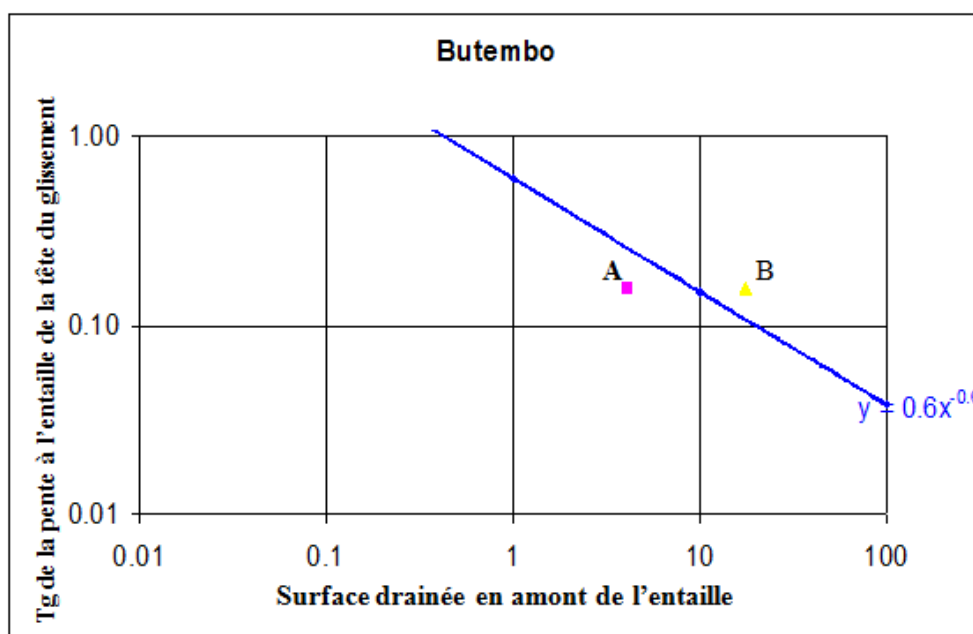


Figure 7.17. Caractérisation du glissement de Kavitero. Les points A et B représentent consécutivement la situation avant et après les travaux sur la route de Manguredjipa. Entre les deux points passe l'enveloppe de contrôle topographique du Sud du Rwanda.

Il est à noter que l'enveloppe de contrôle topographique établie pour le Rwanda tombe entre les points A et B (Fig. 7.17). En théorie, l'enveloppe de Butembo, délimitant la zone de stabilité purement hydrique de celle de l'instabilité, devrait tomber entre les mêmes points A et B. Il apparaît donc que les enveloppes de Butembo et du Sud du Rwanda doivent être proches l'une de l'autre.

7.3.2. Les autres glissements à Butembo.

7.3.2.1. Leurs caractéristiques physiques

Comme il s'agit ici d'une première cartographie de glissements de terrain à Butembo, il convient de décrire quelques-unes de leurs caractéristiques physiques.

7.3.2.1.1. Distribution spatiale des glissements de terrain à Butembo

La figure 7.18 illustre la distribution spatiale des glissements de terrain à Butembo, spécifiquement dans la zone d'étude. Dans l'ensemble 129,1 ha de terre ont été affectés par des anciens glissements de terrain sur une superficie de 7290 ha couvrant la zone d'intérêt, soit 1,77 %. Toutes ces zones sont déjà habitées. Le risque peut s'avérer catastrophique si jamais ces glissements dormants se réactivaient.

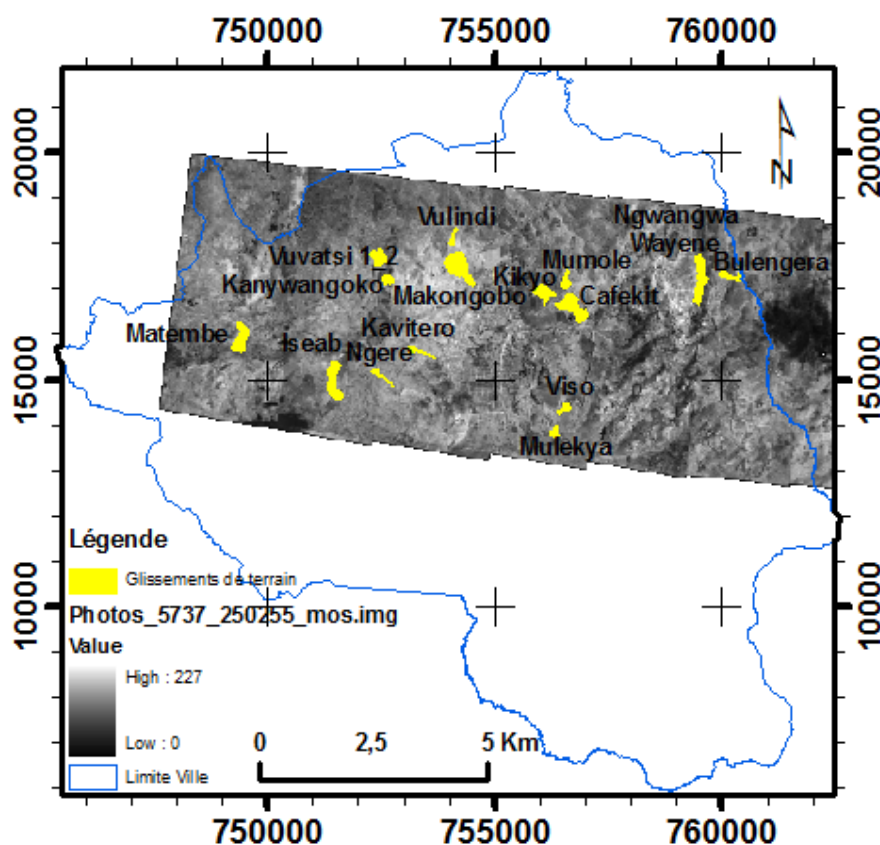


Figure 7.18. Distribution spatiale des glissements de terrain à Butembo pour la zone couverte par les photos aériennes de 1957.

Les caractéristiques de ces glissements de terrain ne présentent pas des raisons communes. Les différences sont liées aux pentes, aux lithologies, à l'hydrologie ainsi qu'à la présence de certaines structures linéaires (linéaments).

7.3.2.1.2. Analyse des caractéristiques morphologiques et topographiques des glissements de terrain à Butembo

Le tableau 7.3 présente les caractéristiques morphologiques et topographiques des glissements de terrain inventoriés dans la zone d'étude au niveau du territoire urbain de Butembo.

Tableau 7.3. Caractéristiques morphologiques et topographiques des glissements de terrain à Butembo

N°	Glissement	Zone de déplétion [ha]	Zone d'accumulation	Surface totale[ha]	L [m]	W [m]	Htop [m]	Htip [m]	D [m]	S gradient de pente	V Volume [m ³]	Surface drainée [ha]	Pente (tg) à l'entaille	Orientation de la pente
1	Makongobo	15,7	7	22,9	868,8	470	1876	1717	-	0,18		3,2	0,4	S, E, SE
2	ISEAB	2,1	12	14,4	802	180	1960	1870	-	0,11		12,1	0,2	S, SE
3	Vuvatsi1	0	4	3,9	212,4	112	1840	1800	-	0,19		8,87	0,2	SE
4	Vuvatsi2	0	4	3,8	184,5	304	1829	1800	-	0,16		0,52	0,1	W
5	Kanywangoko	1,7	1	3	204	222	1830	1802	-	0,14		3,5	0,1	S, W
6	Mumole	1,1	3	4,4	384	173	1819	1769	-	0,13		1,01	0,2	N
7	Viso	0,8	2	3,1	310	150	1733	1710	-	0,07		2,77	0,1	W, SW
8	Mulekya	0,4	3	2,9	252	125	1738	1723	-	0,06		3,29	0,1	N, NE
9	Bulengera	0,6	4	4,5	505	111	1743	1720	-	0,05		4,6	0,1	E
10	Ngwangwawayene	-	17	16,8	216	1087	1748	1725	-	0,11		19,9	0,1	W, SW
11	CAFEKIT	8,7	10	18,7	692	416	1806	1728	-	0,11		3,1	0,2	SE, E
12	Kikyo	5,5	4	9,9	476	266	1780	1724	-	0,12		3,7	0,2	W, SW
13	Vulindi	0,6	2	2,3	403	110	1883	1733	-	0,37		1,04	0,4	NE
14	Matembe	3	9	12,3	659	282	1945	1876	-	0,1		3,9	0,3	N, NE
15	Ngere	0,9	2	2,7	595	114	1916	1846	-	0,12		1,37	0,2	E
16	Kavitero1	1,3	2	3,5	432	104	1866	1810	4	0,13	94097	1,7	0,1	E, NE
	Kavitero2	0,01	0	0,08	211	48	1842	1812	3,5	0,14	18561	4,18	0,1	E, NE

Les glissements de terrain ont affecté dans la zone d'étude au total une superficie de 129,1 ha, une longueur totale 7797,7 m et une largeur totale de 4282 m. Les valeurs moyennes sont respectivement : 2,6 ha pour la zone de décrochement, 5,1 ha pour la zone d'accumulation, 7,59 ha en surface ; 458 m en longueur ; 258 m en largeur ; 0,13 m/m pour gradient de pente.

Makongobo qui a couvert une surface équivalente à 22,9 ha dont 15,7 ha de zone de décrochement et 7,2 ha de zone d'accumulation se révèle le plus important en longueur (868,8 m) et 470 m de large. Le point culminant est situé à la cote 1876 m tandis que le point le plus bas est à 1717 m. Le gradient de pente est de 0,18 m/m et un rapport longueur/largeur de 1,8. Il s'est décroché non loin de la crête de la colline dans une zone aux fortes contraintes avec des pentes fortes variant entre 30° et 61°.

Outre la réactivation, le plus petit glissement de terrain dans l'ensemble se situe à Vulindi. Il s'échelonne sur une surface de 2,3 ha avec un rapport longueur/largeur de 3,66. Le point culminant est situé à 1883 m et le point le plus bas à 1733 m. Son gradient de pente de 0,37 m/m est le plus important de tous. Il se décroche sur une pente à forte contrainte avec des pentes variant entre 30 et 61°.

Mais ces valeurs moyennes ne doivent pas cacher certaines caractéristiques témoignant de l'originalité de chacun des glissements de terrain. On peut en l'occurrence citer les glissements de terrain de Ngwangwawayene qui a un rapport largeur/longueur équivalent à 5, donc plus large que long avec un gradient de pente de 0,11 m/m. Il en est de même pour les glissements de Vuvatsi1 et de Kanywangoko qui ont respectivement un rapport largeur/longueur de 1,64 et 1,08. Tous ces trois glissements sont situés le long des berges de cours d'eau. Cette vallée se trouve sur une faille.

Ces caractéristiques permettent d'estimer les volumes de terres déplacés respectivement pour l'ancien glissement de terrain de Kavitero de 147 309,62 m³ et pour la réactivation 19 084,7 m³. La remobilisation est portée à la hauteur de 12,9% par rapport à l'ancien glissement de terrain. Cependant, il n'est pas aisé d'évaluer les volumes de terres déplacés par les autres glissements de terrain suite à la non-disponibilité des informations liées d'une part, à l'érosion qui a estompé les caractéristiques spécifiques à ceux-ci, et d'autre part, suite aux actions liées à l'anthropisation de la contrée.

Toutefois, le glissement qui s'est produit dans la concession de Cafekit, la zone d'accumulation ayant gardé sa convexité du fait de la non-anthropisation depuis les années qui précèdent l'an 1957. Son rayon étant de 130 m, son volume est donc estimé à 4 601 396,8 m³. La masse de terre a créé une colline en aval. Entre cette zone d'accumulation et la zone de décrochement s'est formée un étang qui a été valorisé depuis de longues années par l'entreprise propriétaire de la concession. Cette colline dispose d'une habitation au sommet, mais l'étang a été assaini pour des raisons environnementales.

Les figures 7.19 et 7.20 présentent la répartition des glissements de terrain en fonction du relief et de la pente.

En analysant la carte d'inventaire de ces glissements de terrain, on peut déjà voir qu'ils ne sont pas répartis aléatoirement dans la zone d'étude. Ces glissements sont situés sur des fortes pentes, pour la plupart, et sont décrochés à partir des crêtes de collines du précambrien, excepté celui de Kavitero. Glade et Crozier (2005) ont montré qu'indépendamment du mécanisme de déclenchement, les glissements de terrain se produisent sur la plupart des pentes dont la susceptibilité inhérente est la plus importante.

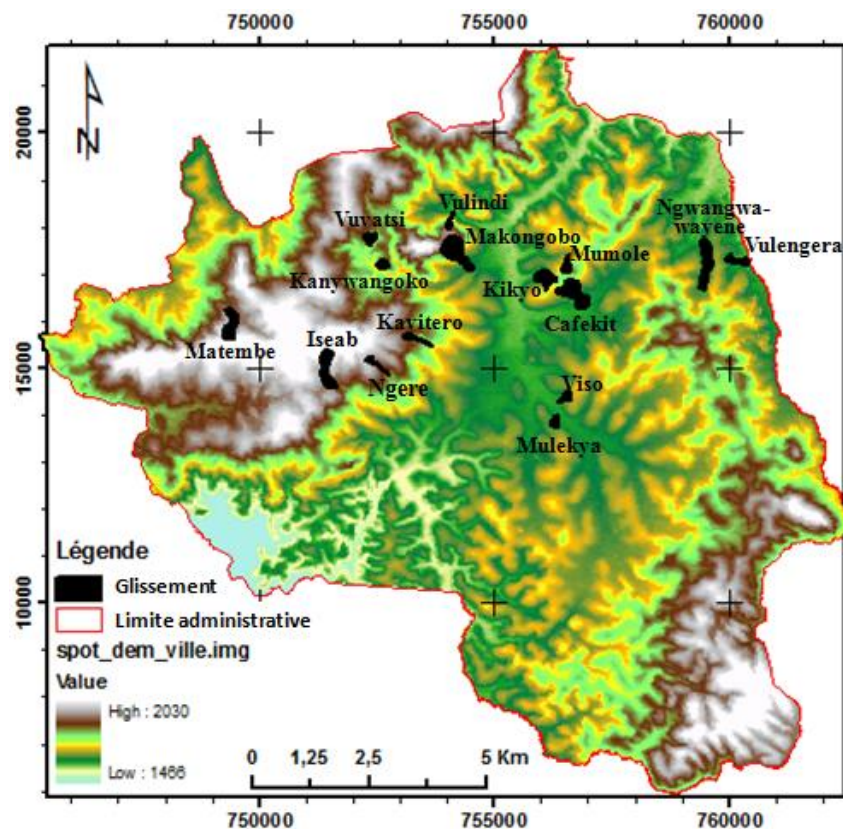


Figure 7.19. Distribution spatiale des glissements de terrain en relation avec le relief

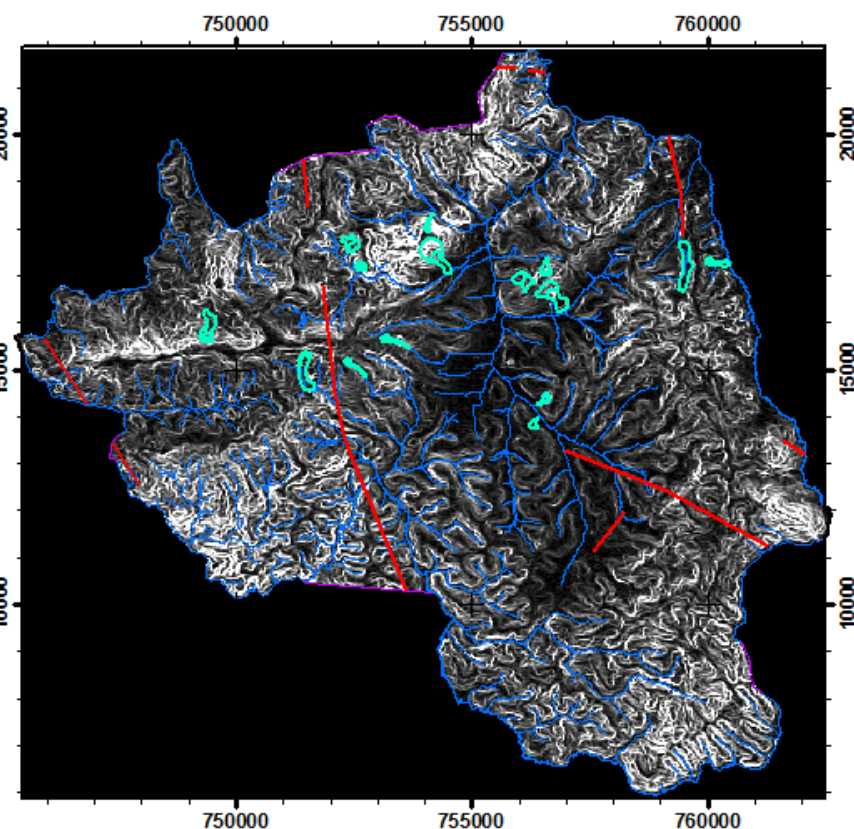


Figure 7.20. Distribution spatiale des glissements de terrain en relation avec la pente, les failles établies et les cours d'eau

Légende

- Glissements de terrain
- Faillies
- Cours d'eau
- Limite Administrative

spot_dem_utm_pentededeg_ville.img

Value

High : 61

Low : 1

7.3.2.1.3. Distribution spatiale versus Hydrologie (cours d'eau et sources)

Certains glissements de terrain se produisent à la suite des incisions verticales au niveau des cours d'eau.

La figure 7.21 présente la distribution spatiale des glissements de terrain à Butembo en rapport avec l'hydrologie (cours d'eau et sources).

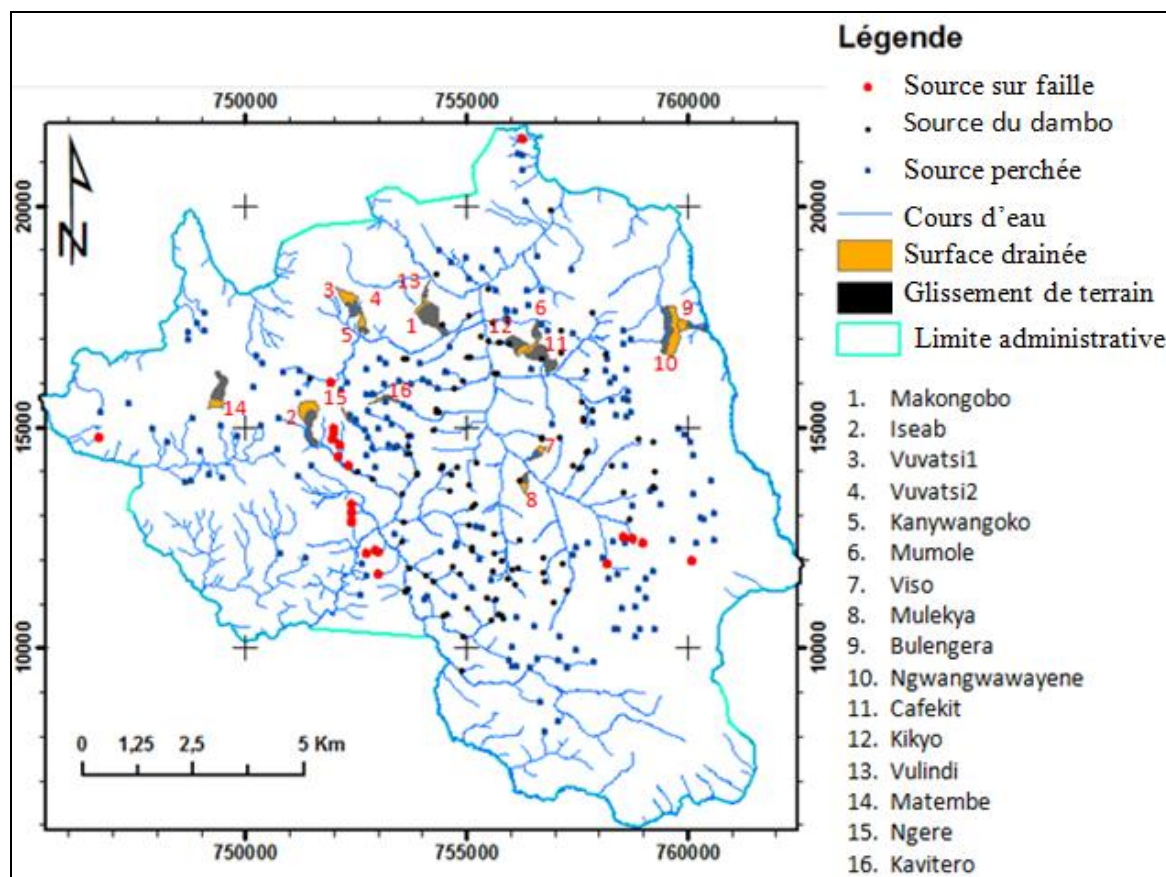


Figure 7.21. Distribution spatiale des glissements de terrain en rapport avec l'hydrologie

Le réseau hydrographique de Butembo est très dense. La plupart des glissements de terrain se sont produits soit directement au niveau des sites qui disposent d'une source dans des cirques, soit le long des berges des cours d'eau. La présence des sources reste une indication plausible d'une influence de la pression hydrostatique pour la plupart d'entre eux qui présentent, en outre, une surface drainée considérable.

Vuvatsi1 et Vuvatsi2 et Kanywangoko étant situés le long des berges, l'écoulement torrentiel sur des pentes aurait mordu sur les berges provoquant un affaissement de part et

d'autre des berges des cours d'eau. Il en est de même pour Ngwangwayene dont le ruisseau à la base aurait joué le même rôle. Mais l'ampleur de ce glissement laisse croire que la pression hydrostatique ne semble pas avoir agi seul pour déstabiliser une telle quantité de terre. Ce glissement coïncide avec une faille reconnue aussi sur l'ancienne carte géologique. L'appellation « ngwangwa » en langue locale, traduit les phénomènes relatifs aux glissements des terres. Ces zones sont confrontées à des phénomènes de glissement de terrain et sont restées peu anthropisées, les événements étant très récurrents.

Les glissements Iseab ; Kavitero ; Mulekya et Viso sont localisés directement là où se trouvent des sources et/ou des puits. Il en est de même pour les glissements Makongobo, Cafekit et Kikyo dont les sources sont soit au milieu du glissement, soit un peu en aval.

Par endroit, les facteurs d'instabilité récurrente des pentes le long des berges concourent à l'entretien de la verticalité des parois par plusieurs sapements s'effectuant à la base par les eaux courantes. Cette tendance à la verticalité reste éphémère suite à l'érodibilité des bords supérieurs des berges liée à la conjonction de la vitesse d'écoulement des eaux superficielles et celles qui s'écoulent à partir de l'horizon supérieur de la tourbe au sein du dambo. Wastiaux, (2008) dans une étude sur les tourbières a montré que les échanges d'eau ont essentiellement lieu dans la partie supérieure (acrotelme), composée de tourbe peu humifiée, au sein de laquelle une très mince couche superficielle participe effectivement à l'écoulement. Cet auteur trouve que dans ces milieux toujours proches de la saturation, une part importante des précipitations est vite évacuée sous forme d'écoulement rapide de crue. Wastiaux, (2000) estime que l'hydrologie au sein d'un bassin versant tourbeux intact ou dégradé, notamment à la suite d'un drainage, garde ses spécificités qui le distinguent d'autres bassins sans couvertures organiques.

7.3.2.2. Quelques réflexions sur l'origine de ces glissements sur base du contrôle topographique.

7.3.2.2.1 Etablissement de l'enveloppe de contrôle topographique selon la méthode de Montgomery-Dietrich (1994).

La procédure est basée sur l'approche développée par Montgomery et Dietrich (1994). Tous les glissements répertoriés sont rapportés sur un graphique avec en X (échelle

logarithmique) la surface drainée en hectares et en Y (échelle logarithmique) la tangente de la pente naturelle à l'endroit de l'entaille de la tête du glissement. Le nuage des glissements inventoriés sur les photos aériennes est représenté sur la figure 7.22. En guise d'essai la ligne qui devrait correspondre à l'enveloppe qui sépare les combinaisons topographiques de sécurité hydrique à sa gauche et les combinaisons de risque sur glissement par pressions hydriques ont été tracé manuellement.

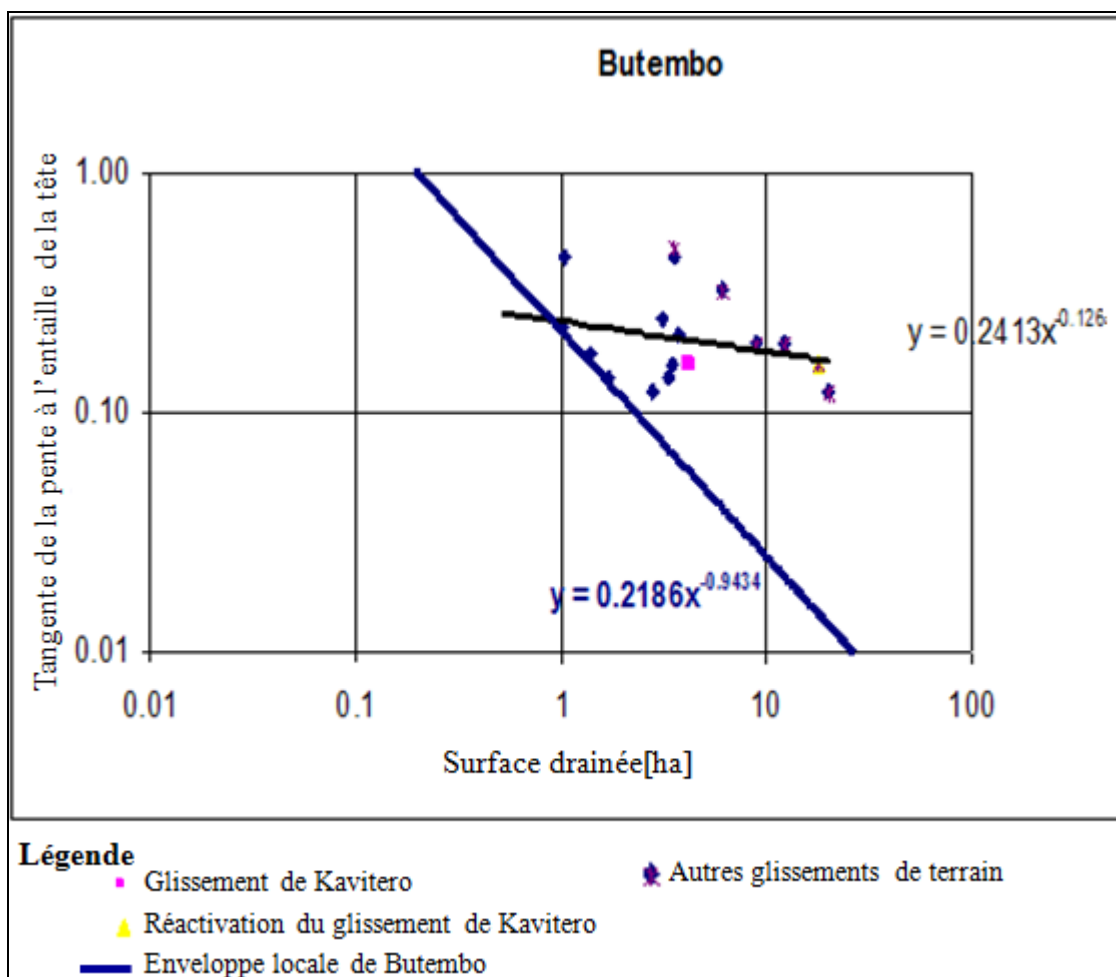


Figure 7.22. Enveloppe locale de Butembo sur base du principe de Montgomery Dietrich (1994).

$$Scr = 0.21ha^{-0.94}$$

où Scr est la tangente de la pente à l'endroit de la tête du glissement ;
Ha est la surface drainée en hectares.

Il se pose un problème. La ligne de régression à travers le nuage est quasiment à l'horizontale. Etant donné que sa déviation (R^2) est très basse, ce n'est pas possible de se prononcer sur une relation éventuelle entre la superficie de la surface drainée et l'angle à l'endroit de la tête de l'entaille.

En l'absence de cette relation (Montgomery et Dietrich, 1994), on est obligé de conclure que les glissements représentés par le nuage de points ou au moins une partie, auraient une origine qui reste inexpliquée par la seule idée de pressions hydriques. Plus haut, on a vu que le séisme peut avoir comme effet de minimiser la pente critique si bien que la surface drainée diminue par rapport aux glissements purement hydriques. Ceci conduirait donc au déplacement des glissements qui sont influencés par les séismes vers la gauche sur le graphique de la figure 7.23, et éventuellement dans le secteur à gauche de l'enveloppe de seuils topographiques pour les cas d'origine purement hydrique.

7.3.2.2.2. Analyse de la réactivation de Kavitero.

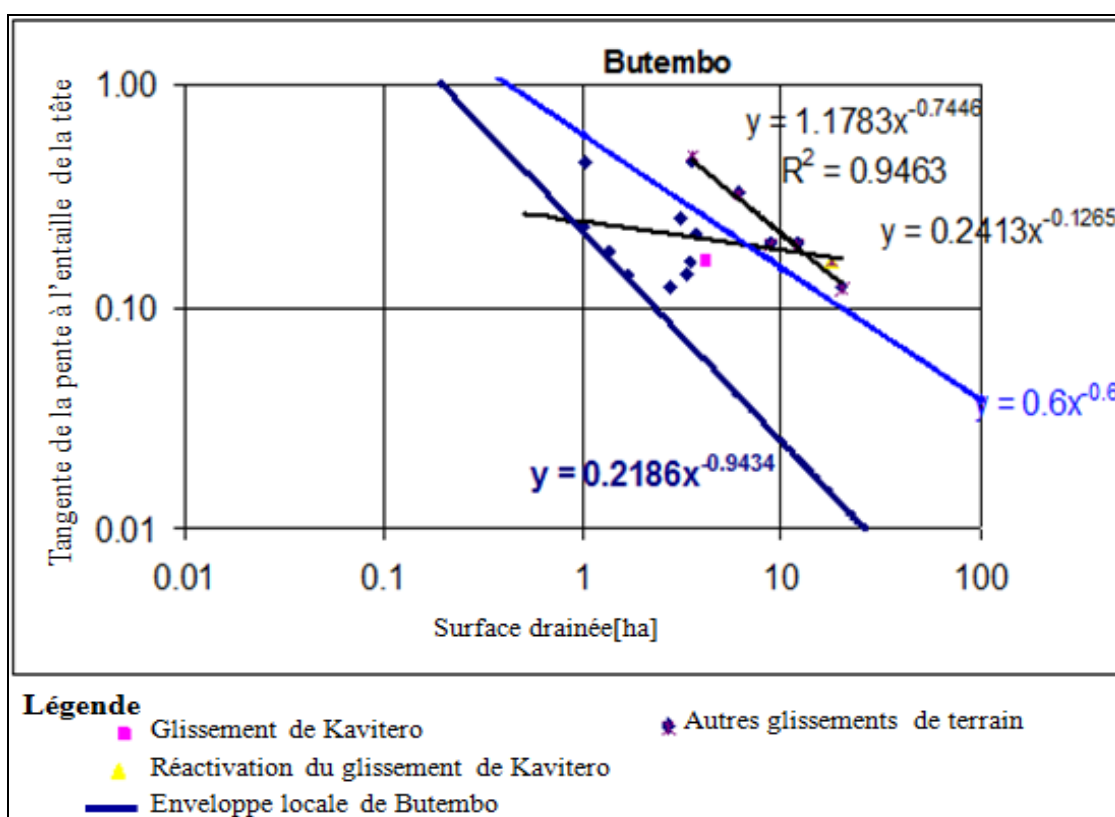


Figure 7.23. Caractéristiques des glissements de terrain de Butembo en fonction de l'enveloppe comparée à celle du sud du Rwanda.

Cette analyse nous apprend que l'enveloppe locale de contrôle topographique de Butembo ne correspond pas à l'équation :

$$SCR = 0.21 \text{ ha}^{-0.94}$$

mais plutôt à l'équation qui décrit une approximation de l'enveloppe du Sud du Rwanda.

En guise d'exercice, nous avons rapporté l'enveloppe du Sud du Rwanda sur la figure 7.22. Selon cette enveloppe, seulement 5 glissements de terrain tombent à droite de cette enveloppe et ne seraient pas visiblement influencés par les séismes. En plus, une droite de régression montre que pour ces 5 glissements il existe une relation nette entre la tangente de la pente à l'endroit de la tête d'incision et la surface drainée vers cette tête.

On peut donc conclure que la grande majorité des glissements à Butembo, soit 11 sur 16, sont influencés par la tectonique active dans cette région.

7.4. Conclusions partielles

C'est grâce aux analyses du contrôle topographique des glissements de terrain à Butembo qu'on est arrivé à un nombre de conclusions qui mettent à jour l'importance du séisme mais aussi le rôle de l'homme dans la mise en marche des glissements de terrain à Butembo.

7.4.1. La réactivation du glissement de Kavitero.

Des arguments décisifs, inspirés de l'observation au niveau de la tête du glissement et de l'application du modèle de contrôle topographique par Montgomery et Dietrich (1994) et Moeyersons (2003) ont été avancés pour interpréter ce glissement comme le résultat d'une intervention de l'homme sur le drainage superficiel. En effet, la réactivation s'est faite en réponse de l'augmentation de la superficie drainée vers la tête de l'incision. Cette superficie est passée de 4,18 ha dans les conditions naturelles à 17,6 ha suite à l'intervention de l'homme. En termes de prévention ou de remédiation, cet exemple montre que c'est dangereux de conduire des grandes quantités d'eau vers les anciens glissements de terrain.

7.4.2. Les autres glissements de terrain

Quoiqu'on soit persuadé qu'un bon nombre d'autres glissements de terrain sont encore actifs et se trouvent dans la phase de creep après glissement (Singh et Mitchel, (1968), il est clair que beaucoup de glissements datent d'avant l'urbanisation de la ville, quand le paysage était encore sous forêt. On peut s'imaginer que les nappes aquifères étaient mieux nourries et les pressions hydriques moyennes étaient plus grandes. Mais les glissements ne montrent pas de relation statistique entre la superficie en ha, drainée vers la tête de l'entaille et la tangente de la pente du terrain à la tête de l'entaille. Il est donc clair que 11 des 16 glissements

répertoriés sont partiellement influencés par le séisme dans leur mouvement. Aussi les autres le sont peut-être, mais du fait qu'ils restent encore à droite de l'enveloppe de contrôle purement topographique, on n'a pas une bonne indication.

La méthode de contrôle topographique semble être une méthode permettant de distinguer au moins une partie des glissements co-engendrés par les séismes. Dans une région de *rift*, cette distinction est nécessaire avant d'entreprendre des essais de prévention ou de remédiation.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales et perspectives

1. Une carte topographique et géoréférencée à l'échelle de 1/25.000.

Le fond de la carte est une mosaïque des images SPOT 2006 et 2008. Les courbes de niveau ont une équidistance de 20 m.

La cartographie faite dans un environnement SIG permet d'établir la nouvelle carte de la ville de Butembo. La superficie topographique de la ville de Butembo calculée automatiquement sur base des données issues du terrain est de 158,95 km². Elle est différente de celle qui se retrouve dans les rapports de la mairie de Butembo. Cette superficie était établie à 190,34 km². La différence pourrait s'expliquer par les outils de gestion qui ne peuvent pas suivre une entité dynamique exceptionnellement anthropisée. La carte topographique fait le fond de la carte des risques hydrologiques de Butembo en ANNEXE III

2. La perturbation de la croissance spontanée de la zone urbaine de Butembo de 1957-2008

La zone urbanisée est passée de 2,39 km² en 1957 à 85,83 km² en 2008, soit un taux d'accroissement moyen annuel de l'emprise urbaine de l'ordre de 7,27%. En revanche, entre 2005 et 2006, en une année, le taux d'accroissement annuel moyen de l'emprise urbaine a atteint sa valeur maximale équivalente à 18,98%, mais s'est rétabli ensuite entre 2006 et 2008 pour atteindre 3,46%. La période de croissance urbaine 2005-2006 suit avec un retard, le temps nécessaire de construction. La diminution très sensible du prix des matériaux de construction entre 2002 et 2004 qui a poussé un effectif important de la population d'investir dans des constructions de maisons, a abouti à un accroissement exceptionnel de l'emprise urbaine dans la contrée.

Le taux d'accroissement exceptionnel de 18,98 % est dû à la construction de nombreux nouveaux quartiers après un afflux massif des déplacés de guerre vers la seconde moitié des années nonante. En effet, la population de Butembo est passée de 9653 habitants en 1957 à 581 449 habitants en 2008, soit un taux d'accroissement annuel moyen de 8,37%. Le taux de variation est spectaculaire entre 1987 et 2001. Il s'élève à 11,47%. Cette explosion démographique s'explique partiellement par l'afflux des populations lié au boom de l'essor économique de la ville au début des années nonante, mais prend une ampleur exponentielle à

partir de la seconde moitié des années nonante à la suite de l'insécurité. Entre 2005 et 2006, ce taux d'accroissement moyen de la population est redevenu de 2,22% alors qu'il s'est élevé à 3,84% entre 2006 et 2008.

Le déséquilibre temporaire entre population et surface urbanisée à la suite de l'afflux massif des déplacés de guerres est présenté par la figure 1.12 que nous reprenons ici :

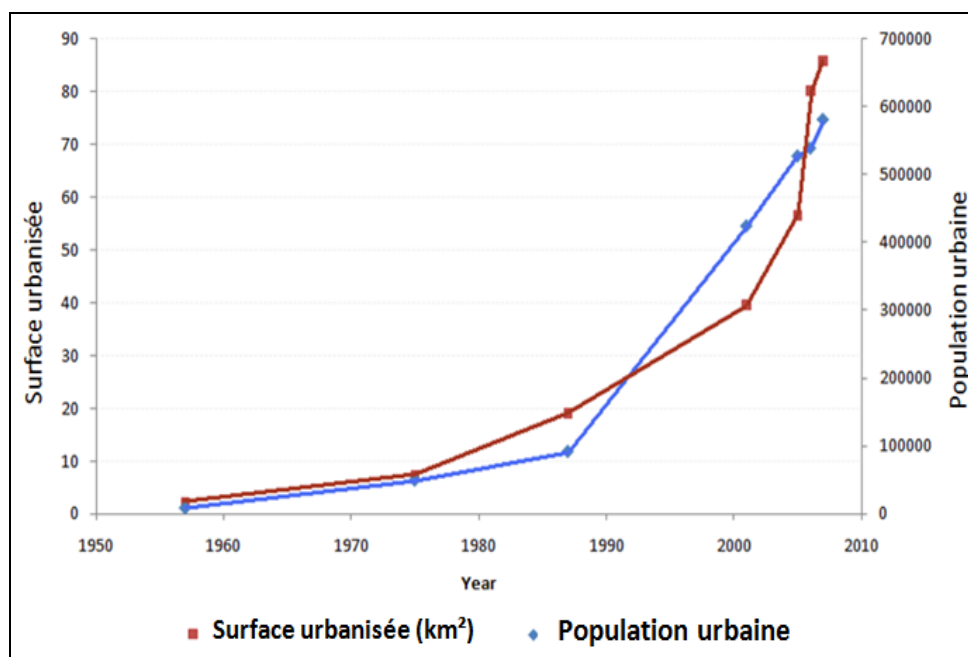


Figure 1.12. Relation entre l'évolution de la population et l'emprise urbaine de la ville de Butembo.

La croissance de la population est plus rapide que celle de l'espace urbanisée de 1994 à 2004. La proportion population–surface urbanisée se normalise actuellement. Il faut noter cependant que depuis 2004 la composante dictée par la pression démographique consécutive aux déplacés des guerres s'est grandement dissoute et que la croissance devient de nouveau commandée par l'essor économique de la ville.

3. Une perception des risques hydrologiques liés au changement d'affectation des sols dans le cas d'urbanisation

Les risques hydrologiques se produisant en ville de Butembo sont :

- le ruissellement torrentiel qui mène au ravinement progressif ;
- le ravinement et les incisions linéaires fluviales dans les fonds de vallée ;
- les inondations dans les dambos.

Ces risques se produisent avec une récurrence et une intensité ou ampleur croissantes depuis 1957, ce qui indique une augmentation des débits de pic du ruissellement depuis cette année.

3.1 Cause de l'augmentation des débits de pic du ruissellement

- La caractérisation des événements pluviométriques prouve qu'on ne peut pas attribuer cette amplification des phénomènes environnementaux aux éventuels changements climatiques comme laisseraient croire les perceptions des populations urbaines de Butembo. En effet, l'analyse des périodes 1957-2010, 1957-1983 et 1984-2010 a clairement indiqué que la longueur de la saison de pluie a fortement subi une tendance à la baisse de l'ordre de 25 % essentiellement en petite saison pluvieuse pour la plus récente période. Elle se démarque distinctement des autres périodes même dans l'amplitude qui a subi un rétrécissement de l'ordre de 16,3 % témoignant ainsi du degré de vulnérabilité de plus à plus croissant. Sept de neuf indices pluviométriques étudiés (soit 77,8%) présentent des tendances à la baisse et seulement deux d'entre eux (SDII et $P \geq 10$ mm) offrent une tendance à la hausse sans que ces tendances soient statistiquement significatives. La quasi-totalité des événements pluvieux de ces dernières années ne présentent pas de caractères exceptionnels. Ils ont tous une récurrence de moins de 6 ans et sont donc 'normaux' dans les conditions écoclimatiques de la ville de Butembo.

Par contre, les analyses des images satellitaires faites sur base de la classification par maximum de vraisemblance et par le NDVI montrent que l'urbanisation conduit à la création de surfaces durcies, peu perméables, et donc que l'urbanisation d'un espace agro-sylvicole mène nécessairement à une augmentation sensible du coefficient d'écoulement avec des débits de pic du ruissellement suivant le développement de la tache urbanisée.

L'analyse diachronique de l'extension de la zone urbanisée et de la zone d'occurrence des trois risques hydrologiques révèle que ces risques restent dans le temps et dans l'espace à l'intérieur de la zone urbanisée. Ainsi le ravinement de fond de vallée en 1957 est resté confiné dans le rayon de l'ancien noyau urbain de Butembo. Les réseaux de ravins de fond de vallée pour 2005 et 2008 sont également restés confinés dans les extensions urbaines respectives. Les dambos qui subsistent jusqu'aujourd'hui en dehors de la zone urbanisée ne montrent qu'une incision verticale négligeable, comparée à ce qui se passe dans le bassin de

la Kimemi. Il s'avère clairement que l'urbanisation précède le développement de ravines dans le temps et dans l'espace et que de toute évidence les incisions des ravins sont limitées à des endroits où on peut s'attendre à l'augmentation du coefficient de ruissellement en raison de l'urbanisation.

3.2. Une réorganisation du ruissellement et une augmentation de la connectivité hydrologique à la suite de l'urbanisation

L'urbanisation ne mène pas uniquement à une augmentation du coefficient d'écoulement. Les analyses sur terrain et sur la carte montrent que les routes forment des allées privilégiées des eaux de ruissellement collinaire. Ceci ressort de deux effets :

- D'abord par leur position topographique par rapport au versant, les routes et les égouts de côté collectionnent le ruissellement de grandes surfaces et relâchent ainsi des débits de ruissellement considérables sur des points où il n'y avait pas de concentration du ruissellement naturel et où il n'y avait pas de problème avant. C'est à partir de ces points de relâchement que le ravinement progressif se développe. La carte en ANNEX III indique les routes qui selon ces critères qualitatifs peuvent poser un problème de ravinement collinaire.
- Ensuite, la conjonction des effets des routes et fossés réalise un transfert plus rapide d'eau du sommet de colline au fond de vallée. Cette augmentation de la connectivité hydrologique, combinée avec une augmentation du coefficient d'écoulement résulte des apports de ruissellement croissants qui dépassent plus en plus la capacité d'évacuation des eaux de la vallée de la Kimemi.

La carte des risques hydrologiques de Butembo (ANNEXE III) donne l'extension des inondations de 2009 et indique également les prévisions pour l'avenir pour autant que l'évolution actuelle se poursuive et en cas d'inaction.

4. L'effet de l'urbanisation sur les réserves d'eau souterraines

- Les effets de l'urbanisation sur la réserve d'eau souterraine sont illustrés sur la figure 8.1. L'urbanisation agit de plusieurs manières sur les nappes :

1. D'abord l'urbanisation affecte négativement l'infiltration dans les collines. Ainsi, l'infiltration des eaux de précipitation dans le sol est réduite et la nappe d'eau locale devient

moins alimentée en eau. Puisque cette nappe nourrit la nappe dans la vallée, cette dernière sera affectée à son tour.

2. Le ravinement progressif provoqué par les routes peut atteindre la nappe locale et la drainer.

3. Les incisions linéaires dans les fonds de vallée des chenaux centraux et de leurs affluents vont contribuer au drainage et au rabattement de la nappe phréatique dans les dambos. La disponibilité en eau va être fortement influencée par cette conjonction des phénomènes environnementaux.

La figure 8.1 illustre les effets de l'urbanisation sur les risques hydrologiques a) avant la perturbation des écosystèmes ; b) après l'urbanisation imperméabilisant les surfaces et accentuant le ruissellement.

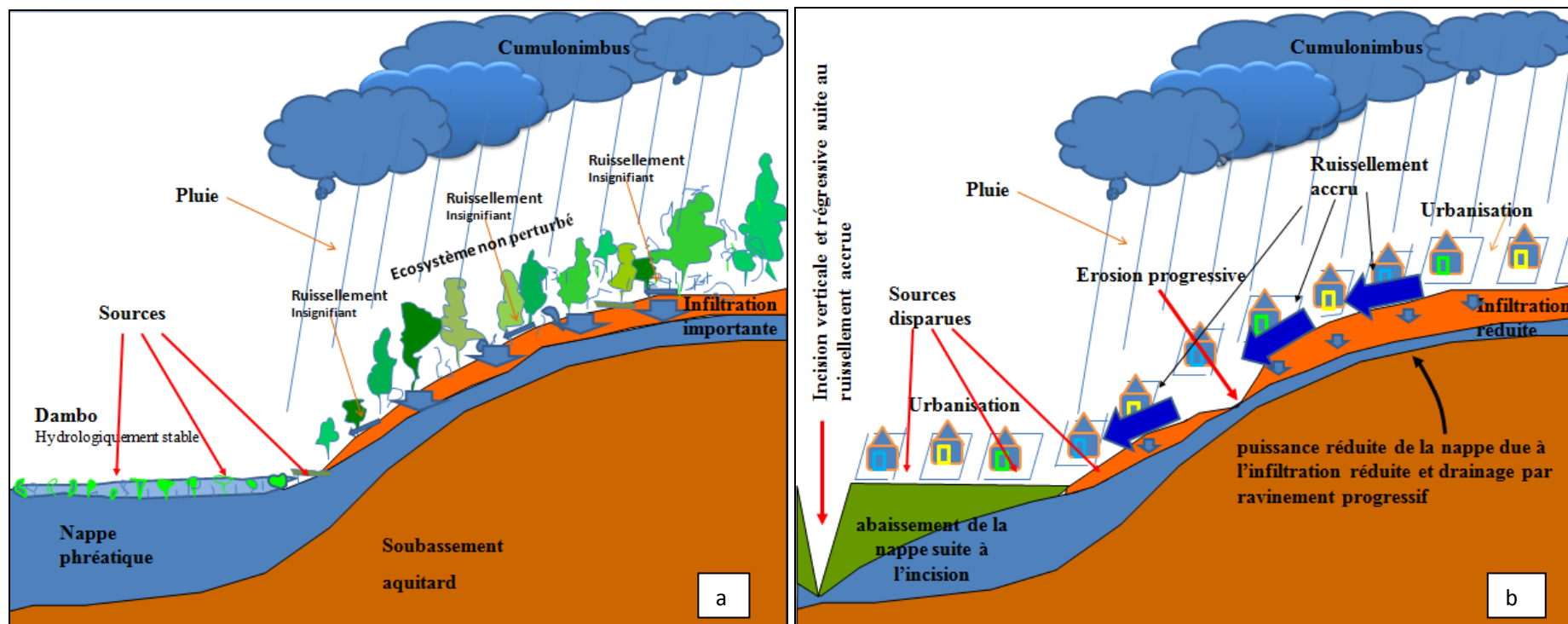


Figure 8.1. Effets de l'urbanisation sur les risques hydrologiques a) avant la perturbation des écosystèmes ; b) après l'urbanisation imperméabilisant les surfaces et accentuant le ruissellement.

5. Les mouvements de masse

La remobilisation d'un lobe d'un glissement ancien à Kavitero est due au fait que l'aménagement d'une route a conduit à un agrandissement de la zone drainée vers la tête de la remobilisation. Cette surface a été quadruplée en passant de 4 à 17 ha. Il s'agit donc d'un cas de risque hydrologique artificiel, du fait que l'homme a changé un paramètre topographique.

Une analyse des facteurs topographiques, pente naturelle à l'endroit de la tête d'entaille et surface drainée vers cette même tête (Montgomery Dietrich, 1994 ; Moeyersons, 2004), montre que 11 des 16 glissements dormants dans la ville de Butembo au moins ne sont pas des événements purement hydriques – par pressions hydriques dans le sol – mais que les tremblements de terre ont contribué à leur déclenchement. Cette analyse cerne la nature des phénomènes en cause dans un contexte d'une région qui jouxte le *rift albertin* où les mouvements sismiques sont restés actifs (Joly, 1997).

6. Mesures à conseiller

Mettre fin à ce travail sans envisager les stratégies de remédiation ou de prévention ainsi que d'autres mesures qui concourent à l'atténuation de ces phénomènes environnementaux qui perturbent la structure urbaine ne serait pas convenable. Ces mesures doivent être prises. Elles peuvent être déduites du schéma qui résume l'enchaînement des risques hydrologiques qui se présentent en ville de Butembo. (Fig. 8.2). L'étude montre que le coefficient d'écoulement se trouve au début du système. On sait que la surface agro-sylvicole a connu une diminution considérable au fil du temps, ce qui a forcément induit une augmentation du coefficient d'écoulement. Or, l'urbanisation est également intervenue dans l'organisation du ruissellement superficiel par la structure de la ville, notamment par la conjonction des effets produits par le réseau des routes et tranchées ainsi que par les caniveaux. Elle y intervient de deux manières :

1. elle concentre des eaux de ruissellement et provoque ainsi, aux points de relâchement des eaux, des problèmes de ravinement progressif.
2. elle réalise un transfert accéléré du ruissellement vers les fonds de vallée.

Le schéma de la Figure 8.2 montre deux endroits où on peut intervenir et modifier les effets de l'urbanisation.

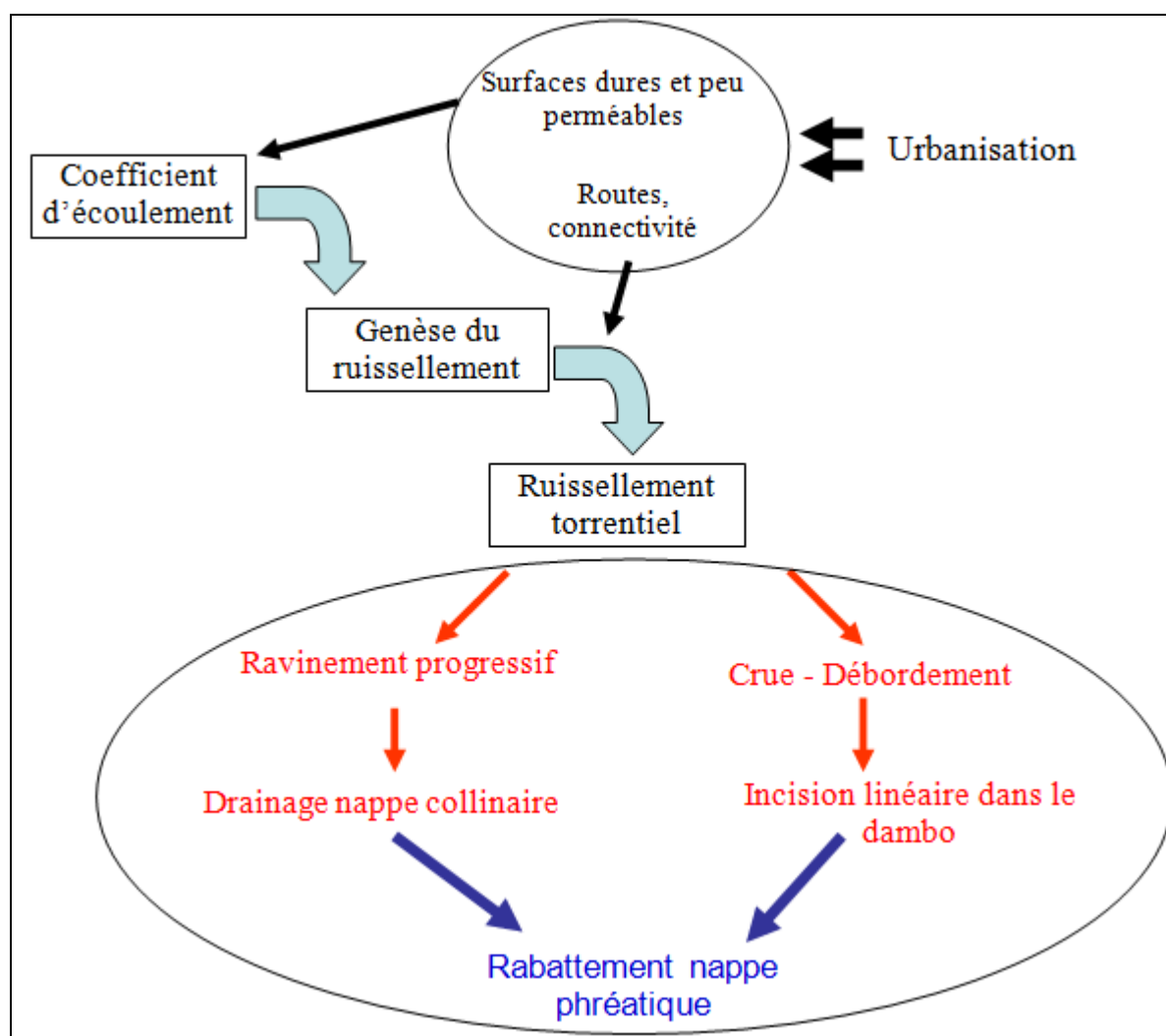


Figure 8.2. Schéma de l'enchaînement du système de drainage superficiel, menant aux risques hydrologiques à Butembo.

Le premier groupe d'interventions se situe au niveau des routes. On pourrait en même temps réduire le potentiel des routes pour concentrer le ruissellement et l'effet d'une connectivité augmentée en mettant beaucoup plus de buses sous les routes qui flanquent les collines. Si l'on plaçait une buse sous la route chaque 10, 20 ou 30 m, on réaliserait des débits de pic de ruissellement aux sorties des buses nettement inférieur, peu capable encore de générer un ravinement progressif sur une pente sans protection. La vitesse d'écoulement dans ces multiples filets d'eau peu puissants sera également ralentie sur les pentes, ce qui réduit la connectivité hydrologique. Une solution alternative peut être envisagée. On peut notamment installer un grand nombre de buses ou de petits ponts pour conduire les eaux qui sont maintenant relâchées sur des pentes sans protection, d'une manière sûre vers la vallée, par des constructions sécurisées comme des caniveaux maçonnés, tuyaux etc. Ceci est la politique suivie dans beaucoup de villes en RDC. Mais on constate qu'avec l'augmentation et

l'intensification de l'urbanisation, les débits de ruissellement ne font qu'accroître. A Kinshasa des vrais chefs-d'œuvre d'ingénieur deviennent la proie de ravinements sévères (Makanzu Imwangana, 2010).

Il est donc conseillé de ne pas uniquement intervenir au niveau de l'évacuation du ruissellement, mais aussi d'attaquer le problème au sommet du schéma de la Figure 8.2, c'est-à-dire de réduire même à zéro si possible, le coefficient d'écoulement dans les collines. Il convient de noter que la région de Butembo n'a jamais fait l'objet d'études très détaillées cadrant avec l'érosion notamment à ce qui concerne l'analyse diachronique et volumétrique des ravins malgré l'ampleur du phénomène. Les rapports locaux s'avèrent des réitérations et des répétitions de ce qui est dit ailleurs dans la région de Grands Lacs en matière de campagne de lutte antiérosive des années 40 et 50.

La région la plus proche de Butembo pour laquelle il existe des rapports publiés est le Rwanda, où les techniques de conservation des sols et de l'eau applicables sur les pentes de 0,36 m/m ont été développées ou proposées (Rishirumuhirwa, 2006 ; Roose & Ndayizigiye, 1996). Dans cette région, l'utilisation des terres a été classée comme étant plus ou moins efficace en termes de conservation des sols et de l'eau (Moeyersons, 2004). La meilleure utilisation des terres susceptible de minimiser l'érosion, même sur des pentes très raides, s'est révélée efficace notamment dans des plantations de théiers, des champs de bananiers avec une strate inférieure herbacée ainsi que des champs de caféiers suffisamment bien paillés. Ces techniques favorisent une grande infiltration d'eau, mais de manière diffuse dans le sol. L'infiltration accrue de l'eau sur des pentes supérieures à 0,36 m/m devraient être diffuse afin d'éviter les mouvements de masse (Moeyersons, 2003). Dans ce contexte, Moeyersons (1989) conseille un paillage copieux sans aucune structure de contour. Autrement, des dégâts pourraient être déclenchés à partir des courants d'eau qui se formeraient à partir des points où des quantités importantes d'eau s'infiltreraient. L'utilisation des géotextiles peut être aussi recommandée comme stratégies de lutte et de prévention. Köning (2006) suggère l'application d'une approche écologique basée sur les techniques et pratiques agroforestières sur des pentes allant jusqu'à 0,57 m/m. Mais l'application de cette méthode nécessite une professionnalisation des agriculteurs. Il s'agira dans le contexte de Butembo d'un domaine qui fera l'objet des recherches dans le futur.

Bibliographie

Bibliographie

- ACMAD, 2010. Bulletin de veille climatique pour l'Afrique N° 9 septembre 2010, Niamey-Niger.
- Acres, B.D., Rains, A.B., King, R.B., Lawton, R.M., Mitchell, A.J.B., and Rackham, L.J., 1985. African dambos: their distribution, characteristics and use. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementenband*, **52**, pp.63-86
- Aguilar, A., Aziz Barry, A., Brunet, M., Ekang, L., Fernandes, A., Massoukina, M., Mbah, J., Mhanda, A., do Nascimento, D.J., Peterson, T.C., Thamba Umba, O., Tomou, M. and Zhang, X., 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955-2006. *Journal of geophysical research*, vol. 114, D02115, doi:10.1029/2008JDO11010, 2009.
- Alcántara-Ayala, I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4): 107-124.
- Assani A.A., 1999. Analyse de la variabilité temporelles des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Nino/La Nina). *Sécheresse*, 10(4), pp 245-252.
- Asselberghs, E., 1939. Notice explicative de la carte géologique de la région du Kivu au 500 000^e. In ASSELBERGHS E. (éd.). 1939. Résultats scientifiques de la mission géologique du Comité National du Kivu. Louvain : Institut géologique de l'Université et Librairie universitaire, 1939. P.281-306. *Mémoires de l'Institut Géologique de l'Université de Louvain*, Tome IX, Fascicule 1.
- Avni, 2005. Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel, CATENA Volume 63, Issues 2-3, 31 October 2005, Pages 185-220
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2004. Slope failures in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. *Geomorphology* 57, 95-116.
- Ayonghe, S.N., Ntasin, E.B., Samalang, P., Suh, C.E., 2004. The June 27, 2001 landslide on volcanic cones in Limbe, Mount Cameroon, West Africa. *Journal of African Earth Sciences* 39, 435-439.
- B.R.G.M. s.d. *Carte géologique du Haut-Zaïre méridional et de Beni-Lubero*. Echelle : 1/ 500 000. Paris : Imprimerie Maquet.

- Ballut, A. and Nguyen, J.P., 1984. Les besoins d'information pour l'aménagement urbain et régional : apport de la télédétection spatiale à la satisfaction de ces besoins. Société française de la photogrammétrie et Télédétection, vol.93, 21-32.
- Balzerek, H., Fricke, W., Heinrich, J., Moldenhauer, K-M., Rosenberger, M., 2003. Man-made flood disaster in the savanna town of Gombe, NE Nigeria; the natural hazard of gully erosion caused by urbanization dynamics and their peri-urban footprints. In *Erdkunde*, 2003, Vol. 57, Issue 2, pp. 94-109.
- Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D. et Zagolski, F., 1996. Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. *International journal of remote sensing*, vol, 17, n° 10, pp. 1885-1906 (1 p. ½).
- Bappel, E., 2005. Apport de la télédétection aérospatiale pour l'aide à la gestion de la sole cannier réunionnaise. Thèse de doctorat, Sciences et Technologies, Université de la Réunion, 278 p.
- Barret, F., Guyot, G. and Major, D. 1989. TSAVI : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89*, Vancouver, Canada, p. 1355-1358.
- Bernard-Reversat, F., 1987. Litter incorporation to soil organic matter in natural and planted tree stands in Senegal. *Pedobiologia*, 30 : 401-417.
- Bernard-Reversat, F., 1991. Evolution of the soil litter interface under *Eucalyptus* plantation on sandy soil in Congo. *Acta Oecologica*, 12 (6) : 825-828
- Bernard-Reversat, F., 1993. Dynamics of litter and organic matter at the soil-litter interface in fast-growing tree plantations on sandy ferrallitic soils (Congo). *Acta Oecologica*. 14 (2): 79-195.
- Bernard-Reversat, F., 1996. Nitrogen cycling in tree plantations grown on a poor sandy savannah soil in Congo. *Applied Soil Ecology*, 4: 161-172.
- Berthier, E., Andrieu, H., Creutin, J.D., 2004. The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of 2D model. *Journal of hydrology*, 299: 252-266
- Bigot S., Moron V., Melice J.L., Servat E., Paturel J.E., 1998. Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique central. In *Water Ressources Variability in Africa during the XXth Century* (ed. E. Servat, D. Hugues, J.M. Fritsch, M. Hulme) 215-222. AISH, Pub 252.
- Bocher, E., Penven, M.,J. et Bedel, O., 2007. Organisation spatiale des systèmes bocagers et parcours des écoulements de surface. In « Bocages et Sociétés », Annie Antoine et Dominique Marguerie (Ed.), pp. 245-260.

- Bordin, P., 2002. SIG. Concept, outils et données. Hermès-Lavoisier, 260 p.
- Bultot, F., 1950. *Régimes normaux et cartes des précipitations dans l'Est du Congo Belge (Longitude : 26° à 31° Est, latitude : 4° Nord à 5° Sud). Pour la période 1930 à 1946.* Bruxelles, INEAC. 1950.
- Byers, A.C., 1992. Soil loss and sediment transport during the storms and landslides of May 1088 in Ruhengeri prefecture, Rwanda. *Natural Hazards*, 5:279-292.
- Cahen, L., 1954. Géologie du Congo belge. Paris et Liège : Masson et Cie et Vaillant-Carmagne, 577p.
- Carnicelli, S., Benvenuto, M., Ferrari, G., Sagri, M., 2009. Dynamics and driving factors of late Holocene gullying in the Main Ethiopian Rift (MER). *Geomorphology*, 103, pp. 541-554.
- Catani, F., Bartolomei, A., Kukavcic, M., Tofani, V., Casagli, N. & Shulli, L. 2005. Unraveling hidden landslides in the Arno river basin (Italy) through neural networks. *Geophysical Research Abstracts*, 7.
- Chaib, J., 1977. Les eaux pluviales: gestion intégrée, Sand de la terre, Paris, 173 p.
- Chaplot, V., Giboire, G., Marchand, P., Valentin, C., 2005. Dynamic modeling for linear erosion initiation and development under climate and land-use changes in northern Laos. *Catena* 63: 318-328.
- Chen, X., Li, X and Ma, J., 2005. Urban change detection based on self-organizing feature map neural network. In *Geosciences and Remote Sensing Symposium*, 2004, vol.5, IEEE International. <http://ieexplore.ieee.org/iel5/9436/29948/01370442.pdf>, 3428§3431.
- Claessens, J., 1929. Du Lac Albert au Lac Kivu à travers les hautes régions montagneuses longeant la frontière orientale de la Colonie. *Bulletin Agricole du Congo belge*. 1929, vol. XX, n°1, p. 3-56.
- Claessens, L., Knapen, A., Kitutu, M.G., Poesen, J., Deckers, J.A., 2007. Modelling landslide hazard, soil redistribution and sediment yield of landslides on the Ugandan footslopes of Mount Elgon. *Geomorphology* 90, 23-35.
- Corbane, C., 2006. Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France, 252p.
- Crippen, R.E., 1988. The dangers of underestimating the importance of data adjustment rationing. *International journal of remote sensing*, vol. 9, n°4, p. 767-776.
- Croke, J., Mockler, S., 2001. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, south-eastern Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 205-217.

- Cruden, D.M. & Varnes, D.J., 1996. Landslides types and processes. In A.K. Turner & R.L. Schuster (Editors), *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, National Council. National Academy Press, Washington D.C., pp. 36-75.
- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Lin, J.C., Hsu, M.L., Lin, C.W., Horng, M.J., Chen, T.C., Milliman, J. & Stark, C.P., 2004. Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology*, 32(8): 733-736.
- De Longueville F., Hountondji Y.C., Henry S., Ozer P., 2010. What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions?. *Science of the Total Environment*, 409: 1-8.
- Denègre, J. et Salgé, F., 1994. Les systèmes d'information géographiques, collection « Que sais-je ? Groupe Dupont.
- Département des Mines, 1981. *Carte géologique de reconnaissance. Lubero S1/ 29*. Echelle : 1/ 200 000. Kinshasa : Bureau des Arts graphiques du Service géologique.
- Descroix, L., Gonzalez Barrios, J.-L., Viramontes, D., Poulenard, J., Anaya, E., Esteves, M., Estrada, J. 2008. Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: their respective roles and the scale effect. *Catena* 72: 325-339. DOI. 10.1016/j. Catena. 2007.07.003
- Dikau, R. , Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.L., 1996. *Landslide recognition*. Wiley, Chichester, 251 p.
- Elichegaray C., 2008. La pollution de l'air, sources, effets, prévention. Ed. Dunod, Paris, 211p.
- Epstein, J., Payne, K. and Kramer, E., 2002. Techniques for mapping suburban sprawl. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, N° 9, pp. 913-918.
- Erpicum M., Binard M., Peters J.P., Alexandre J., 1988. Une méthode d'analyse des caractéristiques de la saison des pluies en région sahélienne (Exemples pris au Sénégal). In. Erpicum M. (Ed.). *Actes des journées de Climatologie, Mont_Rigi*, Belgique, 5-7 novembre 1987, Liège, Presses Universitaires de Liège : 43-56.
- Eyog Matig, O. et Dreyer, E., 1991. Fonctionnement hydrique de quatre essences de reboisement au Nord-Cameroun : Evolution saisonnière du potentiel hydrique et de la conductance stomatique. *Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides. Groupe d'étude de l'arbre*, Paris. p. 85-91.
- Eyog Matig, O., 1993. Etude comparée du fonctionnement hydrique de quatre espèces ligneuses utilisées dans les programmes de reboisement au Nord Cameroun. Doctorat d'état de l'Université de Yaoundé I, (Cameroun). 127 p.

- Fjeldstad, O-H., 2005. Local Revenue Mobilization in Urban Settings in Africa. Workshop on Local Governance and Poverty Alleviation in Africa, African Development Bank, Tunis, p. 1.
- Flageollett, J.C., Maquaire, O., Martin, B. & Weber, D. 1999. Landslides and climatic conditions in the Bracelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*, 30(1-2): 65-78.
- Forester, B.C., 1983. Some urban measurements from Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, n° 12, p. 1693-1707.
- Fung, T. and LeDrew, E., 1988. The Determination of Optimal Threshold Levels for Change Detection using Various Accuracy Indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 54, pp. 1449-1454.
- Fung, T., 1990. An assessment of TM imagery for land cover change detection. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, No 4, 681-684.
- Furon, R., 1960. *Géologie de l'Afrique*. 2^{ème} édition. Paris : Payot, 1960. 400 p.
- Gallo, K.P., McNab, A.L., Karl, T.R., Brown, J.F., Hood, J.J. and Tarpley, J.D., 1993. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *J. Appl. Meteor.*, 32. 899-908. tel-00553665, version 1-7 Jan 2011.
- Gares, P. A., Sherman, D.J. & Nordstrom, K.F., 1994. Geomorphology and natural hazards. *Geomorphology*, 10(1-4): 1-18.
- Garland, G.G., Olivier, M.J., 1993. Predicting landslides from rainfall in a humid, subtropical region. *Geomorphology* 8, 165-173.
- Gausman, H.W., 1985. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. Texas Technical Press, Lubbock, Texas, 78 p.
- Glade, T. & Crozier, M.J., 2005. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: T. Glade, M.G. Crozier (Editors), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, pp. 75-138.
- Gomarasca, M.A., Brivio, P.A., Pagnoni, F. and Galli, A., 1993. One century of land use changes, In the metropolitan area of Milan (Italy). *International Journal of Remote Sensing*, 14: 211-223.
- Goudie, A.S., 1996. The geomorphology of seasonal tropics, In W.M. Adams, A.S. Goudie and A.R. Orme (editors), *The physical geography of Africa*, Oxford University Press, pp. 148-160.
- Graff, W.L., 1977. "The rate low in fluvial geomorphology", *American Journal of Science*, 277: 178-191

- Greenberg, J.D. and Gordon, A.B., 1997. Analyzing the urban-wildland interface with GIS: two case studies. *J. of Forestry* 95(10): 18-22.
- Griffiths G.M., Salinger M.J., Leleu I., 2003. Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific Convergence Zone. *International Journal of Climatology*, 23: 847-869.
- Gumbel E.J., 1958. Statistics of extremes. Columbia University Press, New York.
- Haack B., and Rafter A., 2006. Urban Growth Analysis and Modeling in the Kathmandu Valley, Nepal. *Habitat International*, 30: 1056-1065.
- Hallet, V., 2002. Rapport de mission à Butembo dans le cadre de la sensibilisation à la problématique de la gestion quantitative et qualitative de la ressource en « eau ».
- Harmand, J. M., 1998. Rôles des espèces ligneuses à croissance rapide dans le fonctionnement biogéochimique de la jachère. Effets sur la restauration de la fertilité des sols ferrugineux tropicaux. Bassin de la Bénoué au Nord-Cameroun. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, France. 213 p.
- Haylock M.R., Peterson T., Abreu de Sousa J.R., Alves L.M., Ambrizzi T., Anunciação Y.M.T., Baez J., Barbosa de Brito J.I., Barros V.R., Berlato M.A., Bidgain M., Colonel G., Corradi V., Garcia V.J. Garcia V.J., Grimm A.M., JAildo dos Anjos R., Karoly D., Marengo J.A. Marino M.B., Meira P.R., Miranda J.C., Molion L., Moncunill D.F., Nechet D., Ontaneda G., Quintana J., Ramirez E., Rebello E., Rusticucci M., Santos J.L., Trebejo I, Vincent L., 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of climate*, 19: 1490-1512.
- Henri, B., 1972. Photogrammétrie générale, Tome 2. Restitution : Méthodes et appareils. Collection scientifique de l'institut géographique national, 361 p.
- Herold, M., Couclelis, H. and Clarke, K.C., 2005. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(2005): 369-399.
- Hien, E., 1996. Effets de jachères de diverses natures sur le statut organo-minéral d'un sol ferrugineux tropical dégradé. Conséquence pour la culture. Cas de Ngong- Nord Cameroun. Mémoire de fin d'études, CNEARC-EITARC, Montpellier, France, Irad Garoua, Cameroun, France, 77 p.
- Holben, B. & Justice, C., 1981. An examination of spectral band rationing to reduce the topographic effect on remotely spectral reflectance, Remotely sensed data, *International journal of remote sensing*, vol.2, n°2, p. 115-133.

- Houghton J.P., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van Der Linden P.J., Dai X., Maskell K. et Johnson C.A., 2001. Climate change 2001, The scientific Basis. Cambridge University Press, New York.
- Hountondji Y.C., de Longueville F., Ozer P., 2011. Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change, 26-27 August 2011, Ho Chi Minh Ville, Vietnam.
- Hovius, N., Stark, C.P., Chu, H.T. & Lin, J.C., 2000. Supply and removal of sediment in a landslide-dominated mountain belt: Central Range, Taiwan. *Journal of Geology*, 108(1): 73-89.
- http://www.lemonde.fr/afrique/2010/03/02/glissement-de-terrain-meurtrier-en-ouganda_1313444_3212.html
- Huette, A.R., 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, vol.25, p. 295-309.
- Hutchinson, J.N., 1988. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: C. Bonnard (Editor), Fifth International symposium on Landslides. A.A. Balkema, Lausanne, pp. 3-35.
- IAEG Commission on Landslides, 1990. Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 41: 13-16.
- Ibe, K.M., Ebe, A.M., 2000. Impacts of debris-flow deposits on hydrogeochemical processes and the development of dryland salinity in the Cross-River catchment, SE, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment* 64, 449-456.
- Jackson, R.D., Slater, P. N. and Pinter, P.J.Jr., 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote sensing of environment*, vol.13, p. 187-208.
- Jamet, R., 1975. Evolution des principales caractéristiques des sols des reboisements de Pointe-Noire (Congo). *ORSTOM*, 36 p.
- Jat, M.K., Grag, P.K. and Khare, D. 2007. Monitoring and modeling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, doi: 10.1016/j.jag.
- Joly, F., 1997. *Glossaire de géomorphologie. Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Paris : Armand Colin et Masson, 1997. 325 p.
- Jones, W.I. et Egli, R. 1984. *Systèmes de culture en Afrique. Les hautes terres du Zaïre, Rwanda et Burundi*. Washington : Banque mondiale, 1984. 117 p. Document technique de la Banque mondiale n° 27F.

- Jongen, P. 1970. *Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi*. 26. *Nord-Kivu et région du lac Edouard*. A. *Notice explicative de la carte des sols*. Bruxelles : INEAC, 1970. 78 p.
- Jungerius, PD., Matundura, J., Van Ancker, JAM., 2002. Road construction and gully erosion in West Pokot, Kenya. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(11): 1237-1247. DOI. 10. 1002/esp.423
- Kakule Muwiri et Kahindo Kambalume, (2002) *Identité culturelle dans la dynamique du développement*, Academia Bruyllant, Louvain-la-Neuve.
- Kasay, K., 1988. Dynamisme Démo-Géographique et mise en valeur de l'Espace en milieu équatorial d'altitude : Cas du Pays Nande au Kivu Septentrional, Zaïre. Thèse Doctorat : Géographie : Université de Lubumbashi. 404 p.
- Kasser, M. & Egels, Y, 2001. Photogrammétrie numérique. Collection ENSG-IGN. Hermes, Paris, 379 p.
- Kataomba, K., Maombi, M., Kambale, M. et Kamavu, V., 2010. Plantes adventices du peuplement à eucalyptus sp en ville de Butembo, R.D. Congo. *Annales Sci & Sci.Appl. UOB.*, vol. 2, pp39-45.
- Kauth, R.J. and Thomas, G.S., 1976. The tasseled cap-a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings Symposium on Machine Processing of Remote Sensing Data, LARS, Purdue University, West Lafayette*, vol. 4b, p. 41-51.
- King, J.A. et Campbell, B. M., 1994. Soil organic matter relations in five land cover types in the miombo region [Zimbabwe]. *Forest Ecology and management*, 67 (1-3): 225-239.
- Kitakya P., 2007. Interactions entre la gestion foncière et l'économie locale en région de Butembo, Nord Kivu, République Démocratique du Congo, thèse, Université catholique de Louvain, 291 p.
- Kizza M., Rodhe A., Xu C.Y., Ntale H.K., Halldin S., 2009. Temporal rainfall variability in the Lake Victoria Basin in East Africa during the twentieth century. *Theoretical and applied climatology*, 98: 119-135.
- Knapen, A., Kitutu, M.G., Poesen, J., Breugelmans, W., Deckers, J., Muwanga, A., 2006. Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon (Uganda): characteristics and causal factors. *Geomorphology* 73, 149-165.
- König, D., 2006. Agroforesterie au Rwanda: son efficacité et ses limites. In : Ratsivalaka, S., Serpentié, G., De Noni, G., Roose, E. (eds): *Erosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols*. Actes des journées scientifiques du réseau Erosion et GCES de l'AUF,

- Antananarivo (Madagascar), du 25 à 27 octobre 2005, Editions Scientifiques GB, Paris, p. 71-75.
- Lamb, P.J., 1982 ; Persistence of subsaharan drought. *Nature* 299,46-48.
- Lavelle, P, Barois, I., Martin, A., Zaïdi, Z. et Schaeffer, R., 1989. Management of earthworm populations in agro-ecosystems : a possible way to maintain soil quality? *Ecology of arable land*, 109-122.
- Le Jeannic, T. et Vidalenc, J., 1997. Pôles urbains et périurbanisation. Le zonage en aires urbaines. Division des statistiques et études régionales, Insee, N°516-AVRIL 1997.
- Léone, F., Meschinet de Richemond, N. et Vinet, F., 2010. Aléas naturels et gestion des risques. Presses Universitaires de France, Paris, 288 p.
- Lepersonne, J., 1949. Le fossé tectonique Lac Albert-Semliki-Lac Edouard. *Ann. Soc. Geol. Bel.* 72. Liège.
- Lo C.P., Quattrochi D.A. and Luvall J.C., 1997. Application of Highresolution Thermal Infrared Remote Sensing and GIS to Assess the Urban Heat Island Effect. *International Journal of Remote Sensing*, 18(2):287-304.
- Loubelo, E., 1990. Etude comparative de quelques éléments du fonctionnement de deux peuplements d'*Eucalyptus* au Congo. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I (Fr), 135p.
- Lu, D. and Weng, Q., 2005. Urban Classification Using Full Spectral Information of Landsat ETM+ Imagery in Marion County, Indiana. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71(11): 1275-1284.
- McFarlane, M., J., 1983. A low level laterite profile from Uganda and its relevance to the question of parent material influence on the chemical composition of laterites. In Wilson, R.C.L. (Ed.) *Residual Deposits: Surface related Weathering Process and Materials*. Special Publication 11, Geological Society of London, pp. 69-76.
- Mahé G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. ORSTOM, eds. Coll. Etudes et Thèses, Paris, 438 p.
- Mahé G. L'Hôte Y., Olivry J.C., Wolting G., 2001. Trends and Discontinuities in Regional Rainfall of West and Central Africa – 1951- 19589. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences hydrologiques* 46(2), 211-226.
- Makanzu Imwangana, 2010. Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa par télédétection et SIG entre 1957 et 2007, TFE, Université de Liège, 76 p.

- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. & Reinchenbach, P. 2004. Landslides, earthquakes and erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 229(1-2):45-59.
- Malila, W.A., 1980. Change vector analysis: an approach for detection forest changes with Landsat, *Proceedings of the 6th Annual Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, p. 326-335.
- Manton M.J., Della-Marta P.M., Haylock M.R., Hennessy K.J., Nicholls N., Chambers L.E., Collins D.A., Daw G., Finet A., Gunawan D., Inape K., Isobe H., Kestin T.S., Lefale P., Leyu C.H., Lwin T., Maîtrepierre L., OUtpersitown N., Page C.M., Pahalad J., Plummer N., Salinger M.J., Suppiah R., Tran V.L., trewin B., Tibig I. & Yee D., 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pasific: 1961-1998. *International Journal of Climatology*, 21: 269-284.
- Mas, J.F., 2000. Une revue des methods et des techniques de télédétection du changement. *Journal Canadien de Télédétection*, 26(4) : 349-362.
- Masek, J.G., Lindsay, F.E. and Goward, S.N., 2000. Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 21, No. 18, 3473-3486.
- Mikhaïl, E. M., Bethel, J.S. & McGlone, J.C., 2001. *Introduction to modern photogrammetry*. Wiley, New York, 479 p.
- Miller, R.B. and Small, C., 2003. Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. *Environmental Science & Policy*. Volume 6, Issue 2, pp.129-137.
- Millet, J., 1994. Bilan hydrique d'une jachère arborée en zone soudanienne du Cameroun. DEA écosystèmes continentaux arides, méditerranéens et montagnards, Université St-Jérôme, Marseille, France, 30 p.
- Moeyersons, J., 1981. Slumping and planar sliding on hillslopes in Rwanda. *Earth Surface Processes and Landforms* 6, 265-274.
- Moeyersons, J., 1989. A possible causal relationship between creep and sliding on Rwaza Hill, southern Rwanda. *Earth Surface Processes and Landforms* 14, 597-614.
- Moeyersons, J., 1989. La nature de l'érosion des versants au Rwanda. *Annales sciences économiques*, vol. 19. Musée Royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique, 379 p.
- Moeyersons, J., 1990. Soil loss by rain wash: a case study from Rwanda. *Z. Geomorph. N.F.*, 34 (4): 385-408.
- Moeyersons, J., 1991. Ravine formation on steep slopes foward versus regressive erosion. Some case studies from Rwanda. *Catena*, 18, pp. 309-324

- Moeyersons, J., 2001. The palaeoenvironmental significance of Late Pleistocene and Holocene creep and other geomorphic processes, Butare, Rwanda. *Palaeoecology of Africa and Surrounding Islands* 27, 37-50.
- Moeyersons, J., 2003. The topographic thresholds of hillslope incisions in south-western Rwanda. *Catena* 50 : 381-400.
- Moeyersons, J., Tréfois, Ph., Lavreau, J., Alimasi, D., Badriyo, I., Mitima, B., Mundala, M., Munganga, D.O. & Nahimana, L., 2004. A geomorphological assessment of landslide origin at Bukavu, Democratic Republic of the Congo. *Engineering Geology*, 72/1-2 pp. 73-87
- 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 Eremolgy, Ghent University, Belgium: 144-156
- Moeyersons, J., Van Den Eeckhaut, M., Nyssen, J., Gebreyohannes, Tesfamichael, Van de Wauw, J., Hofmeister, J., Poesen, J., Deckers, J., Haile, M., 2008. Mass movement mapping for geomorphological understanding and sustainable development. Tigray, Ethiopia. *Catena* 75, 45-54.
- Moeyersons J., Trefois, Ph., Nahimana L., Ilunga L., Vandecasteele I., Biyzigiro, V., Sadiki, S., 2009. River and landslide dynamics on the western Tanganyika rift border, Uvira, D.R.Congo: diachronic observations and a GIS inventory of traces of extreme geomorphic activity. *Natural Hazards*., 53(2):291-311.
- Moeyersons, J., Poesen, J., Nyssen, J., Deckers, J., Mitiku Haile, 2010. Reconstructing environmental changes since the LGM in Geba basin, northern Ethiopia, by geomorphic process interpretation and land management evaluation. *Palaeoecolgy of Africa and Surrounding Islands*, submitted.
- Mohymont B. et Demarée G.R., 2006. Courbes intensité-durée-fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 51: 239-253.
- Montgomery, D., R, et Dietrich, W., E., 1994. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. In: Kirkby MJ (ed) *Process models and theoretical geomorphology*. Wiley, Chichester, pp 221–245.

- Moussa, R., Voltz, M. & Andrieux, P., 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during floods events. In. Hydrol. Process. Vol. 16, pp. 393-412.
- Munyololo, Y., Wafula, M., Kasereka, M., Ciraba, M., Mukambilwa, K., Mavonga, T., Cirimwami, M., Muhigirwa, B., Bagalwa, R., Mundala, M., 1999. Recrudescence des glissements de terrain suite à la réactivation sismique du bassin du Lac Kivu. Région de Bukavu (Rép. Dém. Congo). Mus. roy. Afr. centr., Dépt. Géol. Min., Rapp. Ann. 1997 & 1998, 285–298
- Natural Disaster Database for Central Africa:
<http://www.africamuseum.be/collections/browsecollections/naturalsciences/earth/hazard>
- Naveau P., Nogaj M., Ammann C., Yiou P., Cooley D., Jomelli V. 2005. Statistical methods for the analysis of climate extremes. *C.R. Geosciences*, 337: 1013-1022.
- New, M., Hewiston, B., David, B., Tsiga, S.A., Kruger, A., Manhinsue, A., Gomez, B., Coelho, C.A.S., Masisi, D.N., Kalulanga, E., Bulane, E., Fortunata, L., Mdoka, M.L., Lajoie, R., 2006. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa, *journal of geophysical research*, 111, D14102, doi. 10.1029/2005JD006289, 2006.
- Newmark, N.M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments: *Geotechnique*, v. 15, no. 2, p. 139-160.
- Ngechu, W.M., Ichang'I, D.W., 1999. The environmental impact of landslides on the population living on the eastern footslope of the Aberdare range in Kenya: a case study of Maringa village landslide. *Environmental Geology* 38, 259-264.
- Ngechu, W.M., Mathu, E.M., 1999. The El-Niño-triggered landslides and their socioeconomic impact on Kenya. *Environmental Geology* 38, 277-284.
- Ngechu, W.M., Nyamai, C.M., Erima, G., 2004. The extent and significance of mass-movements in Eastern Africa: case studies of some major landslides in Uganda and Kenya. *Environmental Geology* 46, 1123-1133.
- Nicoloyanni, E., 1990. Un indice de changement diachronique appliqué à deux scènes Landsat MSS sur Athènes (Grèce). *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, n°9, p. 1617-1623.
- Njoukam, R., 1995. Contribution à l'étude des interactions « essences forestières à croissance rapide et sols des savanes tropicales humides ». Cas de la réserve forestière de Mélap (Foumban) au Cameroun. Thèse de doctorat, FUSAGx. 215 p.

- Nowark, D.J., Civerolo, K.L., Rao, S.T., Sistla, G., Luley, C.J. and Crane, D.E., 2000. A modeling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmos. Environ.* 34: 1601-1613.
- Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, Luyten E, Veyret-Picot M, Deckers J, Mitiku Haile, Govers G. 2002. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 1267–1283
- Nyssen, J., Moeyersons, J., Poesen, J., Deckers, J., haile, M., 2003. The environmental significance of the remobilization of ancient mass movements in the Atbara-Tekeze headwaters, northern Ethiopia. *Geomorphology* 49: 303-322.
- Ohta, S., 1990. Initial soil changes associated with afforestation with *Acacia auriculiformis* and *Pinus kesiya* on Denuded Grasslands of Pantabagan Area, Central Luzon, the Philippines. *Soil Sci. Plant. Nutr.* 36 (4): 633-643.
- ONU-Habitat, 2010. L'état des villes africaines 2010. Gouvernance, inégalité et marchés fonciers urbains. <http://www.cursus.edu/?module=directory&subMod=PROD&acion=get&pclass=2&uid=14455> consulté le 12 février 2011.
- Osmar, C.J., Guimaraes, R., Freitas, L., Gomes-Loebmann, D., Arnaldo Gomes, R., Martins E., Montgomery D.R., 2010. Urbanization impacts upon catchment hydrology and gully development using multitemporal digital elevation data analysis. *Earth Surface Processes and Lands Forms* 35: 611-617.
- Owen, T.W., Carlson, T.N. and Gillies, R.R., 1998. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing* 19, pp. 1663-1681.
- Ozer P., Erpicum M., 1995. Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse*, 6: 103-108.
- Ozer P., Bodart C., Tychon B., 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental: récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo : Revue Européenne de Géographie*. N°.308, 02/05/2005, 24 p. (<http://www.cybergeo.presse.fr>) consulté le 31 janvier 2011.
- Ozer P., Hountondji Y.C., Laminou Manzo O., 2009. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *GEO-ECO-TROP*, 33: 11-30.
- Pain, M., 1979. Kinshasa. Ecologie et organisation urbaines, thèse Lettres, Paris X-Nanterre, 2 vol. : 476 p et 223 p. + atlas.

- Paluku Kitakya, 2007. Interactions entre la gestion foncière et l'économie locale en région de Butembo, Nord-Kivu, République Démocratique du Congo, thèse, Université Catholique de Louvain, 291 p.
- Pecrot, A. et al., 1962. L'altération des roches et la formation des sols au Kivu (République du Congo). Bruxelles : INEAC, 1962, 90 p. Série scientifique n° 97.
- Pèlerin, E., 2010. Etude sur la problématique foncière au Nord-Kivu, RDC. 71 p.
- Perry, C.R. and Lautenschlager, L.F., 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote sensing of environment*, vol. 14, p. 169-182.
- Petley, D.N., 2008. The global occurrence of fatal landslides in 2007. *Proceeding of the "First World Landslide Forum Satellite conference"*. Sendai, Miyagi Prefecture, Japan, p. 11.
- Pike, R.J., Graymer, R.W. & Steven Sobieszczyk, S., 2003. A simple GIS model for mapping landslide susceptibility. In I.S. Evans, R. Dikau, E. Tokunaga, H. Ohmori & M. Hirano (Editors), *Concepts and modeling in geomorphology: international perspectives*. TERRAPUB, Tokyo, pp. 185-197.
- Planton S., 2007. Impacts du changement climatique sur les événements climatiques extrêmes. Actes de colloque de l'académie des Sciences sur les « Ecosystèmes et Evénements Climatiques Extrêmes » du 4, 5 et 6 juillet 2007. Météo-France, Centre national de Recherches Météorologiques, <http://www.canalacademie.com/Evenements-climatiques-extremes>, 2015.html, consulté le 31 janvier 2011.
- Pochon, J., De Barzac, H. et Faivre-Amiot, 1959. L'influence de plantation d'Eucalyptus au Maroc sur la microflore et l'humus du sol. *Annales de l'Institut Pasteur*. 97 (3) : 403-406.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten G., valentine, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133. DOI. 10.1016/S0341-8162(02)00143-1
- Pomerol, C. et Renard, M., 1997. *Eléments de Géologie*. 11^{ème} éd. Paris, Masson, 1997. 615 p.
- Pumain, D., Saint-Julien, T., Cattan, N et Rosenblat, C., 1991. Le concept statistique de la ville en Europe. EUROSTAT, office des publications officielles des communautés européennes, Luxembourg, thème 3, série E, 89 p.
- Raunet, M., 1985. Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar, *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementenband*, 52, pp.25-62.
- Redman, C.L., Jones, N. S., 2004; The environmental, social and health dimensions of urban expansion. *Produced for Population-Environment research Network cyberseminar*, 29 nov.-15 déc. 2004, 12 p.

- Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F. & Carrara, A., 2005. Validation of a landslide susceptibility model using event inventory maps. *Geophysical Research Abstracts*, 7.
- Richardson, A.J. and Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, n° 12, p. 1541-1552.
- Ridd, M.K. and Liu, J., 1998. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, 95-100.
- Rishirumuhirwa, Th., 2006. Lutte antiérosive et recherche en gestion et conservation des sols au Burundi. In : Ratsivalaka, S., Serpentié, G., De Noni, G., Roose, E. (eds): *Erosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols. Actes des journées scientifiques du réseau Erosion et GCES de l'AUF, Antananarivo (Madagascar), du 25 à 27 octobre 2005*, Editions Scientifiques GB, Paris, p. 57-63.
- Robin, M., 1995. *La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographique*. Éditions Nathan Université, 320 p.
- Rodriguez, F., Andrieau, H., Creutinb JD. 2003. Surface runoff in urban catchments : morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of hydrology* 283: 146-168.
- Roessner, S., Hans-Ulrich, W., Kaufmann, H. & Sarmagoev, A., 2005. Potential of Satellite Remote Sensing and SIG for Landslide Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan (Central Asia), *Natural Hazards*, 35: 395-416.
- Roose, E., Ndayizigiye, F., 1996. Agroforestry and GCES in Rwanda, *Soil Technology*, 11 (1): 109-119.
- Rossi, G., 1980. Tectonique, surfaces d'aplanissement et problèmes de drainage au Rwanda-Burundi, *Rév. Géom.* XXIX, 3, Paris, pp. 81-100.
- Rossi, G., 1984. Evolution des versants et mise en valeur agricole au Rwanda. In : *Annales de Géographie*, n° 515, pp. 23-43.
- Roth, M., Oke, T.R. and Emery, W.J., 1989. Satellite derived Urban Heat Islands drom Three Coastal Cities and the Utilization of Such Data in Urban Climatology, *International Journal of Remote Sensing*, 10(11): 1699-1720.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. & Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report, Grennbelt, Maryland*, 50 p.

- Rowntree, K. M., Ntsaba M. M., Weaver Alex van Breda, 1991. Changing patterns of erosion in a periurban catchment, Maseru, Lesotho. In Peters N.E. and Walling D. E. (editor); IAHS-AISH Publication, Vol. 203, pp. 93-102.
- Rutherford, I.D., Prosser, I.P. & Davis, J., 1997. "Simple approaches to predicting rates and extent of gully development" In: Wang, S.S.Y., Langendoen, E.J. & Shields, Jr., 1997. "*Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*", pp. 1125-1130
- Rwilima, C. & Faugère, T., 1981. Evolution entre 1958 et 1979 du couvert forestier et du débit des sources dans certaines régions du Rwanda. Etude GEOMINES-AIDR, Bruxelles, 5p.
- Sadiki N., Vandecasteele I., Moeyersons J., Ozer A., Ozer P., Kalegamire D., Bahati C., 2010. Développement de la ville de Bukavu et cartographie des vulnérabilités, R.D. Congo, *Annales des Sciences et Sciences Appliquées de l'Université Officielle de Bukavu*, 2: 120-127.
- Sahani, M., Vandecasteele, I., Moeyersons, J., Trefois, P., Ozer, P., 2011. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo (RDC) de 1957 à 2010. GEO ECO TROP. Accepté
- Sánchez-Rodriguez, R., SETOK, K.C., Simon, D., Solecki, W.D., Krass, F. , Lauman, G. , 2005. Science Plan. Urbanization and global environmental change. IHDP, Report, 15, Bonn, 64 p.
- Schenk, T., 1999. Digital photogrammetry. Background, fundamentals, automatic Orientation procedures, 1 TerraScience, Laurelville, OH, 428 p.
- Schuster, R.L., 1996. Socioeconomic significance of landslides. In: A.K. Tuner & R.L. Schuster (Editors), Landslides: investigation and mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C., pp. 12-35.
- Sene S. et Ozer P., 2002. Evolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. Bulletin de la société géographique de Liège, 42 : 27-43.
- Singh, A., Mitchel, J.K., 1968. General stress-strain-time functions for soils. Journal of Soil Mechanics and Foundations, American Society of Civil Engineers, 94,1, pp.21-46
- Singh, A., 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. International Journal of Geographical Information Science, vol.12, No. 7, 651-671.

- Slater, P.N. & Jackson, R.D., 1982. Atmospheric effects on radiation reflect from soils and vegetation as measure by orbital sensors using various scanning directions. *Applied optics*, vol. 21, n° 21, p. 3923-3931.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., 2007. *Climate change 2007. The physical sciences basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 996 p.
- Stefanov, W.L., Ramsey, M.S. and Christensen P.R., 2001. Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment* 77: 173-185.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. American Geophys. Union*, 36, 913-920.
- Stuckens, J., Coppin, P.R. and Bauer, M.E., 2000. Integrating contextual information with per-pixel classification for improves land cover classification. *Remote Sensing of Environment*. 71, pp. 282-296.
- Sudhira H.S., Ramachandra T.V. and Jagadish K.S., 2004. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, pp. 29–39.
- Swift, M. J., Heal, O.W. et Anderson, L. E., 1979. *Decomposition in terrestrial Ecosystem. Studies in ecology*. Vol. 5. Blackwell scientific publications. Oxford.
- Temple, P.H., Rapp, A., 1972. Landslides in the Mgeta Western Uluguru Mountains Tanzania. *Geografiska Annaler* 54, 157-193.
- Toky, O.P. et Singh, V., 1993. Litter dynamics in short-rotation high density tree plantation in an arid region of India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 45: 129-145.
- Toutin, T, Cheng, P., 2001. DEM Generation with ASTER Stereo Data. *Earth Observation Magazine*, June 2001.
- Tricart, J. Trautman, J. et Bonn, F., 1996. La télédétection appliquée à la géomorphologie continentale et aux systèmes éco-géographiques. In Bonn, F. (réd.) *Précis de télédétection : volume 2 – Applications thématiques*, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Ste-Foy et Montréal, pp.57-90.
- Uguen, K., 1996. Effet de litière d'espèces ligneuses naturelles et introduites de jachère sur la disponibilité de l'azote du sol pour les plantes. DEA d'écologie générale. Université de Paris VI, Université de Paris XI, I.N.A. Paris Grignon (Fr). 27 p. + annexes.

- Ugodulunwa, F.X.O. and Laka I.S., 2008. Gully classification and management in Jos City and environs, Nigeria. In International Geological Congress, Abstract Congrès Géologique International Oslo, Norway, Resumés, 2008, vol. 33.
- Urbanisme et Habitat, 2006. Rapport annuel du service de l'Urbanisme et Habitat de la ville de Butembo. Inédit.
- Valentin, C., Poesen J., Li Y., 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *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, édité par l'auteur, Ohain (Belgique), 554 p.
- Van Noten, F. and De Ploey, J., 1977. Quaternary research in northeastern Nigeria. *Ann Royal Museum for Central Africa, Tervuren, Series of Human Sciences*, 92, 61p.
- Vandecasteele, I., Byizigiro, V., Nkurunziza, D., Sahani, M., Nahimana, L., Lutumba, I., Sadiki, N., Trefois, P., Moeyersons, J., 2009. Spatial and temporal distribution of geomorphological hazards: the new "Natural Hazards Database for Central Africa". 7th International Conference on Geomorphology (ANZIAG). Ancient LandScapes-Modern Perspectives, 6-11 July, 2009, Melbourne (Australia).
- Vandecasteele, I., Moeyersons, J. & Trefois, Ph. 2010. 'An assessment of the spatial and temporal distribution of natural hazards in central Africa'. Jürgen Runge (ed), *Paleoecology of Africa* 30, special issue : *African Palaeoenvironments and Geomorphic Landscape Evolution* : 279-300. London, UK : CRC Press, Taylor & Francis Group
- Vandecasteele, I., Makanzu, F.,I., Tumwaka, C., N., Ntombi, A. M., Tefois, P., Ozer P., Moeyersons, J., 2011. The increasing threat of natural hazards in Central Africa: the case of urban megagullies. 23rd colloquium of African Geology, January 8-14, 2011, p. 407. Abstracts volume. "Together in Africa for a leading role in geosciences". University of Johannesburg, South Africa
- Vandekerckhove, L., Posen J., Oostwoudwijdenes D., Nachtergaele, J., Kosmas, C., Roxo MJ., De Figueiredo, T., 2000. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1201-1220.
- Vogelmann, J.E., Sohl, T. and Howard, S.M., 1998. Regional characterization of land cover using multiple sources of data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 64(1), 45-57.

- Vyakuno, K., 2006. Pression anthropique et aménagement rationnel des hautes terres de Lubero en RDC. Rapports entre société et milieu physique dans une montagne équatoriale, Tome I, Thèse, Université de Toulouse II, Département de géographie et aménagement, p.144
- Wafula, D., M., 2011. Impacts of tectonic earthquakes in the Western Rift Valley of Africa on the Volcanic Activity of Nyiragongo, Virunga Region. *Asian Journal of Scientific Research*, 4: 209-223.
- Wagrowski, D.M. and Hites, R.A., 1997. Polycyclic aromatic hydrocarbon accumulation in urban, suburban and rural vegetation. *Environ. Sci. Technol.* 31: 279-282.
- Wastiaux, C., 2000. Facteurs hydrologiques de la dégradation des tourbières hautes à sphaignes (Hautes-Fagnes, Belgique). Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de Liège, 223 p.
- Wastiaux, C., 2008. Les tourbières sont elles des éponges régularisant l'écoulement ? In : *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 50, 2008, pp. 57-66.
- Weber, C., 1995. Images satellitaires urbain. Éditions Hermès, Paris, 185 p.
- Weber, C., Donnay, J.-P. et Collet, C., 1997. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. In J.-M.M. Dubois, J.P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (dir.) *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Collection Universités francophones, AUPELF, Montréal, 362 p.
- Weiss, G., 1959. Le pays d'Uvira; étude de géographie régionale sur la bordure occidentale du lac Tanganika. *Acad. roy. Sci. coloniales, Cl. Sci. nat., Mem. in-8 degrees, n.s., f. 5*
- Xiao, J., Shen, Y., Ge, J. Tateishi, R., Tang, C., Liang, Y and Huang, Z., 2005. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China by using GIS and remote sensing *Landscape an Urban Planning*, 1-12.
- Yang X. and Liu Z., 2005. Use of satellite-derived landscape imperviousness index to characterize urban spatial growth. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(5):524-540.
- Yang, L., Huang, C., Homer, C.G., Wylie, B.K. and Coan, M.J., 2003. An approach for mapping large area impervious surfaces: Synergistic use of Landsat 7 ETM and high spatial resolution imagery, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(2): 230-240.
- Yang, X. and Lo, C.P., 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, 1775-1798.

- Yeh, A.G.-0. and Xia, L., 2001. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2001, vol.67, n°1, pp. 83-90.
- Yin, Z.Y., Stewart, D.J., Bullard, S. and MacLachlan, J.T., 2005. Changes in built-up surface and population distribution patterns during 1986-1999: a case study of Cairo, Egypt. *Computers, Environment and Urban systems*, 1-22.
- Zhang, Q., Wang, J., Peng, X., Gong, P. and Shi, P., 2002. Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multitemporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, vol.23, No. 15, 3057-3078.
- Zogning, A., Ngouanet, C., Tiafack, O., 2007. The catastrophic geomorphological processes in humid tropical Africa: a case study of the recent landslide disasters in Cameroon. *Sedimentary Geology* 199, 13-27

Annexes

ANNEXES :

Annexe I : La délimitation de la ville selon le décret présidentiel. La description tient compte du trekking avec le GPS.

Une étude sur la problématique foncière au Nord-Kivu, RDC (Pélerin, 2010) a suggéré entre autre que les limites des zones urbaines soient clarifiées et que les actions y relatives soient inscrites prioritairement dans les agendas des acteurs politiques. ONU-Habitat (2010) réaffirme que les limites administratives tendent à compliquer l'application de la réglementation de la planification urbaine : les systèmes parallèles de gestion et d'administration de terrains urbains peuvent fonctionner et même coexister sans trop de heurts, mais seulement lorsque les territoires sous leur contrôle respectif sont clairement délimités et séparés.

La ville est à cheval sur les deux territoires de Lubero et de Beni et reste circonscrite dans les deux chefferies des Baswagha et des Bashu. Elle est limitée :

- Au nord par la confluence des rivières Kimemi et Luhule. Dès la jonction de ces deux rivières, la limite coïncide avec le cours d'eau de la Kimemi qui se fraie un lit entre la ferme de Mateitei et la route Butembo Beni. La rencontre entre Kimemi et la rivière Kahuha constitue le point le plus excentré au nord. A ce niveau, la limite suit le lit de la rivière Kahuha qui ressort par les tuyaux du trop plein de l'étang de barrage du complexe Théicole de Butuhe. Au niveau de la digue, la limite longe celle du complexe théicole jalonnée par des *Eucalyptus* sur un alignement bien net à partir de Vuhambo jusqu'au sommet culminant sur la colline Buyonga-Marundu (point le plus haut de la ville à 2030 m d'altitude). A partir de ce sommet, l'alignement des *Eucalyptus* joute le village de Vuhanika et traverse la route à kyangombe et celle qui mène vers Butuhe avant de rejoindre la rivière Makamba, puis le lieu du captage des eaux de Régideso. Le thalweg emprunté par cette rivière rencontre en aval le ruisseau Mungo. A ce niveau, l'alignement des *Eucalyptus* réapparaît et jalonne la limite en passant par le village de Mungo avant de rejoindre la rivière Mubunge.

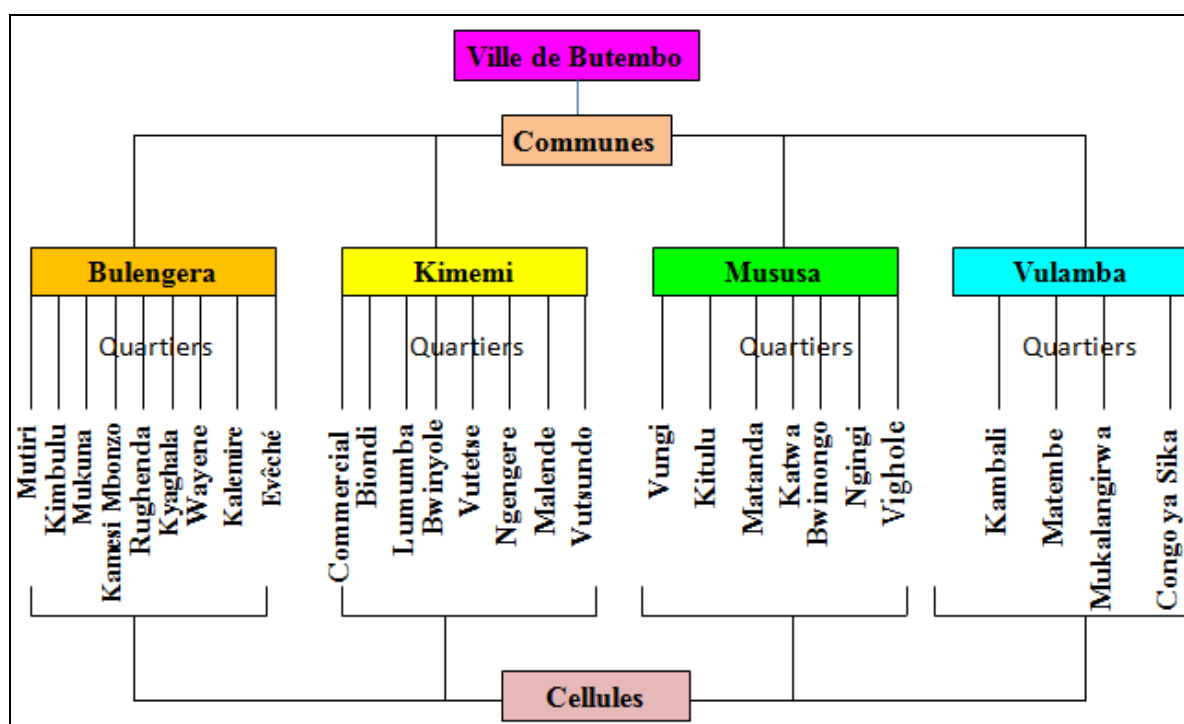
- L'ouest de la ville de Butembo coïncide donc avec le croisement entre la limite naturelle de la rivière Mubunge et l'alignement des arbres constituant la limite avec le terrain du

complexe théicole de Butuhe. La Mubunge se fraie un lit le long des pâturages avant de se jeter dans la rivière Lukwaliha. A cette jonction, la limite remonte avec la rivière Lukwaliha jusqu'au niveau de la confluence entre la rivière Lukako et Kaghenda Vutuli non loin de la route Butembo Manguredjipa, constituant en même temps la limite du territoire de Lubero et de Beni. La délimitation remonte donc la Lukako jusqu'au croisement entre cette dernière et le ruisseau Musingiri. Ce ruisseau traverse la route sur l'axe Manguredjipa. A ce niveau, un petit pont qui y est jeté constitue en même temps la limite entre la commune Kimemi et Vulamba. Le ruisseau va jusqu'à sa source et la limite remonte le flanc en passant par un pont en bois conduisant à Kiragho. De là, la rue remontante s'arrête à 15 m sur la route avant de rejoindre la barrière sur la route Muhangi à Musingiri. De là, la limite rejoint la source de Kakolwe avant que le ruisseau portant le même nom ne serpente un escarpement rocailleux pour rejoindre la rivière Kinzedeu. De cette confluence coule l'eau qui se jette dans la rivière Mususa, constituant ainsi la limite ouest de la ville.

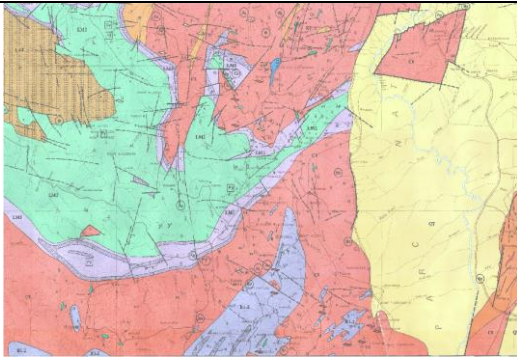
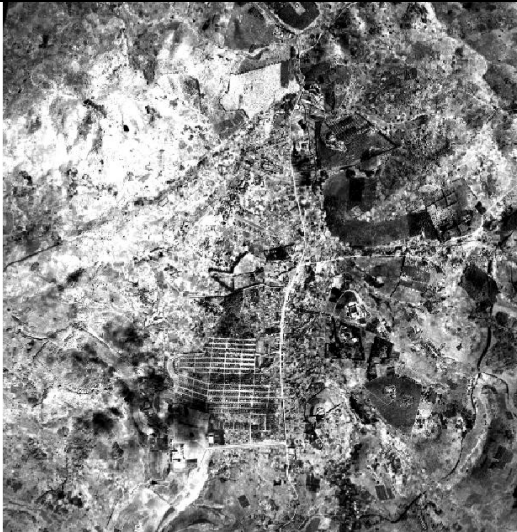
- Au sud, la limite remonte la rivière Mususa jusqu'au croisement avec la rivière Mutinga via la chute d'Ivugha. A partir de ce croisement, une ligne droite (azimut) permet de rejoindre le pont sur la rivière Mususa au niveau de la nationale n°2 (route Butembo-Musienene-Goma). A partir de ce pont la limite de la ville est essentiellement naturelle car elle coïncide avec la rivière Mususa jusqu'à la confluence avec la rivière Virendi.

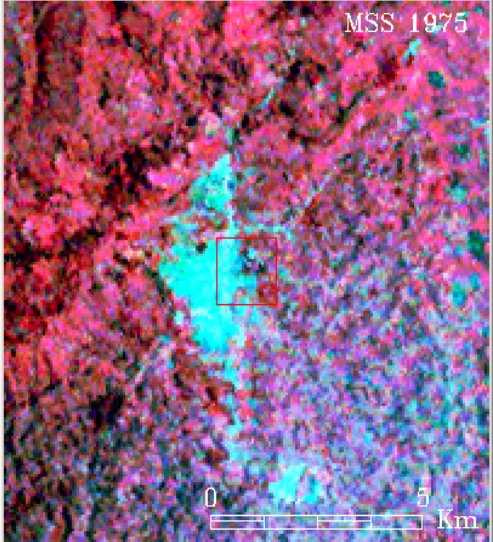
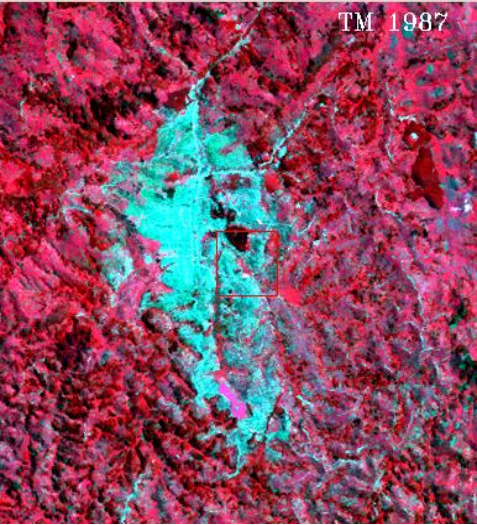
- A l'est, à partir de la confluence entre la Mususa et Virendi, la limite longe la rivière Virendi jusqu'au niveau du pont Virendi. Le ruisseau Kitendere qui se jette dans la Virendi arrose le thalweg qui culmine au sommet de la colline où se trouvent deux essences forestières du genre *Podocarpus*. De là, en traversant la route qui mène vers le rond-point CUGEKI, une vallée très encaissée conduit à la source Lusovovu. De cette source découle le ruisseau qu'il faut longer jusqu'à la confluence avec la Lwirwa. De cette confluence, la limite longe la rivière Lwira jusqu'à la jonction avec la rivière Kamikingi. A ce niveau, la dénomination de la rivière change pour devenir la rivière Luhule qui se jette dans la Kimemi au nord. La subdivision administrative est présentée à la page suivante.

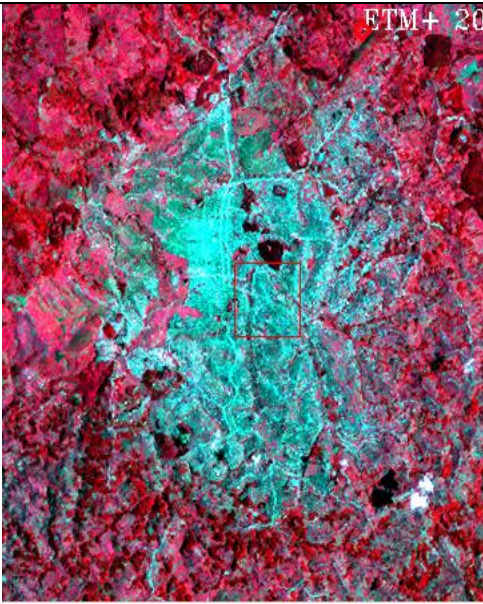
Subdivision administrative de la ville de Butembo

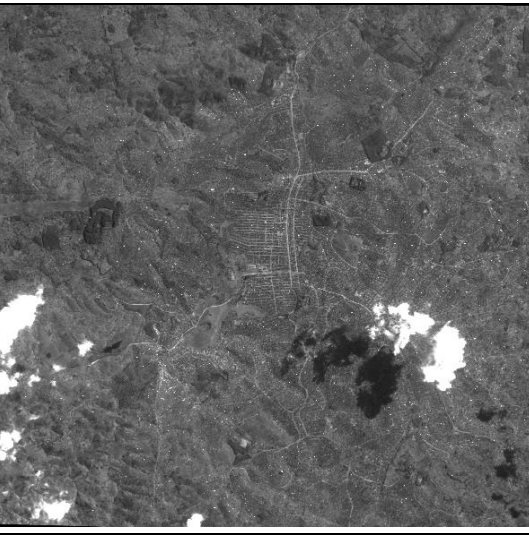


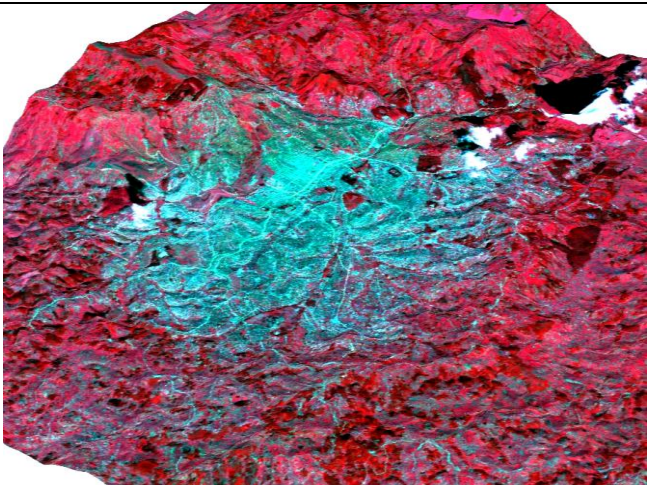
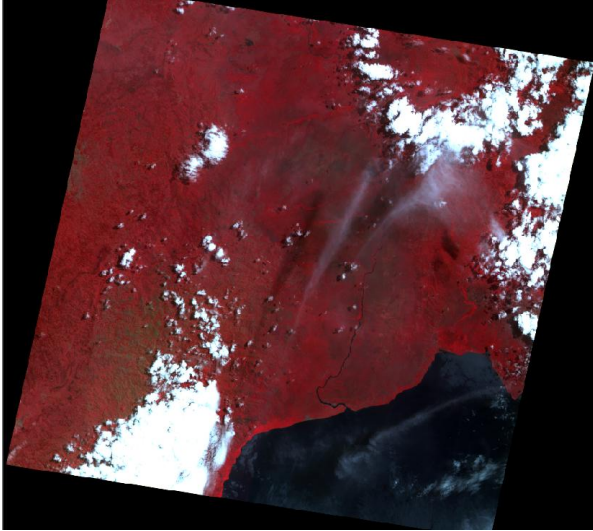
Annexe II : Tableau SIG : Données cartographiques et spatiales utilisées dans le cadre de ce travail

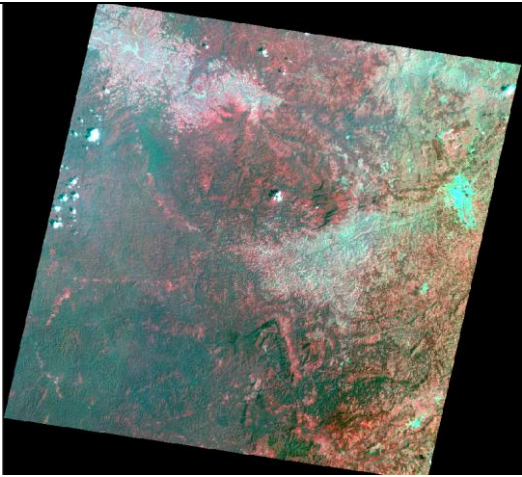
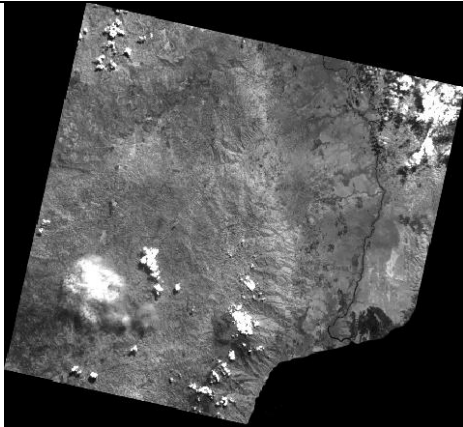
Données	Informations	Cartes / Aperçus.	Utilisation
Carte géologique	Source : MRAC Dépôt : Cartothèque Echelle : 1/500.000		- Comparaison des structures linéaires cartographiées sur base des images satellitaires et des photos aériennes. - Carte géologique de la ville de Butembo
Photo aérienne	Source MRAC Dépôt : Cartothèque Echelle : 1/40.000 Date : 1957 Focale = 114,7 mm		- Analyse stéréoscopique des éléments du paysage urbain - Reconstitution historique par analyse diachronique du développement de la ville - Extraction du modèle numérique de terrain par stéréophotointerprétation sous Leica-image ; - Extraction des courbes de niveau

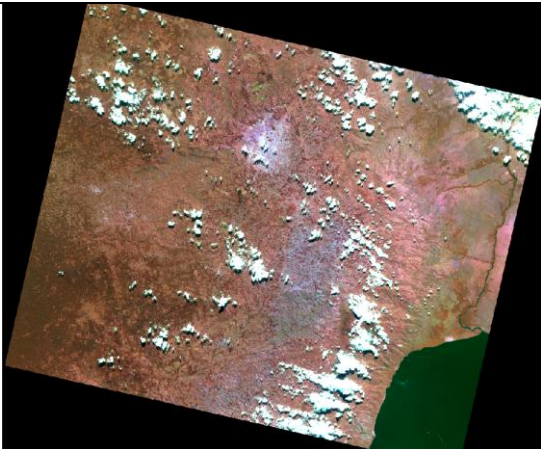
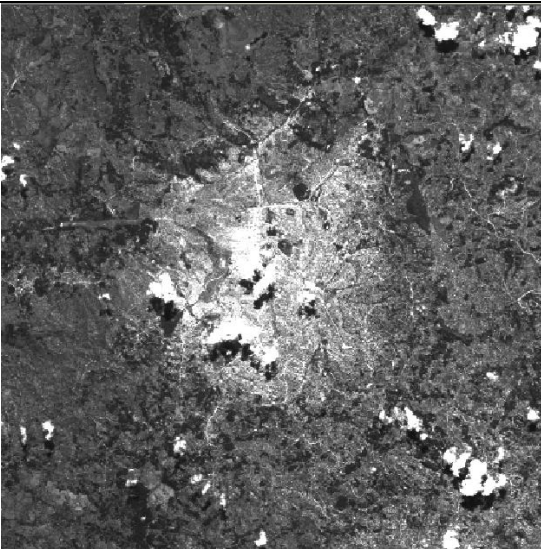
LandSat MSS	Source : USGS Dépôt : ULg Date : 12/03/1975 Résolution : 90 m Type : multispectral		- Analyse diachronique du développement de la ville - Calcul de l'indice de végétation
Landsat TM	Source : USGS Dépôt : ULg Date : 07/08/1987 Type : Multispectral Résolution : 30 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Calcul de l'indice de végétation

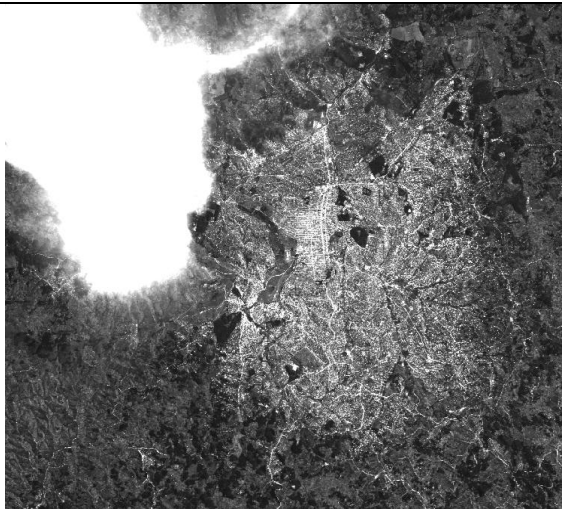
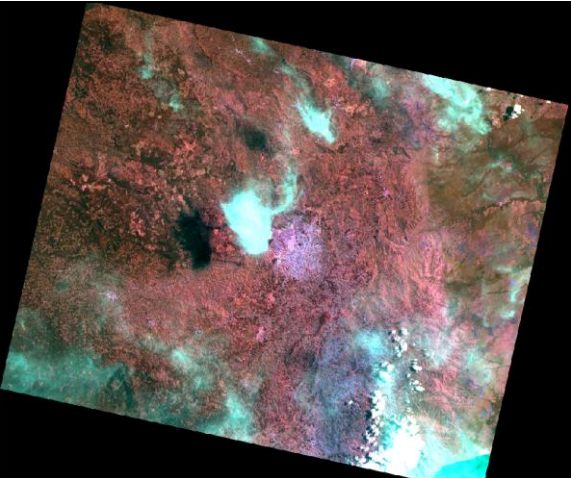
LandSatETM+	Source : USGS Dépôt : ULg Date : 14/03/2001 Type : Multispectral Résolution 30 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Calcul de l'indice de végétation
Quickbird	Source : Digital Globe Dépôt : ULg-LGT ULg-LBCV Date : 18/04/2005 Type : multispectral Résolution : 2,4 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Extraction du bâti urbain

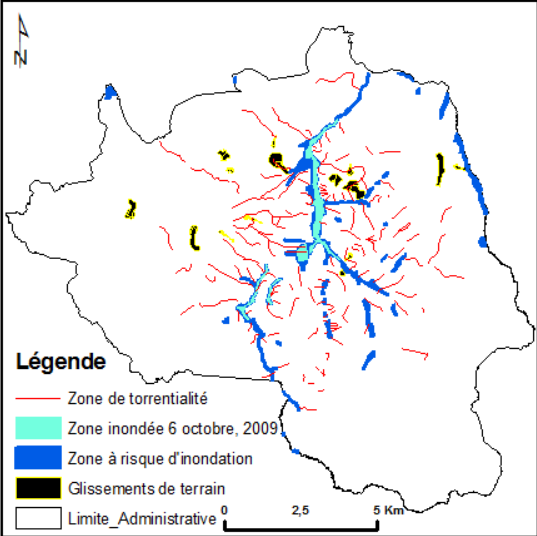
Quickbird	Source : Digital Globe Dépôt : ULg-LGT Date : 18/04/2005 Type : panchromatique Résolution : 60 cm		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Extraction du bâti urbain
OrbView	Source : Geo Eye Dépôt : ULg-LGT ULg-LBCV Date : 03/07/2005 Type : panchromatique Résolution : 1 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Extraction du bâti urbain

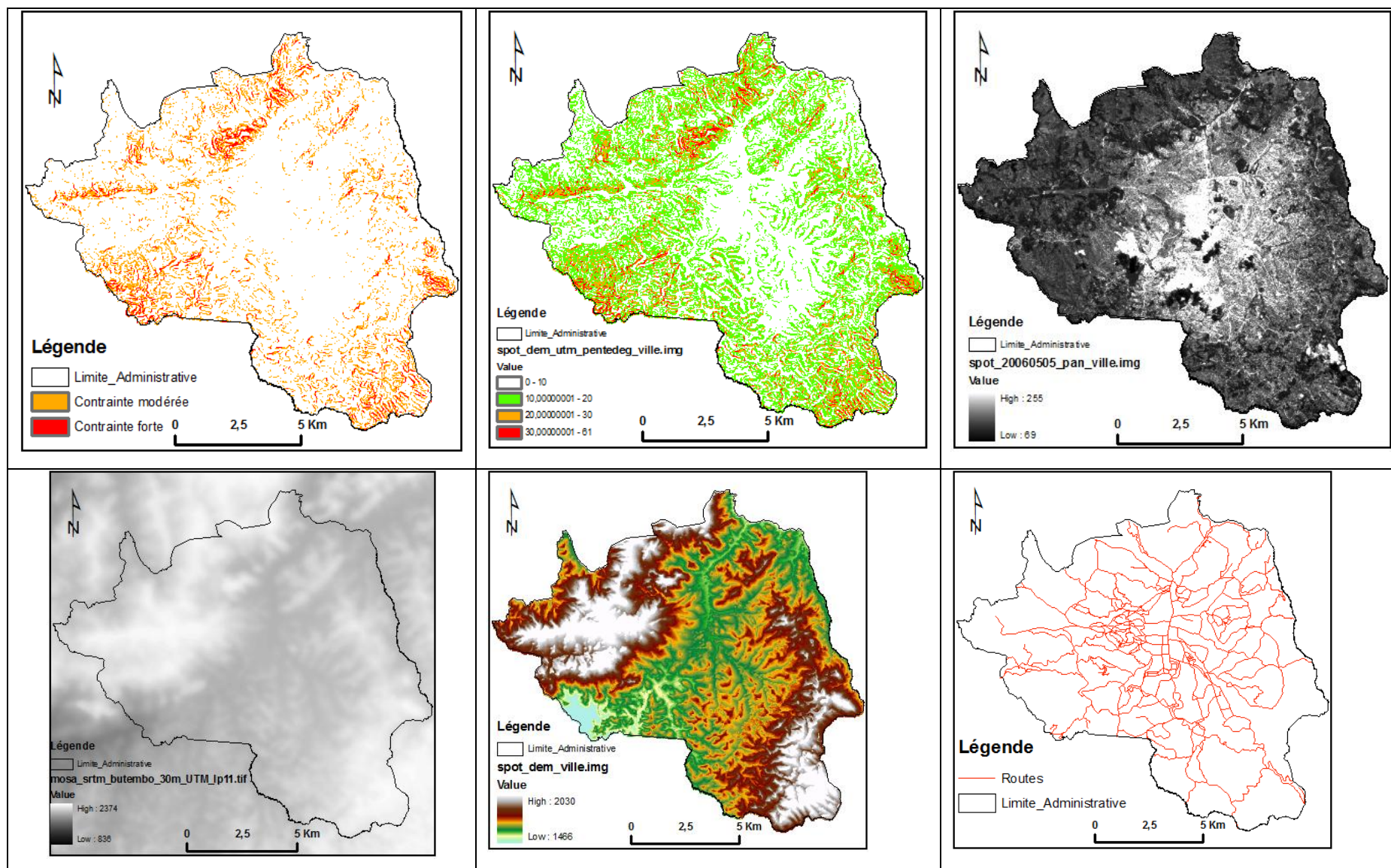
ASTER	Source : NASA Dépôt : Musée Royal de l'Afrique centrale (Tervuren) Date : 23 mai 2006 Type : multispectral Résolution : 15 m (Visible et PIR)		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Calcul de l'indice de végétation - Extraction du modèle numérique de terrain ; - Courbes de niveau
SPOT	Source : SPOT Image/Projet ISIS (CNES) Dépôt : ULg-LGT Date : 19/04/1989 Type : XS Satellite : SPOT 1 Résolution 20 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Calcul de l'indice de végétation - Extraction du modèle numérique de terrain ; - Courbes de niveau

SPOT	Source : Société SPOT Image/Projet ISIS (CNES) Dépôt : Labo ULg Date : 03/02/1987 Type : XS Satellite : SPOT 1 Résolution 20 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; Extraction du bâti urbain
SPOT	Source : Société SPOT Image/Projet ISIS (CNES) Dépôt : ULg-LGT Date : 08/07/2004 Type : HI Satellite : SPOT 5 Résolution 10 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; Extraction du bâti urbain

SPOT	Source : Société SPOT Image/Projet ISIS (CNES) Dépôt : ULg-LGT Date : 05/05/2006 Type : HI Satellite : SPOT 5 Résolution 10 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Extraction du bâti urbain
SPOT	Source : Société SPOT Image/Projet ISIS (CNES) Dépôt : ULg_LGT Date : 05/05/2006 Type : Panchromatique Satellite : SPOT 5 Résolution 2,5 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Extraction du modèle numérique de terrain ; - Courbes de niveau

SPOT	Source : Société SPOT Image/Projet ISIS (CNES) Dépôt : ULg-LGT Date : 11/05/2008 Type : Panchromatique Satellite : SPOT 5 Résolution : 2,5 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Extraction du modèle numérique de terrain ; - Courbes de niveau
SPOT	Source : Société SPOT Image/Projet ISIS (CNES) Dépôt : ULg-LGT Date : 11/05/2008 Type : XS Satellite : SPOT 5 Résolution : 10 m		- Analyse diachronique du développement de la ville ; - Calcul de l'indice de végétation - Extraction du modèle numérique de terrain ; - Courbes de niveau

SPOT_DEM_ Contour_50 m			- Délimitation des surfaces drainées vers les têtes d'incision des glissements de terrain
Carte des risques -Torrentialité - Inondation - Inondation dans le futur - Glissements de terrain			



Annexe III : Carte des risques hydrologiques de Butembo.

Annexe III.1 : La notice explicative de la carte des risques hydrologiques à Butembo

Le fond de la carte est constitué de deux images orthorectifiées de SPOT5 de 2006 et de 2008, à l'échelle de 1/25.000. La projection cartographique est en UTM Zone 35N. Cette spatiocarte est constituée d'une mosaïque de ces deux images satellitaires : SPOT5 panchromatique à 2,5 m de résolution capturée le 5 mai 2006 (nord-ouest) et le 11 mai 2008 (sud et est). La présence d'une tache de nuages vers le nord-ouest de la ville sur l'image de 2008 nous a obligé de faire cette mosaïque avec celle de 2006 qui aussi présente des nuages dans la zone centrale. Le fond SPOT5 de 2006-2008 de la carte montre le plan de la ville avec les limites de ses quatre communes. Les maisons, les routes ainsi que 314 sources géoréférencées sont bien visibles. Les valeurs de z (altitude) mesurées sur terrain ont été corrigées sur base du fichier raster de MNT issu de SPOT5. Elles sont consignées dans un tableau en annexe VIII.

Les courbes de niveau équidistantes de 20 m ont été extraites du modèle numérique de terrain provenant d'un assemblage d'images de 2006 et de 2008. Etant donné le relief de la ville, l'extension ET Surface de ArcGIS 9.3 par la fonction 3D Analyst nous a facilité le calcul de la surface topographique de l'entité urbaine qui est établie à 158,95 km².

La petite carte du relief et thalwegs met en évidence les thalwegs organisés selon l'ordre de Strahler (Strahler, 1957).

La carte des glissements et des ravines de fond de vallée ne porte pas sur un inventaire complet des glissements de terrain à Butembo. Seuls les glissements, visibles sur les photographies aériennes (5737/252 à 5737/255) couvrant seulement 48% de la superficie de l'entité urbaine dans ses limites administratives, ont été indiqués. Nous avons également préféré indiquer sur cette petite carte les ravinements de fond de vallée, situation 2008. Sur la grande carte des risques hydrologiques de Butembo, ces incisions linéaires se trouvent dans les zones de risque d'inondation. Le fond de la carte des glissements et ravines de fond de vallée est une carte des pentes.

Les risques hydrologiques :

Les inondations de 2009

- les inondations dans les fonds des vallées intervenues le 6 octobre 2009 sont indiquées en cyan. 92 ha de terres ont été inondés dans une zone habitée. La carte donne les

inondations de 2009 puisqu'il s'agissait de la plus grande inondation jamais survenue à Butembo. La pluie qui a provoqué le désastre était de 70,2.mm en 2 heures 30 minutes.

Les inondations dans l'avenir

Malgré le fait qu'il s'agissait des premières grandes inondations de la ville, une pluie pareille dont la récurrence est de 2 à 3 ans n'est donc pas vraiment exceptionnelle. On pense que la pluie seuil qui déclenche des inondations d'une ampleur comparable à celle de 2009, va devenir moins importante dans l'avenir. Avec l'urbanisation toujours croissante, les taux d'écoulement vont augmenter. En même temps, les routes et les égouts vont réaliser une connectivité plus grande. Les apports d'eau des versants vont devenir plus importants et être transférés vers les vallées en un court laps de temps. Ces crues de ruissellement vont dépasser de plus en plus la capacité d'évacuation de chaque fond de vallée. Ceci nous amène à penser que dans l'avenir, si la tendance actuelle d'urbanisation se confirme, chaque fond de vallée deviendra un endroit de risque d'inondation. C'est ainsi que nous avons indiqué chaque fond plat de vallée en bleu foncé.

Les axes routiers de torrentialité sont en réalité des routes qui par leur position topographique et par leur capacité de véhiculer les écoulements superficiels risquent de concentrer le ruissellement et de créer des problèmes de ravinement progressif aux endroits où les eaux sont relâchées. D'une part, on a indiqué les routes qui suivent la pente. D'autre part, il s'agit de routes, quasiment perpendiculaires à la pente, qui collectent, comme une corniche ou une gouttière, les eaux, venant d'une grande surface et les relâchent plus loin sur le versant. Il peut également s'agir de routes, qui par leur longueur, produisent d'importantes débits de ruissellement. Notons que ces axes routiers de torrentialité sont indiqués de manière qualitative mais que dans l'avenir, nous ferons appel à l'application du contrôle topographique.

Annexe III.2 : La carte des risques hydrologiques de Butembo, à l'échelle de 1/25.000

Annexe IV : Evolution de la population de la ville de Butembo de 1948 à 2008

Année	Population
1948	4682
1957	9653
1959	11189
1962	26065
1975	50921
1979	69227
1983	79146
1987	92932
1997	141707
1999	332083
2000	405172
2001	424850
2002	443190
2003	492510
2004	521233
2005	527684
2006	539277
2007	555603
2008	581449

Evolution de la population (Suite)

Année 1999

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/1999
Bulengera	23377	25874	21070	22350	92671
Kimemi	19804	19376	19503	25390	84073
Mususa	27710	29554	18970	19639	95873
Vulamba	20067	20178	9578	9643	59466
Total/1999	90958	94982	69121	77022	332083

Année 2000

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2000
Bulengera	29533	31150	20544	22128	103355
Kimemi	24152	27991	24123	31747	108013
Mususa	38033	39321	27947	28661	133962
Vulamba	20134	20370	9626	9712	59842
Total/2000	111852	118832	82240	92248	405172

Année 2001

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2001
Bulengera	30311	31945	25194	27214	114664
Kimemi	25897	30680	26159	30440	113176
Mususa	38229	39577	29096	29920	136822
Vulamba	20203	20460	9690	9835	60188
Total/2001	114640	122662	90139	97409	424850

Année 2002

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2002
Bulengera	34501	37497	26708	28685	127391
Kimemi	28247	31627	25729	30813	116416
Mususa	38645	39978	29496	30262	138381
Vulamba	20404	20725	9822	10051	61002
Total/2002	121797	129827	91755	99811	443190

Année 2003

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2003
Bulengera	35995	38045	31113	32953	138106
Kimemi	36798	41147	29284	34585	141814
Mususa	42398	43911	32030	32078	150417
Vulamba	20683	21167	10030	10293	62173
Total/2003	135874	144270	102457	109909	492510

Année 2004

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2004
Bulengera	37920	40568	34305	36378	149171
Kimemi	39329	43204	31096	37151	150780
Mususa	43663	46583	31905	34120	156271
Vulamba	21416	21930	10621	11044	65011
Total/2004	142328	152285	107927	118693	521233

Année 2005

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2005
Bulengera	34944	40639	34456	36593	146632
Kimemi	39919	43535	31405	37476	152335
Mususa	44105	47218	32265	34525	158113
Vulamba	22003	22631	11290	11680	67604
Total/2005	140971	154023	109416	120274	524684

Année 2005

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2005
Bulengera	34944	40639	34456	36593	146632
Kimemi	39919	43535	31405	37476	152335
Mususa	44105	47218	32265	34525	158113
Vulamba	22003	22631	11290	11680	67604
Total/2005	140971	154023	109416	120274	524684

Evolution de la population (suite)

Année 2006

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2006
Bulengera	38960	41991	35902	38221	155074
Kimemi	40563	44101	31813	35859	152336
Mususa	44398	47613	32569	34911	159491
Vulamba	22781	23377	11942	12276	70376
Total/2006	146702	157082	112226	121267	537277

Année 2007

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2007
Bulengera	40812	44092	38981	41628	165513
Kimemi	40650	44219	32811	38781	156461
Mususa	44867	48257	33006	35331	161461
Vulamba	23156	23731	12433	12848	72168
Total/2007	149485	160299	117231	128588	555603

Année 2008

COMMUNE	Hommes	Femmes	Garçons	Filles	Total/2008
Bulengera	41886	45354	40962	43842	172044
Kimemi	41497	45106	34273	40107	160983
Mususa	46008	49374	33602	35805	164789
Vulamba	32275	24094	13330	13934	83633
Total/2008	161666	163928	122167	133688	581449

Annexe V : Evolution du débit des sources le long des zones ravinées au niveau des dambos de la Wayimirya et de Kimemi entre 2002 et 2009.

1. Période allant du mois de mai 2002 au mois de avril 2003

Débit [l/s] pour la période allant de mai 2002 au mois d'avril 2003									
N°	Source	M	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	Moyenne
1	Masimasi	0,12	0,09	0,11	0,09	0,12	0,08	0,13	0,106
2	Lyabo	0,12	0,08	0,16	0,09	0,13	0,06	0,14	0,111
3	Kahumba	0,13	0,09	0,15	0,11	0,11	0,08	0,15	0,117
4	Vulema	0,13	0,07	0,14	0,06	0,11	0,06	0,15	0,103
5	Dolo	0,08	0,06	0,09	0,04	0,08	0,05	0,09	0,070
6	Kasima	0,09	0,09	0,18	0,07	0,12	0,07	0,11	0,104
7	Kapalata	0,1	0,08	0,13	0,08	0,11	0,07	0,11	0,097
8	Vutetse_Wayimirya	0,07	0,06	0,08	0,05	0,06	0,06	0,09	0,067
9	Alliance	0,08	0,05	0,09	0,06	0,07	0,05	0,08	0,069
10	Vitsai	0,06	0,04	0,08	0,04	0,05	0,06	0,09	0,060
11	Kanyangungu	0,08	0,05	0,07	0,04	0,11	0,1	0,13	0,083

2. Période allant du mois de décembre 2007 au mois de novembre 2009

Débit [l/s] pour la période allant de décembre 2007 à novembre 2009														
N°	Source	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	Moyenne
1	Masimasi	0,09	0,14	0,08	0,15	0,08	0,16	0,11	0,13	0,09	0,13	0,09	0,14	0,116
2	Lyabo	0,09	0,12	0,11	0,13	0,09	0,14	0,08	0,13	0,08	0,12	0,09	0,15	0,111
3	Kahumba	0,09	0,14	0,1	0,15	0,09	0,15	0,12	0,16	0,11	0,11	0,09	0,13	0,120
4	Vulema	0,06	0,07	0,06	0,11	0,06	0,07	0,05	0,12	0,09	0,11	0,11	0,14	0,088
5	Dolo	0,05	0,06	0,04	0,09	0,06	0,06	0,04	0,08	0,05	0,06	0,06	0,09	0,062
6	Kasima	0,06	0,07	0,07	0,09	0,05	0,09	0,06	0,14	0,06	0,12	0,08	0,12	0,084
7	Kapalata	0,07	0,08	0,08	0,13	0,06	0,09	0,07	0,13	0,08	0,09	0,04	0,12	0,087
8	Vutetse_Wayimirya	0,03	0,05	0,03	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,06	0,04	0,06	0,039
9	Alliance	0,07	0,08	0,06	0,09	0,05	0,07	0,05	0,08	0,04	0,05	0,04	0,05	0,061
10	Vitsai	0,08	0,09	0,05	0,08	0,05	0,06	0,04	0,07	0,06	0,13	0,09	0,13	0,078
11	Kanyangungu	0,04	0,06	0,07	0,09	0,06	0,09	0,08	0,12	0,06	0,14	0,12	0,16	0,091

Les mois de janvier (J), février (F), mars (M), avril (A), mai (M), juin (J), juillet (J), août (A), septembre (S), octobre (O), novembre (N), décembre (D) sont regroupées en période de 3 mois chacune en fonction des périodes pluvieuses (SON) et (MAM) ainsi que les périodes moins arrosées (JJA) et (DJF).

3. Evolution du débit entre les périodes 1 et 2, soit deux périodes dont la première va du mois de mai 2002 au mois d'avril 2003 et la deuxième, du mois de décembre 2007 au mois de novembre 2009.

N°	Source	distance relative	évolution débit entre 2002 et 2009
1	Masimasi	0,71	-0,010
2	Lyabo	0,67	0,000
3	Kahumba	0,77	-0,003
4	Vulema	0,99	0,015
5	Dolo	0,78	0,008
6	Kasima	0,79	0,020
7	Kapalata	0,87	0,010
8	Vutetse Wayimirya	0,98	0,028
9	Alliance	0,59	0,008
10	Vitsaï	0,50	-0,018
11	Kanyangungu	0,50	-0,008

Annexe VI: Profondeur de l'eau dans les puits pour la période 2002-2003

Puits	Dist_rav. [m]	Prof.Puits [m]	DJF2	MAM2	JJA2	SON2	DJF3	MAM3	JJA3	SON3	Moyenne
1	16,5	3,8	2	1,86	1,82	1,31	1,85	1,29	1,94	1,2	1,65875
2	19,4	3	2,27	1,28	2,17	1,29	2	1,29	1,98	1,1	1,6725
3	70	4	2,48	2,3	2,55	2,56	2,63	2,38	2,57	2,13	2,45
4	3,9	3,7	2,13	1,64	2,34	1,34	1,76	1,37	2,1	1,46	1,7675
5	428	5	1,4	1,1	1,3	0,77	1,1	0,63	1,21	0,37	0,985
6	140	3,2	1,22	0,67	0,75	0,66	0,54	0,32	0,66	0,38	0,65
7	65,2	5	0,89	0,65	0,98	0,65	0,91	0,58	0,91	0,51	0,76
8	26	4,2	1,94	1,43	1,89	1,35	1,89	1,29	2,1	1,19	1,635
9	65	3,6	1,57	1,76	1,65	0,56	1,2	0,67	1,1	0,75	1,1575
10	81	3,8	1,75	1,31	1,77	1,35	1,74	1,24	1,65	1,25	1,5075
11	312	4,4	1,78	1,23	1,54	1,1	1,43	1,2	1,38	0,62	1,285
12	33	4,3	1,45	1,21	1,47	1,1	1,32	1,24	1,67	1,22	1,335
13	152	4,5	1,72	1,34	1,77	1,24	1,7	1,16	1,79	1,28	1,5
14	58	5,85	1,67	1,56	1,88	0,66	1,68	1,16	1,76	0,75	1,39
15	32	4,2	1,44	0,82	1,55	0,89	1,37	1,45	1,54	0,98	1,255
16	60	3,8	1,63	1,43	1,64	0,89	1,57	0,91	1,31	0,86	1,28
17	8	3,7	1,92	1,21	1,81	0,87	1,94	0,74	1,36	0,43	1,285
18	50	4	1,71	1,03	1,88	0,96	1,77	1,45	1,67	0,97	1,43
19	200	4	0,86	0,65	0,98	0,55	0,72	0,78	0,98	0,42	0,7425
20	242,5	3,4	1,71	1,55	1,54	1,48	1,94	1,15	1,87	1,44	1,585
21	185	3,8	1,87	1,25	1,72	0,82	1,42	1,11	1,56	1,35	1,3875
22	58	3,3	2,28	1,61	2,45	1,78	2,43	1,56	2,87	1,38	2,045
23	117	3	1,45	1,47	1,74	1,1	1,69	1,23	1,79	0,93	1,425
24	148	3	1,93	1,18	2,11	0,71	1,81	1,3	2,14	0,66	1,48
25	177	5,4	1,48	1,26	1,46	1,13	1,11	0,97	1,23	0,76	1,175
26	155	3,5	1,23	0,87	1,22	0,61	1,26	1,14	1,59	0,62	1,0675
27	313	3	1,28	0,85	1,15	0,69	1,22	1,12	1,57	0,46	1,0425
28	40	3,6	1,62	0,78	1,14	0,85	1,56	1,13	1,55	1,25	1,235
29	105	3,5	1,68	1,56	1,71	1,23	1,87	1,49	1,25	1,15	1,4925
30	131	6	1,78	1,22	1,76	1,11	1,33	1,67	1,97	0,98	1,4775
31	75	4	1,94	1,32	1,45	1,22	1,77	1,13	1,62	0,95	1,425

Annexe VII: Profondeur de l'eau dans les puits pour la période 2008-2009

Puits	Dist_rav	Prof_Puits	JF08	MAM08	JJA08	SON08	DJF09	MAM09	JJA09	SON09	Moyenne
1	16,5	3,8	2,71	1,91	2,53	2,41	2,5	2,1	2,33	1,99	2,31
2	19,4	3	1,88	2,11	2,35	1,86	2,36	2,23	2,31	1,52	2,0775
3	70	4	2,69	2,57	2,78	2,51	2,67	2,58	2,74	2,66	2,65
4	3,9	3,7	1,76	1,49	2,46	2,3	2,68	1,72	2,41	1,86	2,085
5	428	5	1,3	0,92	1,52	0,88	1,42	0,95	1,32	0,85	1,145
6	140	3,2	0,91	0,65	0,93	0,71	1,2	0,87	1,2	0,81	0,91
7	65,2	5	1,2	0,93	1,1	0,74	0,97	0,76	0,92	0,58	0,9
8	26	4,2	2,3	2,21	2,45	1,55	2,61	1,79	2,2	1,43	2,0675
9	65	3,6	1,68	1,23	1,43	1,32	1,55	1,34	1,11	1,12	1,3475
10	81	3,8	2,52	2,3	2,1	1,32	1,87	1,48	1,89	1,42	1,8625
11	312	4,4	1,39	1,29	1,77	1,61	1,87	1,44	1,89	1,42	1,585
12	33	4,3	1,73	1,39	1,74	1,65	2,2	1,57	1,91	1,35	1,6925
13	152	4,5	1,71	1,56	2,2	1,67	1,87	1,36	1,98	1,53	1,735
14	58	5,85	1,69	1,33	1,78	1,55	2,3	1,44	2,4	1,25	1,7175
15	32	4,2	1,82	1,4	1,75	1,22	1,67	1,21	1,65	1,12	1,48
16	60	3,8	1,88	1,25	1,82	1,41	1,65	1,21	1,54	0,84	1,45
17	8	3,7	1,97	1,42	1,88	1,19	1,95	1,12	1,74	0,97	1,53
18	50	4	1,98	1,38	1,88	1,48	1,86	1,38	1,87	1,41	1,655
19	200	4	0,78	0,62	0,84	0,55	0,67	0,51	0,78	0,49	0,655
20	242,5	3,4	1,97	1,15	1,96	1,44	1,91	1,39	1,89	0,97	1,585
21	185	3,8	1,76	1,24	1,38	1,1	1,78	1,12	1,59	0,87	1,355
22	58	3,3	2,41	2,21	2,84	1,82	2,68	1,92	2,69	1,29	2,2325
23	117	3	2,1	1,1	1,57	1,23	1,79	0,87	1,87	0,67	1,4
24	148	3	1,57	0,88	1,66	0,65	1,22	1,18	1,97	0,65	1,2225
25	177	5,4	1,53	1,1	1,61	0,72	1,22	0,89	1,48	0,73	1,16
26	155	3,5	1,1	0,87	1,28	0,63	1,36	0,98	1,48	0,56	1,0325
27	313	3	0,88	0,56	1,64	0,88	1,12	0,56	1,16	0,62	0,9275
28	40	3,6	1,97	1,48	1,89	1,45	1,86	1,54	2,12	1,55	1,7325
29	105	3,5	1,87	1,43	1,87	1,95	1,64	1,79	1,92	1,33	1,725
30	131	6	1,79	1,84	1,54	1,63	1,92	1,76	1,95	1,67	1,7625
31	75	4	1,71	1,21	1,69	1,12	1,67	1,45	1,75	1,12	1,465

Annexe : Evolution du niveau de l'eau dans les puits

Puits	(A) Distance du chenal	(B) Distance chenal/ base colline	Moy_2002- 2003	Moy_2008- 2009	A/B	Evolution du niveau d'eau
1	16,8	100,1	1,65	2,30	0,17	-0,65
2	22,2	33,7	1,6725	2,0775	0,66	-0,41
3	70	95,6	2,45	2,65	0,73	-0,20
4	28	118	1,7675	2,085	0,24	-0,32
5	434,1	446,5	0,985	1,145	0,97	-0,16
6	316,9	354	0,65	0,91	0,90	-0,26
7	248	438	0,76	0,9	0,57	-0,14
8	27	49	1,635	2,0675	0,55	-0,43
9	63,8	69	1,1575	1,3475	0,92	-0,19
10	23,2	61	1,5075	1,8625	0,38	-0,36
11	17,9	62,4	1,285	1,585	0,29	-0,30
12	36	121	1,335	1,6925	0,30	-0,36
13	22,2	38	1,5	1,735	0,58	-0,24
14	50,5	118,2	1,39	1,7175	0,43	-0,33
15	32,5	123	1,255	1,48	0,26	-0,23
16	73	124	1,28	1,45	0,59	-0,17
17	76	148	1,285	1,53	0,51	-0,25
18	83,3	115	1,43	1,655	0,72	-0,23
19	156	160	0,7425	0,655	0,98	0,09
20	55,8	76	1,585	1,585	0,73	0,00
21	117	130	1,3875	1,355	0,90	0,03
22	134	134	2,045	2,2325	1,00	-0,19
23	116,9	122	1,425	1,4	0,96	0,03
24	181,7	199,7	1,48	1,2225	0,91	0,26
25	215	215	1,1575	1,16	1,00	0,00
26	215	218	1,0675	1,0325	0,99	0,03
27	170,9	174,9	1,0425	0,9275	0,98	0,12
28	66	200	1,235	1,7325	0,33	-0,50
29	62	145	1,4925	1,725	0,43	-0,23
30	38	159	1,4775	1,7625	0,24	-0,29
31	75	76	1,425	1,465	0,99	-0,04

Annexe VIII : Les sources de la ville de Butembo

No	COMMUNE	SOURCE	QUARTIER	CELLULE	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE [m]	X [UTM]	Y [UTM]	RASTER VALUE [m]
1	Bulenger	ALLIANCE	FURU	VIHYA	00°09,245	029°17,647	1625	755345,527	17044,591	1688
2	Bulenger	KASANGA	MIHAKE	MIHAKE	00°09,465	029°17,963	1640	755932,003	17450,260	1705
3	Bulenger	NDUIRO I	MIHAKE	NDUIRO	00°09,558	029°17,959	1641	755924,559	17621,720	1709
4	Bulenger	NDUIRO II	MIHAKE	NDUIRO	00°09,573	029°17,947	1642	755902,283	17649,373	1706
5	Bulenger	KIMOTEUR	KALEMIRE	HANGI B	00°09,268	029°17,014	1645	754170,632	17086,869	1727
6	Bulenger	LYABO	KALEMIRE	HANGI LYAMBO	00°09,137	029°17,982	1641	755967,334	16845,543	1709
7	Bulenger	KAPALATA	KALEMIRE	HANGI B	00°09,169	029°17,870	1633	755759,447	16904,518	1696
8	Bulenger	KASIMA	KALEMIRE	HANGI	00°09,168	029°17,851	1631	755724,181	16902,670	1695
9	Bulenger	DOLO	MUKALANGIRWA KALEMIRE	MUKALANGIRWA	00°09,189	029°17,734	1628	755507,016	16941,364	1686
10	Bulenger	VUTAYERE	KALEMIRE	KAVANGO	00°08,832	029°18,260	1645	756483,384	16283,279	1706
11	Bulenger	MAKERERE	KALEMIRE	MAKERERE	00°08,787	029°17,835	1632	755694,558	16200,233	1694
12	Bulenger	KILALITE	KALEMIRE MUHAYIRWA	MUHAYIRWA REBOISEMENT	00°08,777	029°17,795	1636	755620,316	16181,789	1694
13	Bulenger	MUKONDO I	KALEMIRE KFT	KITAMBALA REBOISEMENT	00°08,964	029°18,389	1656	756722,794	16526,669	1738
14	Bulenger	MUKONDO II	KALEMIRE KFT	KITAMBALA	00°09,032	029°18,609	1664	757131,122	16652,081	1716
15	Bulenger	KIBWA	MUCHANGA	KIBWA	00°09,279	029°18,766	1667	757422,480	17107,501	1720
16	Bulenger	VISIKA I	VISIKA	MUKONDO	00°09,304	029°18,609	1674	757131,068	17153,561	1734
17	Bulenger	VISIKA II	VISIKA	KVALE	00°09,305	029°18,610	1683	757132,924	17155,405	1734
18	Bulenger	NURU I	KATAMBI	VUHIRA	00°09,522	029°18,999	1682	757854,902	17555,564	1735
19	Bulenger	NURU II	NURU	KATAMBI	00°09,552	029°18,055	1680	756102,744	17610,678	1732
20	Bulenger	VUHIRA	VUHIRA	VUHIRA	00°09,803	029°18,209	1686	756388,529	18073,470	1759
21	Bulenger	MAVONO MESSO	KAMSONGE	VUHIRA	00°09,148	029°19,383	1633	758567,723	16866,103	1810
22	Bulenger	CUGEKI	LONDO EVECHE	LONDO	00°09,398	029°17,775	1706	755583,073	17326,697	1694
23	Bulenger	VISSO	VUNGI MUTIRI	VISSO	00°07,821	029°18,322	1713	756598,644	14419,341	1712
24	Bulenger	KIHUMULIRE I	VUNGI MUTIRI	KIHUMULIRE	00°07,988	029°18,388	1713	756721,117	14727,245	1730
25	Bulenger	VATOLIA	MUTIRI	VATOLIA CONCESSION	00°07,998	029°18,375	1711	756696,986	14745,680	1724
26	Bulenger	SAMALIRA I	NGOTE	MWEMBO	00°08,431	029°18,524	1730	756973,467	15544,017	1716

27	Bulenger	SAMALIRA II	NGOTE	NGOTE I	00°08,239	029°18,879	1732	757632,417	15190,095	1737
28	Bulenger	KAZINGUFU	NGOTE	NGOTE II CONCESSION	00°08,209	029°18,887	1729	757647,271	15134,786	1738
29	Bulenger	MWEMBO	NGOTE	MWEMBO	00°08,177	029°18,990	1731	757838,455	15075,806	1741
30	Bulenger	KIHATE	SABA	KIHATE	00°08,329	029°18,990	1722	757838,428	15356,046	1731
31	Bulenger	VUTARA A	MUKUNA	VUTARA I	00°08,433	029°18,860	1734	757597,116	15547,766	1721
32	Bulenger	VUTARA B	MUKUNA	VUTARA II	00°07,817	029°18,921	1735	757710,446	14412,068	1728
33	Bulenger	KATOGHOTA	KIHANGA	KATOGHOTA	00°07,835	029°18,945	1733	757754,990	14445,259	1728
34	Bulenger	KASANGA	KYAHALI	KASANGA	00°07,650	029°18,760	1736	757411,642	14104,146	1724
35	Bulenger	KASALALA	KYAHALI	KASANGA	00°07,638	029°18,865	1736	757606,534	14082,040	1726
36	Bulenger	BAOBAB KAHONDO	RUGHENDA	KAHONDO	00°07,612	029°18,838	1747	757556,424	14034,100	1721
37	Bulenger	KALEVERYO	RUGHENDA	KALEVERYO	00°06,564	029°18,763	1751	757417,377	12101,911	1723
38	Bulenger	KAKOHWA	RUGHENDA	MAKOMA I	00°06,443	029°19,178	1762	758187,678	11878,884	1730
39	Bulenger	KUMBAGHALYA	RUGHENDA	MAKOMA II	00°05,906	029°19,361	1799	758527,419	10888,847	1811
40	Bulenger	VUNYURURU	RUGHENDA	VUNYURURU	00°05,922	029°19,527	1815	758835,533	10918,368	1856
41	Bulenger	MUNGA	IVATAMA	VIHULI	00°06,024	029°19,644	1788	759052,685	11106,440	1806
42	Bulenger	VIHULI I	KIRIVATA	VUSIGHA	00°06,149	029°19,562	1772	758900,467	11336,892	1766
43	Bulenger	VIHULI II	KIRIVATA	VUSIGHA	00°06,273	029°19,649	1791	759061,933	11565,522	1752
44	Bulenger	VIHULI III	KIRIVATA	VIHULI	00°06,353	029°19,735	1784	759221,548	11713,030	1786
45	Bulenger	KADUNGU	RUGHENDA	KADUNGU	00°06,273	029°19,200	1765	758228,536	11565,460	1753
46	Bulenger	VUTAKIRA	KYAGHALA	VUTAHIRA	00°06,326	029°19,303	1764	758419,709	11663,190	1736
47	Bulenger	KANUNGA	RUGHENDA	KYATUHE	00°06,529	029°19,116	1755	758072,587	12037,433	1743
48	Bulenger	ISHANGO	MALERA	ISHANGO	00°06,722	029°19,247	1749	758315,710	12393,283	1750
49	Bulenger	KAVERAMUKA	MALERA	VUTARANGYA	00°07,326	029°19,365	1750	758534,639	13506,891	1722
50	Bulenger	MALERA	MALERA	VUTARANGYA	00°07,341	029°19,698	1763	759152,724	13534,600	1770
51	Bulenger	KALIVWA I	KASESA	PEREGHESE	00°07,585	029°19,755	1766	759258,483	13984,472	1739
52	Bulenger	KALIVWA II	KASESA	PEREGHESE	00°07,404	029°19,736	1764	759223,246	13650,759	1738
53	Bulenger	KATERO I	KASESA	MUKUNGU	00°07,388	029°19,746	1777	759241,810	13621,262	1744
54	Bulenger	KATERO II	KASESA	KATERO	00°07,177	029°19,836	1776	759408,895	13232,255	1745
55	Bulenger	KAVIGHANGO	KASESA	KAVIGHANGO	00°07,160	029°19,495	1765	758775,960	13200,859	1767
56	Bulenger	KAGHULUGHULU	VUTAHIRA	KAGHULUGHULU	00°06,989	029°19,445	1771	758683,181	12885,579	1728

57	Bulenger	KASINGIRI	VUTAHIRA	KASINGIRI	00°06,756	029°19,481	1767	758750,036	12456,004	1740
58	Bulenger	KALANGIRI	RUGHENDA	KYATUHE	00°06,746	029°19,965	1760	759648,401	12437,638	1801
59	Bulenger	BUTARANGYA	MALERA	BUTARANGYA	00°06,771	029°19,375	1749	758553,285	12483,643	1752
60	Bulenger	BUKUMA A	MUKUNA	BUKUMA	00°07,648	029°19,386	1754	758573,565	14100,564	1757
61	Bulenger	BUKUMA B	MUKUNA	BUKUMA	00°07,956	029°19,741	1785	759232,435	14668,483	1786
62	Bulenger	MAKATA	MUKUNA	MAKANGALA	00°07,979	029°19,558	1822	758892,761	14710,856	1745
63	Bulenger	SIMBA I	KIMBULU	VULAMBAYIRI	00°08,313	029°19,473	1844	758734,932	15326,635	1820
64	Bulenger	SIMBA II	KIMBULU	VULAMBAYIRI	00°08,472	029°19,384	1838	758569,708	15619,766	1838
65	Bulenger	SIMBA III	KIMBULU	VULAMBAYIRI	00°08,480	029°19,421	1842	758638,383	15634,523	1826
66	Bulenger	MAKANGALA	NGOTE	VULAMBAYIRI	00°08,459	029°19,428	1818	758651,380	15595,806	1837
67	Bulenger	VULAMBAYIRI	NGOTE	VULAMBAYIRI	00°08,257	029°19,412	1820	758621,719	15223,377	1778
68	Bulenger	KIMASA	NGOTE/ MUKUNA	NGOTE	00°08,280	029°19,292	1792	758398,981	15265,761	1804
69	Bulenger	KISINGIRI	VUNGI/ KISINGIRI	KISINGIRI	00°08,159	029°18,512	1713	756951,243	15042,535	1739
70	Bulenger	VULAMBAYIRI	SABA	VULAMBAYIRI	00°07,654	029°19,233	1765	758289,579	14111,600	1730
71	Bulenger	TSEGHE	SABA	SABA	00°08,452	029°19,223	1748	758270,878	15582,863	1772
72	Bulenger	NGESE I	NGESE/ WAYENE	NGESE	00°08,573	029°19,424	1793	758643,934	15805,987	1841
73	Bulenger	NGESE II	WAYENE/ SABA	SABA	00°08,681	029°19,205	1750	758237,426	16005,064	1813
74	Bulenger	KALENGERE I	SABA	KALENGERE A	00°08,727	029°19,273	1758	758363,632	16089,887	1847
75	Bulenger	KAVANDA	SABA	KALENGERE B	00°08,825	029°19,169	1761	758170,578	16270,548	1775
76	Bulenger	KISIMA VOHATAKWA	KIMBULU	KIHYANA	00°08,820	029°18,917	1712	757702,841	16261,281	1717
77	Bulenger	MOVULYA	KIMBULU	KALENGERE	00°08,832	029°19,411	1773	758619,756	16283,501	1842
78	Bulenger	KALENGERE II	KIMBULU	KALENGERE C	00°08,966	029°19,171	1728	758174,263	16530,509	1771
79	Bulenger	IVATAMA	KIMBULU	IVATAMA	00°09,014	029°19,151	1721	758137,132	16619,002	1745
80	Bulenger	NGWANGWA WAYENE	MUCHANGA	WAYENE	00°09,204	029°19,476	1726	758740,330	16969,368	1776
81	Bulenger	VURUMBIKA	MUCHANGA	WAYENE	00°09,314	029°19,370	1745	758543,560	17172,153	1743
82	Bulenger	MUMOLE	MAKERERE	LYAMBO	00°09,320	029°18,450	1750	756835,946	17183,028	1801
83	Bulenger	KALUMELA	AUBERGE	KYAVUYRI B	00°09,419	029°17,974	1728	755952,429	17365,454	1722
84	Bulenger	KAFULU I	MIHAKE	KANGOTE	00°08,554	029°18,328	1708	756609,651	15770,752	1722
85	Bulenger	VUSYANO I	MIHAKE	VUSYANO A	00°10,225	029°18,327	1732	756607,456	18851,524	1702
86	Bulenger	VUSYANO II	MIHAKE	VUSYANO B	00°09,797	029°18,375	1745	756696,640	18062,444	1732

87	Bulenger	BIASSA I	MIHAKE	BIASSA	00°09,797	029°17,816	1734	755659,090	18062,325	1715
88	Bulenger	BIASSA II	MIHAKE	USINE ABC	00°09,819	029°17,725	1741	755490,183	18102,866	1687
89	Bulenger	KIVISIRE	KALEMIRE	KIVISIRE	00°09,615	029°18,220	1770	756408,985	17726,863	1780
90	Bulenger	KAFULU II	MIHAKE	KANGOTE	00°09,380	029°18,389	1741	756722,712	17293,636	1775
91	Bulenger	BORNE BF 40	RUGHENDA	KAHONDO	00°10,060	029°18,737	1667	757368,489	18547,409	1785
92	Bulenger	BORNE BF 41	RUGHENDA	KAHONDO	00°06,644	029°18,790	1694	757467,481	12249,409	1737
93	Bulenger	LEPROSERIE KAVONDO	RUGHENDA	MAKOMO	00°06,710	029°18,944	1678	757753,311	12371,115	1743
94	Bulenger	KALIVA	RUGHENDA	MAKOMO	00°05,654	029°19,267	1713	758352,976	10424,225	1764
95	Bulenger	KITAKONDWA I	RUGHENDA	MAKOMO	00°05,656	029°19,299	1716	758412,371	10427,916	1766
96	Bulenger	KITAKONDWA II	RUGHENDA	MAKOMO	00°06,710	029°19,397	1746	758594,129	12371,181	1758
97	Bulenger	MAKOMO	RUGHENDA	MAKOMO	00°06,704	029°19,605	1776	758980,202	12360,150	1758
98	Bulenger	MUTITIRO I	RUGHENDA	MUTITIRO	00°05,651	029°19,576	1778	758926,517	10418,732	1804
99	Bulenger	MUTITIRO II	RUGHENDA	MUTITIRO	00°05,560	029°19,518	1765	758818,873	10250,949	1800
100	Bulenger	MBURUGHUTI	RUGHENDA	MAKOMO	00°05,647	029°19,761	1808	759269,900	10411,380	1859
101	Bulenger	KATOGHOLO	KIRIVATA	KIRIVATA	00°06,495	029°20,210	1841	760103,189	11974,903	1831
102	Bulenger	MULAMO I	KYAGHALA	MULAMO	00°07,009	029°20,314	1851	760296,151	12922,587	1836
103	Bulenger	MULAMO II	KYAGHALA	MULAMO	00°06,993	029°20,358	1854	760377,823	12893,094	1838
104	Bulenger	CHAVUTI	KYAGHALA	KIRIVATA	00°06,745	029°20,487	1862	760617,303	12435,872	1846
105	Bulenger	VUHAMBO	KYAGHALA	VUHAMBO	00°06,704	029°20,263	1862	760201,534	12360,247	1840
106	Bulenger	MULEMYA	KYAGHALA	MULEMYA	00°07,075	029°20,484	1847	760611,684	13044,298	1829
107	Bulenger	VULETSE	KYAGHALA	VULETSE	00°07,298	029°20,225	1808	760130,910	13455,406	1777
108	Bulenger	KYAGHALA	KYAGHALA	BOUTIQUE	00°07,480	029°20,441	1799	760531,806	13790,997	1767
109	Bulenger	VUGHULA TERRAIN	KYAGHALA	KIHONDO	00°07,775	029°20,223	1841	760127,119	14334,856	1812
110	Bulenger	KIHONDO	KYAGHALA	KIHONDO	00°07,946	029°20,183	1841	760052,844	14650,123	1805
111	Bulenger	VUROMO I	KYAGHALA	VUROMO	00°08,108	029°20,046	1768	759798,526	14948,780	1811
112	Bulenger	VUROMO II	KYAGHALA	VUROMO	00°08,035	029°20,127	1768	759948,885	14814,204	1804
113	Kimemi	MUYALI	LUMUMBA	AV BULENGIA	00°08,094	029°17,055	1646	754246,948	14922,441	1729
114	Kimemi	KAVITERO I	LUMUMBA	KAVITERO	00°08,361	029°16,770	1696	753717,924	15414,642	1772
115	Kimemi	KAVITERO II	LUMUMBA	KAVITERO	00°08,405	029°16,697	1706	753582,424	15495,749	1795
116	Kimemi	KAVITERO II	LUMUMBA	KAVITERO	00°08,444	029°16,480	1726	753179,654	15567,611	1862

117	Kimemi	KIBOTINE	LUMUMBA	MUNZAMBAYE	00°08,233	029°16,500	1723	753216,813	15178,609	1800
118	Kimemi	SAHANI	MUNZAMBAYE	MUNZAMBAYE	00°08,173	029°16,557	1704	753322,618	15068,001	1781
119	Kimemi	MUNZAMBAYE	CONCESSION ITAV	ITAV	00°08,014	029°16,751	1663	753682,720	14774,897	1735
120	Kimemi	KAMBIRI I	MUNZAMBAYE	KAMBIRI	00°07,882	029°16,744	1650	753669,750	14531,536	1723
121	Kimemi	VUTSUNDO	MANGUREJIPA	VUTSUNDO A	00°07,791	029°16,726	1642	753636,356	14363,762	1716
122	Kimemi	KAMBIRI II	CONCESSION ITAV	ITAV	00°07,808	029°16,768	1649	753714,308	14395,111	1714
123	Kimemi	VUTSUNDO A	MANGUREJIPA	ITAV	00°07,546	029°16,848	1632	753862,835	13912,091	1703
124	Kimemi	VUTSUNDO B	MANGUREJIPA	ITAV	00°07,569	029°16,853	1634	753872,112	13954,496	1704
125	Kimemi	KABWE/ ITAV	MANGUREJIPA	VUTSUNDO	00°07,305	029°16,677	1626	753545,488	13467,748	1690
126	Kimemi	NYOKA	CONCESSION ITAV	KATSYA ITAV	00°06,961	029°16,694	1630	753577,093	12833,540	1675
127	Kimemi	KIRERE	MATANDA	KITSANGA ITAV	00°07,620	029°17,154	1666	754430,778	14048,571	1711
128	Kimemi	BETON	MATANDA	ITAV	00°07,636	029°17,162	1668	754445,624	14078,070	1712
129	Kimemi	KATIYO	MATANDA	ITAV	00°07,656	029°17,176	1671	754471,606	14114,946	1714
130	Kimemi	KACHINI	MATANDA	ITAV TSAKATSAKA	00°07,641	029°17,175	1667	754469,752	14087,291	1712
131	Kimemi	KASEGHESEGHE	MUNZAMBAYE	MUNZAMBAYE	00°07,892	029°16,623	1733	753445,166	14549,952	1727
132	Kimemi	KAHUNGU	MUNZAMBAYE	MUNZAMBAYE	00°07,866	029°16,585	1739	753374,640	14502,011	1737
133	Kimemi	KIHOKO	MUNZAMBAYE	LULUMA	00°07,915	029°16,519	1764	753252,132	14592,338	1762
134	Kimemi	LULUMA	VUTSUNDO A	VUTSUNDO LULUMA	00°07,872	029°16,307	1800	752858,657	14513,026	1801
135	Kimemi	VUHIRA	MUKONZO	NGERE	00°08,001	029°16,252	1829	752756,553	14750,844	1831
136	Kimemi	NGERE	MUKONZO	NGERE	00°08,101	029°16,218	1856	752693,430	14935,201	1853
137	Kimemi	KASANGA	VUTSUNDO VULAMBA	NGERE MUKOTSI	00°08,224	029°16,115	1893	752502,237	15161,949	1888
138	Kimemi	VUSUBILI	VUTSUNDO	KARUSERU	00°08,057	029°15,843	1890	751997,423	14854,017	1881
139	Kimemi	KARUSERU	VUTSUNDO	KARUSERU	00°08,101	029°15,847	1895	752004,839	14935,137	1888
140	Kimemi	VULAMBA	VUTSUNDO VULAMBA	VUHIRA	00°07,986	029°15,835	1870	751982,587	14723,119	1854
141	Kimemi	KANUNGA ROMAIN	VULAMBA	VUTEGHE	00°07,913	029°15,913	1826	752127,370	14588,548	1817
142	Kimemi	KIHARO VUTEGHE	MANGUREJIPA	VUTEGHE	00°07,766	029°15,905	1796	752112,546	14317,535	1776
143	Kimemi	VUTEGHE EGLISE	MANGUREJIPA	VUTEGHE	00°07,782	029°16,243	1818	752739,885	14347,089	1780
144	Kimemi	KANUNGA VUTSUNDO	MANGUREJIPA	CONCESSION CECA	00°07,636	029°16,346	1779	752931,082	14077,936	1747
145	Kimemi	VUTULA	MANGUREJIPA	VUTULA	00°07,490	029°16,321	1750	752884,704	13808,763	1710
146	Kimemi	LUKA	MANGUREJIPA	VUTEGHE	00°07,578	029°16,141	1737	752550,602	13970,973	1726

147	Kimemi	PIGNET	MANGUREJIPA	VUTEGHE	00°07,649	029°16,029	1752	752342,714	14101,852	1741
148	Kimemi	VUGHESI	CONCESSION UCG	VUHESI	00°07,181	029°16,062	1731	752404,037	13239,042	1725
149	Kimemi	VUGHESI I KATOOGHONGA	CONCESSION UCG	VUHESI	00°07,093	029°16,069	1732	752417,043	13076,805	1711
150	Kimemi	VUGHESI II	CONCESSION UCG	VUHESI	00°07,076	029°16,061	1734	752402,197	13045,462	1712
151	Kimemi	KANUNGA VUGHESI	MANGUREJIPA	VUHESI	00°06,980	029°16,072	1716	752422,628	12868,476	1695
152	Kimemi	NON EXPLOITEE	MANGUREJIPA	VUHESI	00°06,956	029°16,069	1715	752417,063	12824,229	1692
153	Kimemi	KIHARO	VUTATIMBWA	MAJENGO	00°06,572	029°15,190	1706	750785,665	12116,155	1681
154	Kimemi	NGENGERE	VUTATIMBWA	MAJENGO	00°06,515	029°15,507	1719	751374,033	12011,114	1688
155	Kimemi	RUGHENDA UCG	CONCESSION UCG	LIANGA	00°07,520	029°15,415	1887	751203,130	13863,926	1868
156	Kimemi	MANZIA	CONCESSION UCG	LIANGA	00°07,650	029°15,586	1856	751520,490	14103,623	1830
157	Kimemi	KAKOHWI	MATANDA	AV LUBWE	00°07,413	029°17,490	1771	755054,451	13666,990	1715
158	Kimemi	KANUNGA	CONCESSION NZUKI	KATSYA	00°06,716	029°16,676	1732	753543,720	12381,847	1668
159	Kimemi	KASEGHESEGHE	CONCESSION MILONGE	NDUKO	00°06,588	029°16,385	1739	753003,627	12145,821	1682
160	Kimemi	KATIYO VUBONDO	NDUKO	NDUKO	00°06,606	029°16,356	1756	752949,799	12179,002	1697
161	Kimemi	MATONGO	NDUKO	NDUKO MATONGO	00°06,571	029°16,235	1762	752725,222	12114,458	1716
162	Kimemi	KASALALA	NDUKO	NDUKO	00°06,445	029°16,183	1749	752628,725	11882,154	1693
163	Kimemi	CHIRUNDIRE	NDUKO	VULAMBO	00°06,295	029°16,244	1765	752741,964	11605,619	1710
164	Kimemi	VIKUKU	NDUKO	VIKUKU	00°06,072	029°16,179	1761	752621,350	11194,482	1705
165	Kimemi	KAVINGEZI	VUKONDI	VUKONDI	00°06,322	029°16,388	1768	753009,231	11655,416	1687
166	Kimemi	MAROC	KAVINGU	MAROC	00°06,110	029°16,725	1755	753634,749	11264,611	1675
167	Kimemi	MAHAMBIA I	BWYNYOLE	MAHAMBIA	00°06,139	029°16,752	1761	753684,859	11318,080	1680
168	Kimemi	VURANGA	VURANGA	VURANGA	00°06,816	029°16,589	1780	753382,229	12566,198	1708
169	Kimemi	MAHAMBIA	ECOLE BWYNYOLE	MAHAMBIA	00°06,036	029°16,981	1788	754109,910	11128,215	1693
170	Kimemi		ECOLE MAHAMBIA	MAHAMBIA	00°06,022	029°16,963	1792	754076,503	11102,402	1699
171	Kimemi	KANUNGA I	BWYNYOLE	AV VISESO	00°06,233	029°17,058	1796	754252,802	11491,423	1697
172	Kimemi	KANUNGA II	BWYNYOLE	MAHAMBIA	00°06,303	029°16,971	1792	754091,315	11620,466	1696
173	Kimemi	KATENDERE	CONCESSION MATSORO	MAHAMBIA VUBANGE	00°06,391	029°16,768	1770	753714,522	11782,679	1672
174	Kimemi	VUMBETU	VUTETSE	MWENGE	00°06,884	029°17,650	1729	755351,504	12691,722	1706
175	Kimemi	KACHINI	VUTETSE	KALIMBUTE	00°06,908	029°17,579	1723	755219,719	12735,959	1699
176	Kimemi	LUSANDO KALIMBUTE	KALIMBUTE	MWENGE	00°06,921	029°17,486	1719	755047,102	12759,913	1698

177	Kimemi	KAZIBA II	NGULE	VISOGHO	00°06,679	029°17,331	1735	754759,446	12313,727	1714
178	Kimemi	KAZIBA I	NGULE	VISOGHO	00°06,713	029°17,355	1731	754803,987	12376,414	1709
179	Kimemi	LUSANDO I	VUTETSE	LUSANDO	00°06,646	029°17,525	1739	755119,529	12252,914	1709
180	Kimemi	LUSANDO II	VUTETSE	LUSANDO	00°06,618	029°17,531	1740	755130,669	12201,293	1712
181	Kimemi	VUTETSE MALENGERA	VUTETSE	VISOGHO	00°06,512	029°17,622	1754	755299,587	12005,878	1725
182	Kimemi	KALONGE	VUBANGE A	VUBANGE I	00°06,600	029°17,151	1737	754425,365	12168,053	1702
183	Kimemi	VUBANGE	VUBANGE B	VUBANGE II	00°06,415	029°17,299	1759	754700,089	11826,999	1711
184	Kimemi	KAMSONGE	BASE	KAMSONGE	00°06,321	029°17,386	1761	754861,580	11653,708	1713
185	Kimemi	ROMAIN	BASE	VISOGHO	00°06,251	029°17,761	1766	755557,618	11524,703	1756
186	Kimemi	KISHAM	BASE	VISOGHO	00°06,168	029°17,535	1774	755138,155	11371,650	1724
187	Kimemi	VUSEHI	BWYNYOLE	BWYNYOLE MONDO	00°06,058	029°17,305	1776	754711,273	11168,818	1733
188	Kimemi	KACHA I	BWYNYOLE	MONDO	00°05,818	029°17,280	1760	754664,902	10726,339	1727
189	Kimemi	KACHA II	BWYNYOLE	MONDO	00°05,832	029°17,227	1743	754566,529	10752,144	1692
190	Kimemi	KACHA III	BWYNYOLE	MONDO	00°05,819	029°17,188	1740	754494,144	10728,171	1689
191	Mususa	COPHACO	MATANDA	COPHACO	00°07,684	029°17,579	1656	755219,597	14166,634	1708
192	Mususa	MULEKYA	VUNGI	MULEKYA	00°07,470	029°18,108	1681	756201,499	13772,178	1725
193	Mususa	KALONGOLERO	VUNGI	KALONGOLERO	00°06,241	029°18,413	1679	756767,788	11506,355	1743
194	Mususa	LIMBORO	KITULU	VUTALIRYA	00°06,904	029°18,515	1686	756957,015	12728,725	1722
195	Mususa	KAMSONGE	KITULU	KAMSONGE	00°06,943	029°18,398	1692	756739,847	12800,610	1719
196	Mususa	LUNGA	KITULU	VUTALIRYA	00°06,518	029°18,394	1701	756732,484	12017,049	1727
197	Mususa	VULUMBI I	KITULU	VULUMBI	00°06,737	029°18,115	1705	756214,603	12420,773	1731
198	Mususa	VULUMBI II	KITULU	KALUHITE	00°07,019	029°18,135	1696	756251,683	12940,689	1730
199	Mususa	KITSANGA	KATWA	VUHIKA KITSANGA	00°06,438	029°18,623	1656	757157,541	11869,588	1728
200	Mususa	KIVUNGO	KATWA	VINONE	00°06,116	029°18,682	1660	757267,095	11275,932	1729
201	Mususa	LUNGA MUSIRIVANA	KITULU	VUHIKA MULAMBI	00°06,345	029°18,403	1667	756749,213	11698,096	1735
202	Mususa	MUSIRIVANA	KITULU	MULAMBI KAVUGHAVUGHA	00°06,344	029°18,406	1669	756754,781	11696,252	1735
203	Mususa	NGAMBO	KATWA	VINONE II	00°05,979	029°18,526	1677	756977,561	11023,328	1732
204	Mususa	KAVUGAVUGHA	KATWA	KAVUGAVUGHA	00°05,679	029°18,299	1684	756556,266	10470,197	1737
205	Mususa	KILONGUE	KATWA	KILONGUE	00°05,551	029°18,591	1685	757098,261	10234,243	1739
206	Mususa	KAKANZA KAHWERO	KATWA	KAVISA	00°05,403	029°18,793	1706	757473,211	9961,403	1759

207	Mususa	VWESA	KATWA	KAVISA	00°05,252	029°19,016	1711	757887,140	9683,033	1774
208	Mususa	KASINGA	KATWA	KASINGA KAVISA	00°05,172	029°18,687	1694	757276,491	9535,501	1747
209	Mususa	KANUNGA	KATWA	KAVISA	00°05,272	029°18,574	1684	757066,740	9719,856	1732
210	Mususa	KATOYA II	BWINONGO	BWINONGO	00°05,279	029°18,322	1673	756599,003	9732,732	1722
211	Mususa	KATOYA I	BWINONGO	KATOYA	00°05,179	029°18,231	1676	756430,110	9548,355	1716
212	Mususa	MALIHI	BWINONGO	MAHILI	00°04,757	029°18,358	1726	756665,879	8770,341	1782
213	Mususa	NGOTE	BWINONGO	MULENGERA	00°04,519	029°18,588	1735	757092,805	8331,570	1774
214	Mususa	KIKOBYA	BWINONGO	MULENGERA	00°04,397	029°18,411	1713	756764,288	8106,624	1756
215	Mususa	MASIMASI	KATWA	VITCHAI	00°06,190	029°18,059	1709	756110,739	11412,280	1734
216	Mususa	VITCHAI	KATWA	KANYANGUNGU	00°06,258	029°17,975	1703	755954,818	11537,638	1733
217	Mususa	KANYANGUNGU	KATWA	KANYANGUNGU	00°06,382	029°18,022	1700	756042,038	11766,259	1729
218	Mususa	VULEMA	KITULU	VULEMA	00°06,402	029°18,091	1692	756170,105	11803,141	1732
219	Mususa	KAVUKULE	MATANDA	KIKUNGU	00°06,493	029°17,886	1693	755789,595	11970,886	1729
220	Mususa	KAHUMBA	MATANDA	KAHUMBA	00°06,587	029°17,809	1688	755646,663	12144,179	1728
221	Mususa	VUTETSE WAYIMIRYA	MATANDA	KIKUNGU	00°06,819	029°17,796	1685	755622,501	12571,906	1720
222	Mususa	KIKUNGU	BWINONGO	MITOYA B	00°06,351	029°17,783	1674	755598,438	11709,072	1730
223	Mususa	KITSANGA	BWINONGO	MITOYA B	00°05,800	029°18,083	1686	756155,335	10693,254	1732
224	Mususa	KAMITOYA	BWINONGO	MASULI A	00°05,807	029°17,883	1646	755784,117	10706,135	1710
225	Mususa	MASULI I	BWINONGO	MITOYA B	00°05,769	029°17,916	1651	755845,373	10636,080	1723
226	Mususa	MITOYA NJIAPANDA MUTANGA A	BWINONGO	MUTANGA A	00°05,825	029°17,861	1645	755743,281	10739,318	1711
227	Mususa	A	BWINONGO	MITOYA B	00°06,040	029°17,716	1667	755474,122	11135,686	1729
228	Mususa	KAMBIRE	BWINONGO	MITOYA B	00°06,012	029°17,825	1663	755676,439	11084,078	1719
229	Mususa	MASULI II	BWINONGO	MASULI B	00°05,755	029°17,768	1650	755570,674	10610,250	1709
230	Mususa	MUTANGA	BWINONGO	MUTANGA	00°05,900	029°17,470	1663	755017,545	10877,542	1714
231	Mususa	KIHARO NDEREMBI	BWINONGO	MASULI/NDEREMBI	00°05,551	029°17,413	1669	754911,792	10234,101	1699
232	Mususa	BWINONGO	BWINONGO	BWINONGO	00°05,437	029°18,018	1674	756034,734	10023,996	1732
233	Mususa	VUKAKA II	BWINONGO	IRANGYA	00°05,261	029°17,979	1668	755962,367	9699,507	1716
234	Mususa	MUKELEGHE	BWINONGO	IRANGYA	00°05,200	029°18,018	1679	756034,761	9587,048	1739
235	Mususa	VUKAKAI	BWINONGO	IRANGYA	00°05,189	029°18,071	1685	756133,135	9566,774	1743
236	Mususa	IRANGYA	BWINONGO	IRANGYA	00°05,145	029°17,404	1637	754895,134	9485,578	1684

237	Vulamba	BUYONGA	MUKALANGIRWA	BUYONGA I	00°10,785	029°18,4904	1689	756910,613	19884,018	1683
238	Vulamba	KAMUSONGE	MUKALANGIRWA	BUYONGA II	00°10,899	029°18,174	1721	756323,321	20094,122	1721
239	Vulamba	BUSIGHA	MUKALANGIRWA	VUSIG HA	00°10,294	029°17,834	1719	755692,392	18978,627	1704
240	Vulamba	KIRIVA	MUKALANGIRWA	VUSIG HA	00°10,077	029°17,655	1722	755360,202	18578,514	1699
241	Vulamba	KVALE	MUKALANGIRWA	KVALE	00°10,206	029°17,459	1738	754996,385	18816,303	1716
242	Vulamba	VULINDI A	MUKALANGIRWA	VULINDI	00°09,951	029°17,497	1735	755066,970	18346,180	1708
243	Vulamba	VULINDI B	MUKALANGIRWA	VULINDI	00°10,158	029°17,283	1734	754669,727	18727,769	1708
244	Vulamba	VULINDI C	MUKALANGIRWA	VULINDI	00°10,294	029°17,123	1756	754372,728	18978,469	1737
245	Vulamba	VULINDI D	MUKALANGIRWA	VULINDI	00°10,002	029°17,103	1742	754335,670	18440,121	1711
246	Vulamba	VUGHESI I	MUKALANGIRWA	VUHESI	00°11,666	029°18,135	1694	756250,747	21508,204	1701
247	Vulamba	VUGHESI II	MUKALANGIRWA	VUHESI	00°11,456	029°18,140	1700	756260,080	21121,035	1725
248	Vulamba	VUGHESI III	MUKALANGIRWA	VUHESI	00°11,479	029°18,088	1706	756163,558	21163,427	1731
249	Vulamba	VUGHESI IV	MUKALANGIRWA	VUHESI	00°11,279	029°18,140	1702	756260,123	20794,707	1729
250	Vulamba	KANUNGA	CONGO YA SIKA	MAKONGOBO	00°09,382	029°17,169	1672	754458,298	17297,075	1716
251	Vulamba	MAKONGOBO	CONGO YA SIKA	MAKONGOBO	00°09,487	029°17,082	1690	754296,800	17490,640	1731
252	Vulamba	KANUNGA	CONGO YA SIKA	FURU	00°09,501	029°17,492	1660	755057,784	17516,535	1695
253	Vulamba	LWABAMBESA	CONGO YA SIKA	UHURU	00°08,977	029°17,517	1679	755104,290	16550,467	1705
254	Vulamba	LWABAKALI	CONGO YA SIKA	UHURU	00°08,994	029°17,477	1676	755030,043	16581,801	1705
255	Vulamba	MULUNGULU	CONGO YA SIKA	MULUNGULU	00°09,115	029°17,262	1682	754630,965	16804,840	1725
256	Vulamba	KATOVVO KIKWANGURA Non aménagée	CONGO YA SIKA	KATOVVO	00°08,905	029°16,902	1755	753962,824	16417,606	1765
257	Vulamba	KYANGIKE	CONGO YA SIKA	KIKWANGA	00°08,025	029°16,783	1730	753742,112	14795,183	1753
258	Vulamba	KYANGIKE	CONGO YA SIKA	KIKWANGA	00°08,964	029°16,709	1753	753604,594	16526,343	1769
259	Vulamba	KIKWANGA	CONGO YA SIKA	KIKWANGA	00°08,975	029°16,725	1772	753634,288	16546,626	1765
260	Vulamba	BEL AIR	KAMBALI	KASUKA	00°08,667	029°16,785	1785	753745,710	15978,798	1788
261	Vulamba	KASUKA LWANGONGO	KAMBALI	KASUKA LWANGONGO	00°08,692	029°16,647	1803	753489,569	16024,863	1804
262	Vulamba	KYATSINGE	KAMBALI	KYATSINGE	00°08,806	029°17,209	1748	754532,653	16235,144	1733
263	Vulamba	KYATSINGE	CONGO YA SIKA	KYATSINGE	00°08,803	029°17,220	1750	754553,070	16229,615	1731
264	Vulamba	LWANGONGO	CONGO YA SIKA	LWANGONGO	00°08,687	029°17,424	1737	754931,730	16015,790	1711
265	Vulamba	E. P. A. MATENGENEZO	KAMBALI	E.P. MATENGENEZO	00°08,597	029°17,314	1744	754727,579	15849,841	1720

266	Vulamba	FELIX	KAMBALI	DE L'HOPITAL	00°08,610	029°17,114	1754	754356,364	15873,771	1737
267	Vulamba	MUSAYI	KAMBALI	MUSAYI	00°08,705	029°16,938	1772	754029,679	16048,885	1756
268	Vulamba	KASALALALA	KAMBALI	MUSAYI	00°08,666	029°17,003	1767	754150,330	15976,995	1746
269	Vulamba	KABWE I	KAMBALI	AVENUE NYALIANGA	00°08,342	029°17,095	1754	754321,147	15379,671	1732
270	Vulamba	KABWE II	KAMBALI	AVENUE KITAWITE	00°08,314	029°17,105	1749	754339,713	15328,051	1730
271	Vulamba	KITIYON	KAMBALI	AVENUE KITAWITE	00°08,304	029°17,129	1749	754384,260	15309,619	1731
272	Vulamba	VULIKI I	MATEMBE	VULIKI	00°08,661	029°16,471	1846	753162,910	15967,677	1845
273	Vulamba	VUHIGHI I	CONGO YA SIKA	VUHIGHI	00°08,912	029°16,487	1832	753192,560	16430,432	1824
274	Vulamba	KAVIKENE ANCIEN CITERNE REGI	CONGO YA SIKA	KAVIKENE	00°08,106	029°16,394	1798	753020,094	14944,450	1871
275	Vulamba	DESO	CONGO YA SIKA	VUHIGHI	00°08,973	029°16,401	1878	753032,928	16542,877	1867
276	Vulamba	KANZUNZA	MATEMBE	VUTAHWA	00°08,844	029°16,243	1867	752739,698	16305,019	1861
277	Vulamba	VUTAHWA	MATEMBE	VUTAHWA	00°08,675	029°16,017	1885	752320,264	15993,404	1877
278	Vulamba	KANYWANGOKO KANYWANGOKO REGI	MATEMBE	BUSWAGHA	00°08,671	029°15,811	1872	751937,921	15985,991	1867
279	Vulamba	DESO	MATEMBE	KIVWA	00°08,732	029°15,557	1911	751466,477	16098,405	1887
280	Vulamba	REGI DESO	MATEMBE	KIVWA	00°08,554	029°15,411	1947	751195,530	15770,215	1925
281	Vulamba	VULIKI II	MATEMBE	VULAMBA CONCESSION ITAV/	00°08,591	029°15,942	1914	752181,076	15838,526	1907
282	Vulamba	VULIKI III CONCESSION ITAV	MATEMBE	VULIKI CONCESSION ITAV/	00°08,530	029°16,242	1913	752737,900	15726,120	1894
283	Vulamba	VULIKI IV CONCESSION ITAV	MATEMBE	VULIKI CONCESSION ITAV/	00°08,526	029°16,317	1896	752877,104	15718,759	1882
284	Vulamba	VULIKI V VULIKI CONCESSION	MATEMBE	VULIKI CONCESSION ITAV/	00°08,533	029°16,329	1894	752899,375	15731,667	1874
285	Vulamba	ITAV	MATEMBE	VUYO	00°08,537	029°16,332	1891	752904,942	15739,042	1873
286	Vulamba	KAMBIRE	MATEMBE	VULAMBA/ VUTUMO	00°08,321	029°16,257	1855	752765,778	15340,805	1882
287	Vulamba	NGERE	MATEMBE	VULAMBA/ NGERE	00°08,269	029°16,038	1879	752359,313	15244,898	1909
288	Vulamba	KOMBA/ LUKWALIHA	MATEMBE	KOMBA	00°07,858	029°15,150	1872	750711,228	14487,021	1900
289	Vulamba	VUSAYI	MATEMBE	MIGHANZA	00°07,507	029°14,482	1831	749471,467	13839,811	1861
290	Vulamba	MUTI WA NZUKI	MATEMBE	MUTI WA NZUKI	00°07,548	029°14,320	1826	749170,788	13915,372	1855
291	Vulamba	MIGHANZA I	MATEMBE	MIGHANZA	00°07,476	029°14,110	1828	748781,038	13782,601	1854
292	Vulamba	MIGHANZA II	MATEMBE	MIGHANZA	00°07,456	029°14,029	1830	748630,706	13745,717	1860
293	Vulamba	VULEREKI I	MATEMBE	VULEREKI	00°07,955	029°13,817	1870	748237,154	14665,626	1892
294	Vulamba	VULEREKI II	MATEMBE	VULEREKI	00°08,114	029°13,643	1915	747914,185	14958,725	1934

295	Vulamba	TUKUSE	MATEMBE	VUSIKI	00°08,008	029°12,983	1851	746689,254	14763,196	1861
296	Vulamba	VUSIKI	MATEMBE	VUSIKI	00°08,302	029°13,004	1848	746728,180	15305,205	1869
297	Vulamba	VUSUMBA	MATEMBE	VUSUMBA	00°08,423	029°13,349	1836	747368,472	15528,336	1840
298	Vulamba	KALANGIRA	MATEMBE	KALANGIRA	00°08,241	029°14,115	1925	748790,193	15192,940	1933
299	Vulamba	KITOWA	MATEMBE	KITOWA	00°07,841	029°14,220	1870	748985,140	14455,526	1873
300	Vulamba	KITOWA/ MUZI	MATEMBE	KITOWA	00°07,841	029°14,220	1898	748985,140	14455,526	1873
301	Vulamba	KITAMBI I	MATEMBE	KAVIKIRE	00°08,143	029°14,477	1915	749462,083	15012,332	1918
302	Vulamba	KAVIKIRE I	MATEMBE	KAVIKIRE	00°08,012	029°14,662	1898	749805,466	14770,853	1908
303	Vulamba	KANZAMBU	MATEMBE	KAVIKIRE	00°08,142	029°14,961	1930	750360,393	15010,571	1938
304	Vulamba	SECHOIR	MATEMBE	VULAMBA	00°08,234	029°15,173	1913	750753,853	15180,219	1992
305	Vulamba	MATEMBE KIPARC	MATEMBE	MATEMBE	00°08,817	029°15,416	1828	751204,762	16255,085	1897
306	Vulamba	MATEMBE KIPARC	MATEMBE	MATEMBE	00°08,803	029°15,229	1857	750857,688	16229,240	1932
307	Vulamba	MULEMBO	MATEMBE	MULEMBO	00°08,917	029°14,976	1848	750388,094	16439,362	1925
308	Vulamba	KIHUKO	MATEMBE	MATEMBE	00°08,999	029°14,900	1812	750247,021	16590,523	1879
309	Vulamba	KANZAMBU	MATEMBE	VUESA	00°09,307	029°14,265	1754	749068,397	17158,226	1818
310	Vulamba	NDEKO	MATEMBE	VUESA/ NDEKO	00°09,524	029°14,269	1725	749075,778	17558,284	1790
311	Vulamba	LUKONO	MATEMBE	VUESA	00°09,415	029°14,184	1729	748918,040	17357,317	1792
312	Vulamba	LUHIKYO/ KYATAKA	MATEMBE	VUESA	00°09,289	029°14,072	1716	748710,192	17125,003	1778
313	Vulamba	KIGHERI	MATEMBE	VUESA	00°09,199	029°14,065	1720	748697,218	16959,080	1784
314	Vulamba	MAHERO	MATEMBE	MATEMBE	00°08,622	029°14,870	1857	750191,410	15895,482	1932



Muhindo SAHANI est né le 29 mars 1969 à Butembo [Nord-Kivu/RDC]. Il a suivi ses études primaires à l'école primaire Mapendano [actuelle NYUKI] ainsi qu'à l'école primaire Malonge. C'est à l'Institut de Katwa qu'il obtint son diplôme d'Etat en section pédagogique, option pédagogie générale en 1989. Il est admis à l'Université Catholique du Graben [UCG] où il obtiendra son diplôme d'**Ingénieur agronome** à la Faculté des Sciences Agronomiques, Option Phytotechnie en 1995.

Il a commencé sa carrière professionnelle comme Assistant de recherche attaché au **CEFADES** où il exercera la fonction d'**Animateur** en 1997. De 1998 à 2003, il a été **Directeur** de la **SAPH**. Dans l'exercice de cette fonction, **Sahani** bénéficiera d'un stage de professionnalisation de 8 mois en France, financé par le **CCFD** [Comité Catholique Contre la Faim et pour le Développement] et **FUB** [France Université Butembo]. Ce stage l'a conduit à l'**INRA**/Bordeaux, à l'**UREFV** et au **CIREA** de Douville ainsi qu'à la Pépinière expérimentale forestière de Guémené-Penfao en Loire Atlantique. Ce stage le conduira aussi à l'**ONF** dirigé par le Groupe Technique de Blain ainsi qu'au **CIRAD**/Forêt, au Campus international de Baillarguet à Montpellier dans le domaine d'Agroforesterie.

De 2003 à 2004, il bénéficiera d'une bourse de la **CUD** qui lui permettra de faire des études interuniversitaires et d'obtenir un **DES [Diplôme d'études spécialisées]** à la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de **Gembloux**, Université de **Liège**, Fondation Universitaire Luxembourgeoise au Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Option **Gestion des Risques Naturels**; Orientation : **climato-risques**. Ces trois institutions constituent en tout l'**ULg**. Pendant cette formation Sahani bénéficiera d'un stage professionnel qui cadre avec la gestion des risques naturels dans les Alpes françaises, en Ligurie et en Italie précisément en Sardaigne.

Dès son retour au Pays, dans sa ville natale, Sahani sera nommé **Chef des travaux** à l'Université Catholique du graben en 2005 où il dispensera quelques cours du domaine environnemental. Il donne des cours aussi à l'**ISEAB** [Institut Supérieur Emmanuel d'Alzon de Butembo] et à l'Université Shalom de Bunia [USB].

De 2006 à 2010, il a été **Coordonnateur** du **CAUB** [Consortium de l'Agriculture Urbaine de Butembo] qui travaille en partenariat avec UniverSud Liège grâce au financement issu de la Direction générale de la coopération au développement [DGCD] actuel **DGD**-Belgique.

Il bénéficie d'une **bourse doctorale** financée par la **CTB [Coopération Technique Belge]** dans le cadre de son programme de doctorat mixte couvrant la période allant de 2007 à 2011 et conduisant au **Doctorat en Sciences**. Pendant cette formation il a donné en quatre reprises des **cours METIS** dans le cadre des enseignements du **Prof. André OZER** et du **Dr. Pierre OZER** aux étudiants en Master complémentaire en Gestion des Risques naturels à l'Université de Liège [à Liège et à Arlon] de 2008 à 2011. Il a aussi effectué une bonne partie de sa recherche doctorale au **MRAC** [Musée Royal de l'Afrique Centrale] à Tervuren à la section de Géomorphologie et Télédétection entre 2008 et 2011.

Sahani est membre du **RéCO**, un réseau des correspondants de chercheurs sur les risques hydrologiques naturels en Afrique Centrale. Il a bénéficié d'un stage groupé d'étude et de cartographie des risques hydrologiques dans la région de Grands Lacs que le **RéCO** a organisé en novembre 2010 sous la direction du **Dr. Aggr. Jan Moeyersons**, promoteur de cette thèse.

Contact: Muhindo SAHANI – E-mail: sahaniwalere@yahoo.fr



Université
de Liège



KONINKLIJK MUSEUM
VOOR MIDDEN-AFRIKA
MUSEE ROYAL
DE L'AFRIQUE CENTRALE
ROYAL MUSEUM
FOR CENTRAL AFRICA