

Communauté française de Belgique

FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES
AGRONOMIQUES DE GEMBLoux

Etude de l'impact des contaminations métalliques
sur les propriétés des sols autour de Lubumbashi

Année académique 2007-2008

Promoteurs :

Bock Laurent
Colinet Gilles

Mémoire de fin d'étude
Présenté en vue de l'obtention
du grade de bio-ingénieur
Orientation : Agronomie tropicale

Par Ludovic Andres

Communauté française de Belgique

FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES
AGRONOMIQUES DE GEMBLoux

Etude de l'impact des contaminations métalliques
sur les propriétés des sols autour de Lubumbashi

Année académique 2007-2008

Promoteurs :

Bock Laurent
Colinet Gilles

Mémoire de fin d'étude
Présenté en vue de l'obtention
du grade de bio-ingénieur
Orientation : Agronomie tropicale

Par Ludovic Andres

Remerciements

Je tiens à remercier les personnes suivantes pour m'avoir permis de mener à bien ce mémoire :

M. Gilles Colinet, ingénieur agronome et assistant affecté à l'enseignement, pour ses avis et conseils judicieux autant sur le terrain qu'en laboratoire et surtout lors de la rédaction de ce document, mais également pour sa grande disponibilité.

M. Laurent Bock, professeur de pédologie à la FUSAGX, pour m'avoir permis de réaliser cette expérience, pour l'enseignement qu'il m'a apporté au cours de ces dernières années d'étude et pour sa préoccupation quotidienne sur l'avancement de ce mémoire.

M. Michel Mpundu, ingénieur agronome et assistant à l'UNILU, pour son accueil chaleureux au Congo et au sein de l'université ainsi que pour son aide indispensable sur le terrain et plus particulièrement pour sa collaboration à l'élaboration de ce travail.

M. Serge Kashimbo, M. Tolérant Lubalega, M. José MuKalay Muanba, M. Donato Kaya Muyamba, étudiants et doctorants congolais, pour leur aide quotidienne et leur accueil au sein de l'université.

M^{me} Françoise Toussaint, technicienne au laboratoire de Géopédologie de la FUSAGX, pour son aide technique, pour sa grande disponibilité et sa grande patience.

Tout le personnel de l'Unité de Géopédologie et plus particulièrement M^{me} Béatrice Lagrange et M. Roland Sine pour leur aide technique.

Toutes les jeunes filles, mes « collègues » de laboratoire, pour leur bonne humeur habituelle et pour leur participation au tournoi de foot rendant les laboratoires beaucoup plus agréables.

Toutes les personnes rencontrées au Congo, et tout particulièrement Sam et Bert, qui ont rendu mon séjour très enrichissant sur le plan humain.

Mes proches, mes amis et famille et tout particulièrement mes parents qui m'ont toujours soutenu tant au cours de mes études qu'au cours de l'élaboration de ce mémoire.

Tous les membres du jury qui ont répondu présents à la lecture de ce mémoire.

Résumé

Cette étude est une contribution à la caractérisation des propriétés physicochimiques des sols de Lubumbashi, chef-lieu de la province du Katanga, dans le sud-est de la République Démocratique du Congo. Cette zone minière a fait l'objet d'une caractérisation géomorphopédologique afin d'établir un référentiel pédologique et un constat sur l'état des teneurs en éléments traces métalliques (ETM).

Le site de notre étude a été subdivisé en deux unités géomorphopédologiques : les plateaux et versants d'une part et les fonds de vallée d'autre part. Ces unités ont été caractérisées grâce à deux toposéquences établies à partir de la cheminée de la Gécamines, située au centre de Lubumbashi. Ces unités ont été comparées à des sites non ou peu contaminés pour améliorer la compréhension des caractéristiques pédologiques. Des sondages, des profils et des miniprofiles ont permis d'évaluer la variabilité des propriétés du sol et d'illustrer l'ensemble de la zone d'étude. Chaque horizon a été échantillonné pour être analysé en laboratoire. Certains de ces échantillons ont subi des analyses complémentaires en vue d'apprécier les teneurs totales en ETM (cuivre, cobalt, plomb, cadmium et zinc).

Il en ressort que les deux unités étudiées ont des caractéristiques différentes. Les sols de plateaux et versants sont plus acides et contiennent plus d'ETM que les sols des fonds de vallée. Ceux-ci ont une teneur en argile et en ETM augmentant avec la profondeur.

Abstract

This study is a contribution to the characterization of physicochemical properties of the soil of Lubumbashi, the capital of Katanga, in the south-east of the Democratic Republic of Congo. This mining area has been the subject of a geomorphopedological characterization in order to establish a pedological system of reference and an inventory of the concentration in trace elements.

The site of our study has been divided into two geomorphological units : the plateau and the slopes on the one hand and the bottoms of the valley on the other hand. These units have been characterised thanks to two topographic sections established from the chimney of Gécamines situated in the centre of Lubumbashi. These units have been compared to non-contaminated sites to improve the understanding of pedological characteristics. The core borings, the profiles and the miniprofiles have made it possible to evaluate the variability of the soil properties and to illustrate the whole study area. Each layer has been sampled in order to be analyzed in the laboratory. Some of these samples have undergone complementary analyses in order to evaluate the total concentration in trace elements (copper, cobalt, lead, cadmium and zinc).

In conclusion, the two units we have studied have different characteristics. The plateau and slope soils are more acid and contain more trace elements than the valley bottom soils. The latter have a concentration in clay and in trace elements increasing with the depth.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Synthèse bibliographie.....	2
2.1	Situation géographique et introduction	2
2.2	La Gécamines.....	3
2.3	Les éléments traces dans le sol	4
2.3.1	Introduction.....	4
2.3.2	Origines	4
2.3.3	Les éléments traces dans le sol	8
2.3.4	Eléments analysés dans le cadre de ce travail.....	9
2.3.5	La problématique des éléments traces.....	13
2.4	La végétation du Katanga	14
2.4.1	Généralités	14
2.4.2	Flore métallicole.....	15
2.4.3	Formations végétales des gisements métallifères	16
2.4.4	Végétation au voisinage de la cheminée Gécamines	18
3	Méthodologie.....	19
3.1	Méthodologie de terrain.....	19
3.1.1	Traitements des documents existants	19
3.1.2	Reconnaissance sur le terrain.....	19
3.1.3	Phase de terrain	20
3.2	Méthodologie de laboratoire	21
3.2.1	Conditionnement des échantillons	21
3.2.2	Analyses réalisées	21
3.2.3	Méthodes de laboratoire	22
4	Cadre bio-physique de la zone d'étude.....	26
4.1	Localisation de Lubumbashi	26
4.2	Le climat	27
4.2.1	Les précipitations et l'humidité atmosphérique.....	27
4.2.2	Les températures	27
4.2.3	Le vent.....	28
4.3	Hydrologie	28
4.4	Topographie	28
4.5	Géomorphologie.....	29
4.6	Géologie et stratigraphie.....	29
4.7	Pédologie	31
4.7.1	Cadre pédologique.....	31
4.7.2	Principales caractéristiques analytiques des profils décrits par Sys.....	32
4.7.3	Transfert des noms de sols dans le système moderne de classification	33
4.7.4	Tableau de synthèse sur les types de sol rencontrés dans la zone d'étude	34
5	Présentation des toposéquences des sites naturels.....	35
5.1	Introduction.....	35
5.2	Le monastère de Kiswishi.....	35
5.2.1	Introduction.....	35
5.2.2	Physiographie et occupation des sols	36
5.2.3	Caractérisation pédologique du site	37
5.3	La ferme Kasapa	38
5.3.1	Introduction.....	38
5.3.2	Physiographie et occupation des sols	39

5.3.3	Caractérisation pédologique du site	39
5.4	Le jardin expérimental de l'UNILU	41
5.4.1	Introduction.....	41
5.4.2	Physiographie et occupation des sols	41
5.4.3	Caractérisation pédologique du site	42
5.5	Le monastère de Kansebula	42
5.5.1	Introduction.....	42
5.5.2	Physiographie et occupation des sites	43
5.5.3	Caractérisation pédologique des sites.....	44
5.5.4	Le plateau entourant le monastère de Kansebula.....	45
6	Le site de la Gécamines	46
6.1	Introduction.....	46
6.2	Description du site.....	47
6.3	Approche pédopaysagère.....	51
6.3.1	Plateau et versant.....	51
6.3.2	Fond de vallée.....	59
6.4	Approche solum	64
6.4.1	Introduction.....	64
6.4.2	Description des teneurs totales moyennes en ETM sur les plateaux et versants	64
6.4.3	Description des teneurs totales moyennes en ETM dans les fonds de vallée.....	66
6.5	Comparaison avec les sites naturels	66
6.5.1	Relation entre les éléments traces métalliques	66
6.5.2	Corrélation avec les Sites naturels	69
6.5.3	Relations entre les ETM et les paramètres pédologiques.....	70
7	Conclusion.....	73
8	Bibliographie	75

Table des figures

Figure 1 : District et territoire du Katanga.....	2
Figure 2 : Localisation de la Gécamines et du site d'étude	4
Figure 3 : Schéma de l'acquisition des teneurs en éléments traces métalliques dans les sols....	5
Figure 4 : Arc cuprifère katangais et Copperbelt zambienne	14
Figure 5 : L'arc cuprifère shabien et les principaux gisements métallifères.....	16
Figure 6 : Carte de Lubumbashi avec ces communes	26
Figure 7 : Précipitations annuelles – Aéroport de la Luano (1970-2005)	27
Figure 8 : Direction et vitesse dominante mensuelles des vents de Lubumbashi	28
Figure 9 : Carte géologique du Katanga.....	29
Figure 10 : Localisation du monastère de Kiswishi	35
Figure 11 : Toposéquence effectuée au monastère de Kiswishi	36
Figure 12 : Situation de la toposéquence de Kiswishi sur la carte pédologique.....	37
Figure 13 : Toposéquence de la ferme Kasapa	39
Figure 14 : Localisation de la toposéquence sur la carte pédologique	40
Figure 15 : Localisation du jardin expérimental de l'UNILU	41
Figure 16 : Fosse pédologique effectuée dans le jardin expérimental de l'UNILU.....	42
Figure 17 : Toposéquence réalisée non loin du monastère de Kansebula	43
Figure 18 : Localisation de la toposéquence sur la carte pédologique	44
Figure 19 : Horizon du sondage effectué en Miombo.....	45
Figure 20 : Localisation des deux toposéquences par rapport à Lubumbashi	46
Figure 21 : Carte de l'occupation des sols d'après Sys, 1955 (échelle 1/60000)	48
Figure 22 : Distinction entre les Gleysols de versant et ceux de fond de vallée.....	48
Figure 23 : Localisation des deux toposéquences sur la carte pédologique (1/60000)	49
Figure 24 : Toposéquence du site de la Gécamines (échelle exagérée)	50
Figure 25 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Alisols Rhodiques.....	51
Figure 26 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Alisols ferri endo-squelettiques.....	53
Figure 27 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Alisols ferri épi-squelettiques ..	54
Figure 28 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Gleysols	56
Figure 29 : Corrélation de plateaux et versants tous types de sol confondus	58
Figure 30 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Fluvisols Umbriques.....	60
Figure 31 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Gleysols	61
Figure 32 : Corrélation pour les fonds de vallée tous types de sol confondus	63
Figure 33 : Histogramme des teneurs totales moyennes en cuivre	67
Figure 34 : Histogramme des teneurs totales moyennes en cobalt	67
Figure 35 : Histogramme des teneurs totales moyennes en plomb.....	68
Figure 36 : Histogramme des teneurs totales moyennes en cadmium	68
Figure 37 : Histogramme des teneurs totales moyennes en zinc	69
Figure 38 : Corrélation pour les sites peu ou non contaminés tous types de sols confondus...	69
Figure 39 : Régression entre le cuivre et le plomb sur sites « naturels »	70
Figure 40 : Régression entre le Cu-C% et Zn-C% sur les sites non ou peu contaminés.....	71
Figure 41 : Régression entre Co-Cd et Cu-Pb sur les sites contaminés	71
Figure 42 : Régression entre le Co et l'Al sur les sites contaminés	72
Figure 43 : Régression entre le Co et le pH sur les sites contaminés.....	72

Tables des tableaux

Tableau 1 : Contenu des roches en éléments traces (en mg/kg)	14
Tableau 2 : Classification des particules	23
Tableau 3: Lithostratigraphy of the Katangan succession in Congo.....	30
Tableau 4 : Caractéristiques des différents types de sol observés sur l'aire étudiée.....	34
Tableau 5 : Résultats des Alisols Rhodiques	52
Tableau 6 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Alisols Rhodiques.....	52
Tableau 7 : Résultats des Alisols ferri endo-squelettiques	53
Tableau 8 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Alisols ferri endo-squelettique	54
Tableau 9 : Résultats des Alisols ferri épi-squelettiques.....	55
Tableau 10 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Alisols ferri épi-squelettique	55
Tableau 11 : Résultats des Gleysols	57
Tableau 12 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Gleysols.....	57
Tableau 13 : Résultats des Plinthosols	58
Tableau 14 : Résultats des Fluvisols Umbriques	60
Tableau 15 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Fluvisols Umbriques.....	61
Tableau 16 : Résultat des Gleysols.....	62
Tableau 17 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Gleysols.....	62
Tableau 18 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Alisols Rhodiques	64
Tableau 19 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Alisols ferri endo-squelettiques.....	65
Tableau 20 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Alisols ferri épi-squelettiques.....	65
Tableau 21 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Gleysols de bas de versant	65
Tableau 22 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Gleysols de fond de vallée	66
Tableau 23 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Fluvisols Umbriques.....	66

Table des planches

- Planche 1 : Illustration de la toposéquence du monastère de Kiswishi
- Planche 2 : Résultats de la toposéquence du monastère de Kiswishi
- Planche 3 : Illustration de la toposéquence de la ferme Kasapa
- Planche 4 : Résultats de la toposéquence de la ferme Kasapa
- Planche 5 : Résultats du jardin expérimental de l'UNILU
- Planche 6 : Résultats de la toposéquence du monastère de Kansebula
- Planche 7 : Résultats obtenus dans la forêt claire de Kansebula
- Planche 8 : Comparaison des occupations actuelles avec celle anciennement présentes
- Planche 9 : Horizon remanié sur les sites de la Gécamines
- Planche 10 : Fosse effectuée sur un Alisol Rhodique
- Planche 11 : Fosse effectuée sur un Alisol ferri endo-squelettique
- Planche 12 : Minifosse effectuée sur un Alisol ferri épi-squelettique
- Planche 13 : Fosse effectuée sur un Gleysol
- Planche 14 : Minifosse effectuée sur un Plinthosol
- Planche 15 : Sondage effectué sur la toposéquence sédiment (topo 2)
- Planche 16 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Alisol Rhodique
- Planche 17 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Alisol ferri endo-squelettique
- Planche 18 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Alisol ferri épi-squelettique
- Planche 19 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Gleysol

Table des annexes

- Annexe 1 : Fiches pédologiques
- Annexe 2 : Tableau récapitulatif des résultats
- Annexe 3 : Fiches récapitulatives des sondages et profils du monastère de Kiswishi
- Annexe 4 : Fiches récapitulatives des sondages et profils de la ferme Kasapa
- Annexe 5 : Fiches récapitulatives des sondages et profils du Jardin expérimentale de l'UNILU
- Annexe 6 : Fiches récapitulatives des sondages et profils du monastère de Kasenbula
- Annexe 7 : Fiches récapitulatives du sondage du monastère de Kansebula
- Annexe 8 : Fiches récapitulatives des Alisols Rhodiques
- Annexe 9 : Fiches récapitulatives des Alisols ferri endo-squelettiques
- Annexe 10 : Fiches récapitulatives des Alisols ferri épi-squelettiques
- Annexe 11 : Fiches récapitulatives des Gleysols
- Annexe 12 : Fiches récapitulatives sur les Plinthosols
- Annexe 13 : Corrélations en fonction des profondeurs pour les sols de plateau et de versant
- Annexe 14 : Corrélations pour chaque type de sol de plateau et de versant
- Annexe 15 : Fiches récapitulatives des Fluvisols Umbriques
- Annexe 16 : Fiches récapitulatives des Gleysols
- Annexe 17 : Corrélations en fonction des profondeurs pour les sols de fond de vallée
- Annexe 18 : Corrélations pour chaque type de sol de fond de vallée
- Annexe 19 : Corrélations pour chaque type de sol non ou peu contaminé
- Annexe 20 : Régression entre les différents éléments analysés pour les sites « naturels »
- Annexe 21 : Régression entre éléments des sites contaminés

Liste des abréviations

Gécamines : Générale des carrières et des mines-exploitable

ETM : éléments traces métalliques

CUD : Coopération Universitaire au Développement

FUSAGX : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux

UNILU : Université de Lubumbashi

ULB : Université Libre de Bruxelles

UMHK : Union Minière du Katanga

STL : Société de Traitement du terril de Lubumbashi

AFNOR : Association française de Normalisation

RDC : République démocratique du Congo

GPS : Global Positioning System

CEC : capacité d'échange cationique

S : somme des cations échangeables

V : taux de saturation en bases

INEAC : Institut National pour l'Etude Agronomique au Congo

WRB : Base de Référence Mondiale pour les ressources en Sols

1 Introduction

L'activité minière de la Gécamines (Générale des carrières et des mines-exploitable) et d'autres sociétés minières est le secteur clé de Lubumbashi au niveau économique. Mais les effets des rejets de ces industries se révèlent être négatifs pour l'environnement de cette ville. En plus des contaminations en éléments traces métalliques, la pression anthropique est en pleine croissance ce qui augmente les effets sur l'environnement. Les premières conséquences néfastes se font sentir sur le sol qui subit une érosion soutenue, un ruissellement important ainsi que l'absence de croissance de la végétation et surtout une redistribution éolienne de particules contenant des éléments traces métalliques (ETM).

Ce travail vient appuyer un projet PIC qui s'intitule « appui à la création d'un troisième cycle en biologie végétale et environnement à l'Université de Lubumbashi, et approche multiscalair de la remédiation des sols contaminés » (REMEDLU) de la CUD (Coopération Universitaire au Développement). Il est réalisé en partenariat avec la FUSAGX (Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux), l'UNILU (Université de Lubumbashi) et l'ULB (Université Libre de Bruxelles). La flore spécifique présente sur les sites contaminés est une préoccupation écologique importante pour la phytoremédiation.

Le premier objectif de cette étude est de caractériser la zone de Lubumbashi la plus exposée aux vents dominants quant à son milieu physique (lithologie, relief, types de sol) et son occupation, par une approche de type géomorphopédologique. Le deuxième objectif de ce document est de définir les sols au niveau environnemental par l'analyse des teneurs totales en éléments traces métalliques. Le système de référence géomorphopédologique et l'état des teneurs dans les sols va nous permettre d'évaluer la contamination de ce site, préalable à toute planification de phytoremédiation.

La démarche pour réaliser ces objectifs a été la suivante : tout d'abord, les documents existants ont été exploités afin de définir des unités géomorphologiques et d'identifier les différents types de sol présent sur la zone d'étude. Ensuite, des unités de référence non ou peu contaminées ont été distinguées pour mieux évaluer les caractéristiques du site de la Gécamines. Deux approches complémentaires ont été menées, l'approche de terrain et l'approche de laboratoire, pour dégager les potentialités des différents types de sol et mieux caractériser les unités définies préalablement.

Ce travail est subdivisé en plusieurs chapitres, le premier situe Lubumbashi dans son contexte et tente d'établir les problèmes rencontrés à cause des éléments traces métalliques. Ensuite, les éléments traces métalliques sont définis et leur origine anthropique et naturelle est développée dans ce chapitre. Le second chapitre traite de la méthodologie utilisée sur le terrain et en laboratoire. Le troisième chapitre expose les différentes caractéristiques de la zone d'étude. Enfin, les deux derniers chapitres présenteront les résultats et les commentaires sur ceux-ci pour nous emmener à une conclusion et aux perspectives.

2 Synthèse bibliographique

2.1 Situation géographique et introduction

Chef lieu de la province du Katanga située au sud-est de la République démocratique du Congo (figure 1), Lubumbashi (11°41 S., 27°29 EO.) a une population estimée à 2.000.000 d'habitants, extensions comprises. Le dernier recensement du cadastre, datant de 2001, nous indique que la population était de 1.400.000. Elle est divisée en sept communes : Lubumbashi, Kenya, Katuba, Kampemba, Kamalondo, Ruashi ainsi que l'Annexe de Lubumbashi. Lubumbashi est réputée pour ces activités minières et a subi un essor industriel au sein d'une région excessivement riche en minerais de cuivre. Mais cette industrialisation serait responsable d'une forte contamination des sols, essentiellement due aux rejets de poussières de cuivre et autres éléments traces (cobalt, zinc, cadmium, ...) provenant des exploitations minières de la ville (Petit et *al.*, 2003).



Figure 1 : District et territoire du Katanga
(OCHA DRC Geographic, 2002)

2.2 La Gécamines

La Gécamines est la Générale des carrières et mines-exploitation, elle s'occupe de l'allocation, de la prospection et des concessions de minerais au Congo. Au cours de la période 1967-1974, l'économie du Congo est fortement tournée vers l'extérieur mais elle satisfait peu les besoins et les intérêts de la population. Cette période est caractérisée par une croissance liée aux importants investissements d'entreprises multinationales dans le secteur minier. L'UMHK (Union Minière du Katanga) qui, plus tard, deviendra la Société Générale des Carrières et des Mines (GÉCAMINES), est le pilier de l'économie du Congo à cette époque. En 1974, la Gécamines était la première entreprise du pays, la troisième d'Afrique et la sixième entreprise minière au niveau mondial (PNUD, 2004). À partir de cette époque, une série d'évènements dont la « zaïrianisation », la fermeture des voies de sortie des produits miniers vers le sud, la flambée des prix du pétrole, les guerres du Shaba (Katanga), l'effondrement de la mine de Kamoto, la baisse des prix du cuivre, ... vont entraîner la faillite de la Gécamines ainsi que d'autres secteurs de la vie économique du pays (Maton et al., 2001). Dans la ville de Lubumbashi, la Gécamines possède une fonderie électrique pour le traitement du cuivre. Celle-ci est une usine d'agglomération et de fusion qui produit une matte de cuivre contenant environ 70% de cuivre et une scorie riche en cadmium et autres métaux. Le terril de Lubumbashi est symptomatique de l'exploitation minière intense qu'a connue le Katanga. Initialement, ces installations produisaient du cuivre « blister » à partir d'un minerai concentré ayant une teneur en cuivre d'environ 5%. Cette usine a été à l'arrêt de 1993 à 1999. Depuis, l'usine a été reconvertie en une usine de mattes. Des travaux de conception sont en cours pour installer un deuxième four électrique ainsi que la réhabilitation d'un convertisseur qui pourrait transformer la matte produite en « blister ». Les scories produites par l'usine de la Gécamines sont traitées par l'usine voisine, la STL (Société de Traitement du terril de Lubumbashi – relevant d'un consortium Gécamines-Forest-OM group). Dernièrement, l'exploitation du terril fournit annuellement 5 000 tonnes de cobalt, 3 500 tonnes de cuivre et 15 000 tonnes de zinc (Comtois et al., 2003 ; <http://www.forrestgroup.com/fr/stl/stl.html>).

La cheminée de la Gécamines mesurant 152 m de haut, située au centre de Lubumbashi, a produit des émissions pouvant contenir des poussières, des métaux et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (<http://www.forrestgroup.com/fr/stl/stl.html>). Cette fumée est retombée sous forme de dépôts éoliens. Une partie de la ville a été fortement contaminée par ces dépôts. Ce quartier fortement contaminé s'appelle le quartier Gécamines. Il est ceinturé par les rivières Karavia et Lubumbashi (figure 2). Ce plateau est devenu au fur et à mesure un plateau érodé ou parfois une mince végétation cuprophyte se développe. La couche de dépôts est d'au moins 5 cm quand elle n'est pas érodée. Ces accumulations de dépôts éoliens sont dues au vent dominant (nord-ouest). La carte d'occupation des sols, qui date de 1954-1956, nous indique que ce plateau était occupé par des pâturages et des miombos (Sys, 1954-1956).



Figure 2 : Localisation de la Gécamines et du site d'étude (Google, 2008)

2.3 Les éléments traces dans le sol

2.3.1 Introduction

Certains éléments dans les sols n'existent qu'à l'état de traces tel que le Cu, le Pb, le Co, le Ni, le Zn, le Cd etc. Certains de ces éléments traces peuvent, en fonction de la nature de la roche-mère, ou de conditions climatiques ou topographiques, perdre leur caractère de traces et atteindre une réelle abondance dans certains sols. Cela peut aller jusqu'à des teneurs qui transforment ces sols ou des horizons spécifiques des sols en horizons ou sols fortement perturbés. Dans certains cas, ces éléments ont un rôle essentiel dans l'évolution des sols ou alors ils en sont les témoins. Les roches mères constituent la source première et la réserve de ces éléments. Les différences constatées entre les teneurs des roches et celles des sols sont dues aux processus pédogéochimiques intervenant au cours de la formation des sols (phénomènes d'illuviation, d'éluviation, ...). L'expression des teneurs en éléments sont évalués en mg/kg ou en ppm (Haubert et *al.*, 1971).

2.3.2 Origines

Le sol est un milieu dynamique qui reçoit des apports externes (dépôts atmosphériques, d'origine agricole) ou internes (altération des roches). Ces apports sont continuellement redistribués dans les différents horizons d'un sol (figure 3).

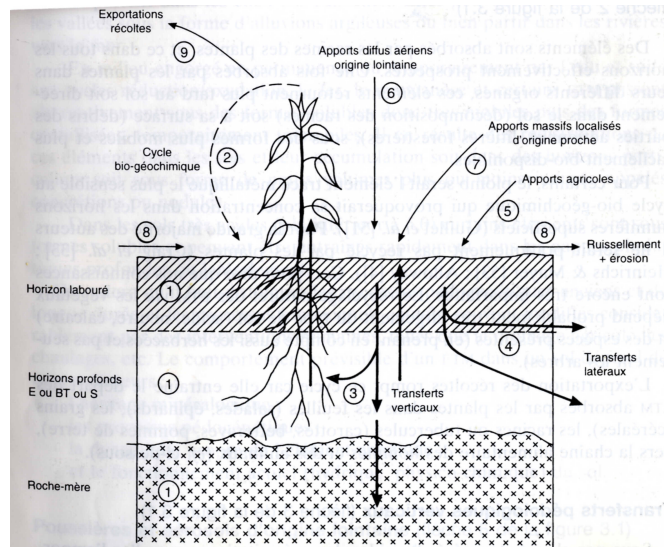


Figure 3 : Schéma de l'acquisition des teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (Baize, 1997)

2.3.2.1 Origines naturelles

2.3.2.1.1 Origines pédogéochimiques et biogéochimiques

Le fond pédogéochimique est la teneur totale en éléments chimiques que l'on peut constater aujourd'hui dans un sol, en l'absence de contaminations liées aux activités humaines (Baize, 1997). L'héritage de la roche-mère est une des causes principales de la présence d'éléments traces dans le sol. La pédogénèse va entraîner une redistribution de ces éléments sur toute la profondeur du profil. Cette redistribution est fonction du climat, du milieu environnant, du microclimat du sol, des organismes vivants, de la topographie, de la nature de la roche-mère et du temps. Il existe des variations naturelles que l'on peut observer au sein d'un même solum et qui peuvent être liées à l'un ou l'autre des gradients suivants (Bourrelier et al., 1998) :

- Gradient d'argile (croissant avec la profondeur) accompagné d'un gradient parallèle du fer ;
- Gradient de carbone (décroissant avec la profondeur) et souvent en relation avec les teneurs en plomb, cadmium et parfois le zinc et le manganèse ;
- Gradient de la teneur en calcaire.

Des éléments peuvent être absorbés par les racines de plantes. Une fois absorbés par les plantes dans leurs différents organes, ces éléments retournent au sol soit directement dans le sol (décomposition des racines) soit à sa surface (débris de parties aériennes, litières forestières), ou sous des formes plus mobiles et plus facilement biodisponibles, c'est le cycle biogéochimique (Baize, 1997). Certaines parties de cycles pédogéochimiques modifient la contamination des sols de façon active (Bourrelier et al., 1998) :

- Les retombées de la contamination atmosphérique (volcanisme) ;
- L'action des hydrosystèmes qui provoque l'érosion et l'entraînement des éléments traces sous forme particulaire ou dissoute vers l'aval des cours d'eau et des estuaires.

2.3.2.1.2 Source d'origine lointaine

Parmi les apports diffus aériens d'origines lointaines, se trouvent des particules très fines d'origine naturelle : c'est le cas des poussières libérées dans l'atmosphère par l'activité des volcans, des embruns maritimes (Baize, 1997). Le volcanisme se définit comme l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui participent au transfert de matière et d'énergie de l'intérieur de la terre vers l'atmosphère. Il se produit sur l'ensemble du globe et à toute époque (Bourrelier et *al.*, 1998).

2.3.2.1.3 Transferts verticaux ou latéraux

Dans de nombreux types de sol et plus particulièrement les sols filtrants, on remarque que certains éléments traces métalliques ont migré sous des formes associées aux particules d'argile et au fer vers les horizons profonds (horizons illuviaux). Les formes solubles peuvent migrer encore plus profondément de manière verticale, vers les nappes phréatiques. D'autres éléments comme le plomb peuvent être retenus dans les horizons de surface organo-minéraux (Baize, 1997). Ces transferts verticaux peuvent constituer un danger lorsque les formes plus solubles atteignent les nappes. Certains éléments (Al, Fe, Mg, Ni, Ti) se retrouvent dans les horizons sous-jacents parce qu'ils sont associés aux argiles et aux oxydes. Certains éléments (Cd, Cu, Pb, Zn, Hg) sont généralement concentrés dans les horizons de surface. Plusieurs raisons peuvent être avancées pour cette accumulation, ils sont soit accumulés à la suite de dépôts atmosphériques, soit adsorbés par la matière organique où soit ils subissent un cycle à travers la végétation, (Alloway, 1990).

Les transports latéraux peuvent être influencés par au moins trois processus (saisonnalité, engorgement, acidité) susceptibles d'affecter et de redistribuer les éléments traces dans les sols. Certaines périodes de l'année (automne, hiver, ...) sont propices au lessivage latéral de particules argileuses associées à des hydroxydes et des oxydes de fer. Ces particules quittent les horizons supérieurs et sont entraînées latéralement en suspension. En milieu engorgé en permanence ou temporairement par l'eau et suite aux cycles réduction/oxydation, le fer, le manganèse et certains éléments traces passent alternativement sous des formes solubles donc très mobiles puis des formes cristallisées, temporairement immobiles. Il en résulte une redistribution de ces éléments dans les sols et leur accumulation soit dans les horizons particuliers soit sous forme de petits volumes plus ou moins indurés, appelés concrétions ou nodules. En milieu très acides, certains éléments se présentent sous forme solubles et peuvent rapidement être entraînés dans les nappes phréatiques (Baize, 1997).

2.3.2.2 Origines anthropiques

2.3.2.2.1 Les retombées atmosphériques

Il existe une diffusion à longue distance de certains polluants organiques ou minéraux issus de l'activité industrielle et de la circulation automobile qui peut atteindre des parties du monde même très éloignées des sites d'émission. Ces émissions ont comme origine de nombreuses activités humaines telles que le chauffage domestique, la production d'énergie, les activités industrielles (Bourrelier et *al.*, 1998).

2.3.2.2.2 Sites industriels et dépôts de déchets

Les sites industriels susceptibles d'être des sources de pollution sont ceux où l'on extrait, manipule ou transforme les éléments, jusqu'à leur incorporation dans des produits finis. La contamination provenant de ces sites vient (Bourrelier et *al.*, 1998) :

- Des déchets (par exemple, les batteries qui contiennent du Pb, Cd, Ni, Zn, Cu, Hg) ;
- Des envols de poussières ;
- Des effluents liquides ou gazeux produits par les industries.

Certains déchets placés au sein de l'entreprise ne constituent pas une contamination lors de l'activité de l'industrie mais peuvent le devenir lorsque le terrain devient une friche pouvant être réutilisée.

2.3.2.2.3 Zones de proximité d'activités industrielles et urbaines

La contamination de proximité se produit dans l'environnement des zones d'activités : industrie, lieux d'habitation, zones de tourisme ou de loisir, infrastructure de transport, etc. Il y a lieu de prendre en compte les possibilités de contamination suivantes (Bourrelier et *al.*, 1998) :

- Déchets collectés ou sauvages : décharge de déchets urbains bruts, déblais, etc.
- Contamination en provenance des stations d'épurations.
- Dragage des sédiments des canaux et des ports.

2.3.2.2.4 Sites miniers

La concentration en éléments métalliques est très importante ce qui en fait un cas particulier. Les risques résultent de l'érosion et de la présence de sulfures (pyrites) (Bourrelier et *al.*, 1998).

2.3.2.2.5 Apports de l'agriculture

L'agriculture applique sur les sols de nombreux produits permettant d'améliorer la fertilité du sol. Parmi ceux-ci, on identifie les déchets animaux, les boues résiduelles, les fertilisants et pesticides (Quevy et *al.*, 1990).

- Les déchets d'animaux : ce sont des lisiers de veaux, de volailles et surtout de porcs qui contiennent le plus d'éléments traces métalliques. On utilise des produits fongiques et des additifs salins (facteur de croissance) qui augmentent la teneur en élément traces métalliques dans les fèces et les urines.
- Les boues résiduaires : malgré les éléments favorables (azote, phosphore) qu'elles contiennent, elles sont également source de nombreux éléments traces métalliques.
- Les fertilisants : les engrais calcaires, azotés inorganiques et potassiques sont pauvres en éléments traces métalliques. Tandis que les engrais phosphatés et composés contiennent parfois des concentrations élevées en éléments traces.
- Pesticides : les utilisations de pesticides répétées ou en quantités importantes, peuvent provoquer une accumulation métallique dans les sols. Les fongicides constituent le plus gros problème.

2.3.2.2.6 Les exportations par les récoltes

Les activités humaines prélèvent des éléments traces métalliques, il s'agit d'une rupture du cycle biogéochimique par exportation des récoltes. Des éléments traces sont exportés dans les aliments ou dans des matériaux à utilisation industrielle. Dans la plupart des cas, les résidus ou déchets générés ne seront pas épandus sur le lieu exact de leur prélèvement. Ce type d'apport n'apporte qu'une concentration infime de ce que l'on peut retrouver dans les sols (Baize, 1997).

2.3.3 Les éléments traces dans le sol

Les éléments traces métalliques peuvent se retrouver dans six compartiments du sol (Baize, 1997) :

- Inclus dans les réseaux cristallins des minéraux primaires (minéraux non altérés, hérités de la roche-mère) et des constituants secondaires (minéraux résultant de l'altération pédogénétique) ;
- Adsorbés sur les phases hydroxylées du fer, de l'aluminium et du manganèse ;
- Séquestrés dans des résidus végétaux ou animaux ;
- Complexés ou inclus dans les macromolécules organiques ;
- Sous une forme échangeable (cations ou anions), associés aux surfaces des minéraux argileux et aux matières organiques ;
- Sous une forme soluble, colloïdale ou particulaire dans la solution du sol.

En permanence, mais à des vitesses variables, les éléments passent d'une forme à une autre sous l'influence de facteurs externes (modification de pH, degré d'aération, d'hydratation, d'environnement chimique, etc.). *La mobilité est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie dans un autre, où il est retenu avec une énergie moindre. La biodisponibilité est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant* (Baize, 1997).

Les risques associés aux sols contaminés, aux contaminations de la chaîne alimentaire et à la phytotoxicité, sont étroitement liés à la biodisponibilité des éléments toxiques. *La phytodisponibilité peut être définie comme la quantité d'un élément donné qui peut être transférée dans la plante durant son développement* (Bourrelier et al., 1998). C'est aussi l'ensemble des processus qui facilitent ce transfert :

- Fourniture de l'élément à la solution du sol ;
- Transport des éléments par advection ou diffusion vers les surfaces racinaires, suivi de son transport et de sa distribution à l'intérieur du végétal.

La phytodisponibilité est contrôlée par des facteurs liés au sol (forme chimique de l'élément, réactivité, composition du sol (argiles, matière organique, pH)), à la plante (aptitude à prélever, transférer et accumuler l'élément) et aux conditions climatiques (température et humidité) (Bourrelier et al., 1998).

2.3.4 Eléments analysés dans le cadre de ce travail

2.3.4.1.1 Cuivre (Haubert et al., 1971 ; Baize, 1997 ; Sillanpää, 1979)

Dans les roches, le cuivre a une affinité particulière pour les sulfures où il accompagne souvent le fer (chalcopyrite). Les teneurs les plus élevées seraient observées dans les roches magmatiques basiques riches en minéraux ferro-magnésiens (péridote, micas noirs, pyroxènes). Les roches granitiques contiennent beaucoup moins de cuivre. Parmi les roches sédimentaires, argiles et schistes présentent des concentrations plus fortes que les roches comme les grès ou les sables. Les apports anthropogènes résultent de trois groupes d'activités :

- Sources agricoles : traitements fongicides ;
- Sources industrielles : contaminants qui accompagnent le zinc, le plomb, le cadmium dans les activités métallurgiques des métaux non ferreux ;
- Sources urbaines : boues de station d'épuration, compost d'ordures ménagères.

Il semble que la toxicité n'ait qu'une importance locale, limitée en particulier à des sites pollués par une exploitation minière ou par accumulations de résidus de pulvérisation.

La teneur moyenne de la lithosphère est environ 100 mg/kg (Vinogradov, 1959 ; Turekian et *al.*, 1961 ; Kovda et *al.*, 1964). Les variations sont dues principalement aux teneurs différentes des roches-mères sur lesquelles les sols se sont formés et aux différents types de sol qui correspondent aux différences existant entre les principales zones climatiques et régions géographiques. Leurs concentrations dépendent aussi du pourcentage en humus, de la matière organique, de l'argile, du pH et de l'association avec d'autres éléments. Les sols à pH basique ou neutre, riche en humus, ont plus de cuivre que les sols acides. Les toxicités sont éliminées par chaulage et apport de matière organique. Le cuivre est réputé pour être peu mobile sauf dans les conditions extrêmes d'acidité ou de gleyification. Il semble que dans les sols cultivés très pauvres en argile, sableux ou limoneux, les apports massifs opérés en surface soient capables de migrer en profondeur. Selon Baize (1997), le seuil actuel de la norme AFNOR U 44 041 fixé à 100 mg/kg est placé trop haut pour signaler des anomalies qu'elles soient naturelles ou anthropiques. Le seuil ne peut servir que de « signal d'alerte » pour envisager une étude plus détaillée. La teneur en Cu se situe généralement entre 5 et 25 mg/kg dans la plupart des plantes normales, mais elle varie selon les parties de la plante, les espèces, le degré de maturité, les sols, etc.

2.3.4.1.2 Cobalt (Haubert et *al.*, 1971 ; Baize, 1997.)

Le cobalt est présent à forte concentration (100 à 200 mg/kg) dans certaines roches magmatiques basiques ou ultrabasiques (gabbros, péridotites) mais sa teneur serait seulement de 1 à 15 mg/kg dans les roches acides et de 0,1 à 20 mg/kg dans les roches sédimentaires (Juste et *al.*, 1995). La teneur des sols en cobalt total varient dans de larges proportions : 0,05 mg/kg à 300 mg/kg. La teneur totale moyenne est d'environ 10 à 15 mg/kg.

Dans les sols, les concentrations en cobalt varient, d'une part en fonction de celles des roches et d'autre part en fonction des types de sol, dont les caractéristiques sont en rapport étroit avec le climat qui a dominé leur évolution. L'altération des minéraux, libère du Co^{2+} et du Co^{3+} qui sont assez mobiles en milieu oxydant et acide. Dans le cas des sols ferrallitiques, d'autres facteurs que les roches mères interviennent pour déterminer la concentration en cobalt. Ils peuvent correspondre à la présence de certains horizons ou à un état plus ou moins poussé de dégradation du sol. Il existe une relation nette entre les teneurs en cobalt et celle en humus et en matière organique. Le cobalt paraît être fixé à l'humus et peut être adsorbé sur les oxydes de fer et de manganèse. D'autre part, le cobalt est adsorbé sur les minéraux argileux et sa distribution dans le profil suit aussi celle des argiles, les sols à texture fine en sont plus riches que ceux à texture grossière. La quantité de cobalt extractible et son absorption par des végétaux seraient supérieures à partir de sols médiocrement drainés que de sols bien drainés (Sillanpää, 1979).

2.3.4.1.3 Plomb (Haubert et *al.*, 1971 ; Baize, 1997 ; Sillanpää, 1979)

La concentration moyenne de la croûte terrestre serait de l'ordre de 13 à 16 mg/kg. Les schistes noirs, riches en pyrites et en matière organique, seraient riches en plomb (30 mg/kg). On peut mettre du plomb en évidence dans toutes les roches de l'écorce terrestre :

- Roches éruptives basiques (basalte, gabbro) : 8 mg/kg ;
- Roches éruptives acides (granite, rhyolite) : 20 mg/kg ;
- Même ordre de grandeur pour les roches intermédiaires (andésite), dans les roches métamorphiques (schistes) et dans certaines roches sédimentaires (argiles) : 15 à 20 mg/kg ;
- Les grès et les calcaires : 7 à 10 mg/kg.

Les sols sont souvent plus riches en plomb que les roches dont ils dérivent. La teneur moyenne est de 15 à 25 mg/kg. Les apports anthropogènes résultent de cinq groupes d'activités :

- Utilisation de composés organo-métalliques comme anti-détonnant dans les moteurs à essences ;
- Les sources industrielles : le plomb est libéré dans l'atmosphère à cause des usines qui traitent directement le minerai ou autres ;
- Les déblais de mines et les poussières de crassiers ;
- Les sources urbaines : boues de station d'épuration ;
- Certains traitements pesticides à base de plomb.

D'après Juste et *al.*, 1995, le plomb serait le micro-polluant le moins mobile dans le sol. Cette faible mobilité est due en grande partie à cause de la complexation par les substances humiques. La grande affinité de la matière organique vis-à-vis du plomb expliquerait l'accumulation préférentielle de ce métal dans l'horizon de surface des sols. La teneur varie aussi en fonction de la teneur en argile. Dans les sols tropicaux, on a montré que le plomb a tendance à augmenter en même temps que l'argile, en fonction de la profondeur de l'horizon. Le plomb serait aussi l'un des métaux les moins facilement transférés dans les parties aériennes des plantes. Les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg/kg tandis que les sols situés loin des centres urbains et industriels seraient affectés par des contaminations comprises entre 30 et 100 mg/kg. Le pH du sol est un des facteurs qui influence le plus la mobilité et la biodisponibilité du plomb. Plus le pH est faible, plus le degré de désorption dans la solution du sol est fort. D'après Baize (1997), le seuil de la norme AFNOR U 44 041 est fixé actuellement à 100 mg/kg. Cette valeur est placée beaucoup trop haut pour signaler des anomalies, qu'elles soient naturelles ou anthropiques.

2.3.4.1.4 Zinc (Haubert et *al.*, 1971 ; Baize, 1997 ; Sillanpää, 1979)

La plupart des roches de l'écorce terrestre renferme du zinc, les teneurs étant plus ou moins fortes selon la nature de la roche :

- Roches éruptives basiques (basalte, gabbro) : 70 à 130 mg/kg ;
- Roches éruptives acides (granite, diorite) : 50 à 60 mg/kg ;
- Roches métamorphiques (schistes) et certaines roches sédimentaires (argiles) : 80 mg/kg ;
- Limons lœssiques et argiles glaciaires : 30 à 40 mg/kg ;
- Roches carbonatés et aux grès : 20 et 16 mg/kg respectivement.

Le domaine de variation des concentrations des sols en Zinc total est très étendu. Les limites extrêmes sont d'une part des traces, de l'autre 900 mg/kg (Haubert et *al.*, 1971). La teneur moyenne est de l'ordre de 50 à 100 mg/kg. Le zinc est présent le plus souvent sous forme de sulfure dans des filons hydrothermaux et des gîtes stratiformes imprégnant des roches sédimentaires où ils sont associés au Plomb, au Fer et au Cuivre. Les apports anthropogènes résultent de trois groupes d'activités :

- Les sources minières et industrielles : traitement du minerai, raffinage, galvanisation du fer, gouttières, toitures, fabrication de piles électriques ;
- Les épandages agricoles : le zinc est ajouté à l'alimentation des animaux, surtout du porc, et se retrouve en abondance dans le lisier.
- Nombreuses activités urbaines et le trafic routier libèrent du zinc dans l'environnement.

Selon Juste et *al.*, 1995, le zinc est considéré comme facilement soluble, comparé aux autres métaux traces dans les sols. Il serait très mobile et disponible dans les sols légers acides. Parmi les cas de contamination superficielle, rares sont ceux où le zinc a migré en profondeur. Dans le cas des sols non calcaires, affectés ou non par l'illuviation d'argile et de fer, la concentration en zinc est nettement corrélée aux teneurs en fer et en argile. Les teneurs en cet élément augmentent en même temps que celle en humus et matière organique. Il n'existe pas de différences essentielles entre les divers types de sol des différentes zones climatiques. Les toxicités sont évitées par un chaulage. Les teneurs en Zn des végétaux sont comprises entre 20 et 100 mg/kg en poids sec, mais varient en fonction de l'espèce végétale ainsi qu'avec les organes des plantes. Selon Baize (1997), le seuil actuel de la norme AFNOR U 44 041 fixé à 300 mg/kg, il est comme les autres éléments présentés ci-dessus, beaucoup trop haut pour signaler la plupart des anomalies.

2.3.4.1.5 Cadmium (Baize, 1997 ; Alloway, 1990)

Le cadmium serait présent dans toutes les roches mais plus abondant dans les roches sédimentaires que dans les roches magmatiques, et plus abondant dans les sédiments riches en carbone, sulfures et phosphates. Les apports anthropogènes résultent de trois groupes.

- Les épandages et amendements agricoles : il peut être assez abondant dans les engrais phosphatés. Il en est apporté aussi par épandage de déchets d'élevage, lors du chaulage, etc. ;
- Les sources industrielles : le cadmium est un sous-produit du raffinage du zinc, il peut être libéré dans l'atmosphère lors de la métallurgie du fer et de l'acier, lors de l'affinage du plomb, etc. ;
- Nombreuses activités urbaines et le trafic routier libèrent du cadmium dans l'environnement : incinération de déchets domestiques ; combustion de carburant ; combustion des carburants fossiles (pétrole, charbon, tourbe) ; boues de station d'épuration ; piles.

La rétention en cadmium de la phase solide croît exponentiellement avec les pH croissants. Le cadmium redistribué vers la profondeur serait associé à de petites particules minérales et organiques et à des fractions colloïdales. Il pourrait être redistribué latéralement par ruissellement, sous les mêmes formes. Le cadmium des apports anthropiques représente plus de risques que le cadmium naturel, souvent immobilisé sous des formes relativement inertes. D'après Baize (1997), le seuil actuel de la norme AFNOR U 44 041, fixé à 2,0 mg/kg, peut servir de signe d'alerte mais ne peut pas détecter l'ensemble des anomalies car il est placé trop haut.

2.3.5 La problématique des éléments traces

Le programme INRA-ASPITET a analysé environ 1800 valeurs pour évaluer la variabilité des teneurs naturelles en éléments traces métalliques dans les sols français. Ces teneurs totales sont mesurées sur l'ensemble des horizons. La moyenne des cinq éléments analysés dans le cadre de cette étude est de 0,48 mg/kg pour le cadmium, 12,2 mg/kg pour le cobalt, 13,5 mg/kg pour le cuivre, 31,6 mg/kg pour le plomb et 72 mg/kg pour le zinc.

Lounamaa (cité par Duvignaud et *al.*, 1963) a observé quant à lui des teneurs en cuivre allant de 50 à 300 mg/kg en Finlande sur des sols « normaux ». Les teneurs moyennes en cobalt de plusieurs pays du monde varient généralement entre 2 et 27 mg/kg, avec des valeurs maximales allant jusqu'à 275 mg/kg en Italie (Kabata-Pendias et *al.*, 2001). Dans beaucoup de pays du monde, le zinc dans le sol se trouve en moyenne à des teneurs allant de 17 à 236 mg/kg mais peut atteindre 722 mg/kg au Japon (Kabata-Pendias et *al.*, 2001). Le cadmium est un élément que l'on trouve généralement en très faible quantité dans le sol, à des moyennes allant de 0,06 à 1,10 mg/kg avec des maximums pouvant atteindre 2,7 mg/kg en Roumanie (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). Les teneurs naturelles en plomb d'un sol proviennent généralement d'un héritage du matériau parental mais, à cause de la large diffusion de la pollution, la plupart des sols connaissent un enrichissement en ce métal (gaz d'échappement), spécialement dans les horizons superficiels. Ainsi, les teneurs en plomb de beaucoup de sols varient de 7,9 à 84 mg/kg, avec des teneurs pouvant atteindre 286 mg/kg en Pologne (tableau 1) (Kabata-Pendias et *al.*, 2001).

Duvignaud et Denaeyer-De Smet (1963) ont montré qu'on pouvait atteindre des teneurs de l'ordre de 9000 à 60000 mg/kg de cuivre sur des sols colluviaux et des déblais de carrière à la mine de l'Etoile (Nord-Est de Lubumbashi). D'après Duvignaud et Denaeyer-De Smet (1963) et Leteinturier, les « collines intactes » présentes souvent un gradient de teneurs en cuivre du sommet au piémont. Les minéralisations sont présentes sur les sommets sous forme d'écaillés quartzitiques plus résistantes que les formations schisteuses environnantes. La nature lithologique du matériel parental influence les teneurs en éléments traces métalliques. Les minéraux exploitables sont la malachite, la sphaerocobaltite et d'autres.

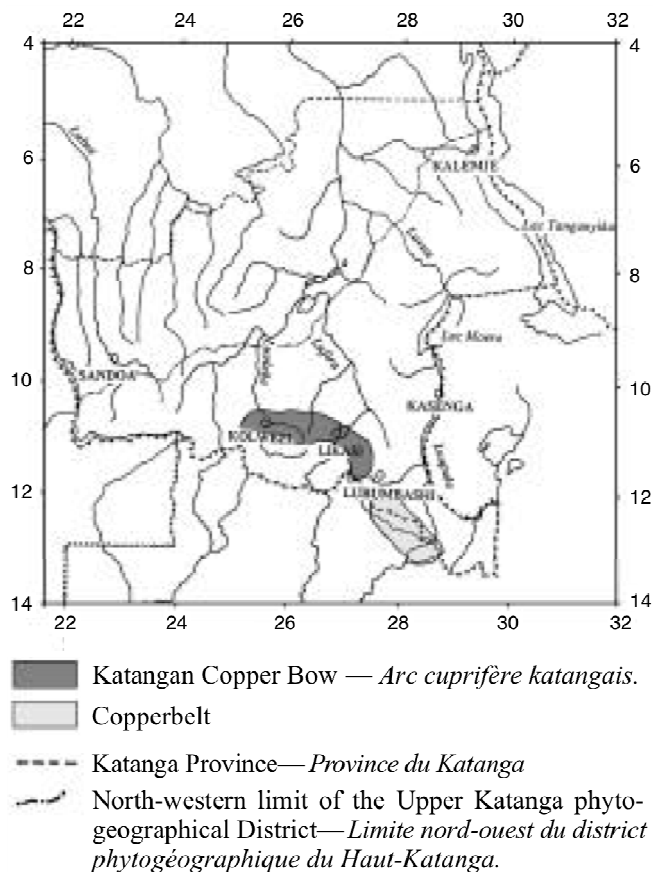
**Tableau 1 : Contenu des roches en éléments traces (en mg/kg)
(Kabata-Pendias *et al.*, 1992)**

Éléments	Roches magmatiques			Roches sédimentaires		
	Roches basiques	Roches intermédiaires	Roches acides	Roches argiluses sableuses	Grès	Carbonates
Cd	0,13-0,22	0,13	0,09-0,20	0,22-0,30	0,05	0,035
Co	35-50	1,0-10	1-7	11-20	0,3-10	0,1-3,0
Cr	170-200	15-50	4-25	60-100	20-40	5-16
Cu	60-120	15-80	10-30	40	5-30	2-10
Hg	0,0x	0,0x	0,08	0,18-0,40	0,04-0,10	0,04-0,05
Mn	1 200-2 000	500-1 200	350-600	500-850	100-500	200-1 000
Mo	1,0-1,5	0,6-1,0	1-2	0,7-2,6	0,2-0,8	0,16-0,40
Ni	130-160	5-55	5-15	50-70	5-20	7-20
Pb	3-8	12-15	15-24	18-25	5-10	3-10
V	200-250	30-100	40-90	100-130	10-60	10-45
Zn	80-120	40-100	40-60	80-120	15-30	10-25

2.4 La végétation du Katanga

2.4.1 Généralités

Au Katanga, on observe un système de massifs cuprifères formant des collines arrondies, isolées ou alignées en chaînes, qui s'étend sur plus de 400 km de longueur (figure 4).



**Figure 4 : Arc cuprifère katangais et Copperbelt zambienne
(Leteinturier *et al.*, 1999a)**

La forêt claire à *Brachystegia* appelée *miombo*- est le biome dominant, elle couvre plus de 70% du territoire (Leteinturier et al., 1999b). On retrouve également des savanes steppiques. Elles sont présentes sur les hauts plateaux sablonneux, dans les *dembos* - vallées larges et plates, inondées 2 à 4 mois par an, et sur les affleurements de minerai (Baker et al., 1983).

Le sud-est de la RDC relève du territoire phytogéographique zambézien (Leteinturier et al., 1999). Cependant, sa flore offre plusieurs caractères particuliers qui l'individualisent (Malaisse, 1995). En particulier, les divers ETM présents ont nettement influencé la végétation. Une flore cupricole particulière s'est ainsi développée au Katanga, sur des sols dont la teneur totale en cuivre va de 500 à 100 000 mg/kg. (Duvigneaud et al., 1963).

Cette flore métalloyte, constituée principalement de graminées et d'annuelles, comprend quelques 540 taxons (Leteinturier et al., 1999b). On observe une spécification importante par l'isolement écologique et géographique (Duvigneaud et al., 1963). De fait, 35 espèces endémiques ont été recensées (six autres se sont éteintes suite à l'exploitation de leur gisement). Elles sont souvent cantonnées à un gisement ou à quelques collines, ce qui est en opposition avec la flore du Shaba, elle-même hautement endémique, mais présente sur une aire large et avec peu d'espèces rares (Leteinturier et al., 1999b). La variabilité au sein d'une espèce peut également être très importante, avec des populations fortement différenciées, voire des sous-espèces. Le Katanga offre ainsi la plus riche flore cuprifère-cobaltifère au monde (Brooks et al., 1992). C'est le seul endroit sur terre où on trouve des hyperaccumulateurs (voir définition plus avant) de cuivre ou de cobalt (Leteinturier et al., 1999b). 28 hyperaccumulateurs de cuivre et 24 de cobalt sont actuellement connus, dont 6 qui hyperaccumulent les deux éléments, comme *Haumaniastrum katangense*, *Aeolanthus biformifolius* ou *Lindernia perennis* (Brooks et al., 1992 -Leteinturier et al., 1999b).

2.4.2 Flore métallicole

Duvigneaud et Denaeyer-de Smet (1963) classent les espèces métallicoles comme suit:

- métalloytes: spécifiques, vivent presque exclusivement sur les gisements, tout au moins localement. On peut distinguer les eumétalloytes, qui sont des spécialistes absolus ou quasi absolus et les métalloytes locaux, qui poussent sur des sols très riches en éléments traces métalliques dans une région particulière, mais existent également dans des biotopes non minéralisés dans des régions phytogéographiques distinctes.
- métalloyphiles: espèces non spécifiques, mais qui manifestent cependant une certaine préférence pour un ETM, à des teneurs supérieures à la normale.
- métalloyrésistantes: dans la même région, présentes à la fois sur sols normaux et sols métallifères. Résistent à des concentrations relativement fortes en cuivre.
- métalloyfuges : leur écologie est voisine de certains métallicoles quant aux autres facteurs du milieu, mais elles sont absentes en présence d'ETM.

Concernant la flore du cuivre, ils opèrent une distinction supplémentaire dans les eucuprophytes:

- polycuprophytes : localisés essentiellement sur des sols très riches en cuivre, au moins 5000 mg/kg.
- oligocuprophytes : espèces ayant leur optimum écologique sur des sols à quantité de cuivre environ 10 fois supérieure à la normale: 2000-5000 mg/kg en cuivre.
- eurycuprophytes : présentes sur une très vaste échelle de concentration en cuivre, cas peu fréquent.

2.4.3 Formations végétales des gisements métallifères

Il y a environs 100 gisements de cuivre et cobalt au Katanga. Ils occupent une aire totale d'environ 20 km², et sont dispersés sur les 20 000 km² de l'arc cuprifère shabien (Malaisse et al., 1983) (Figure 5).

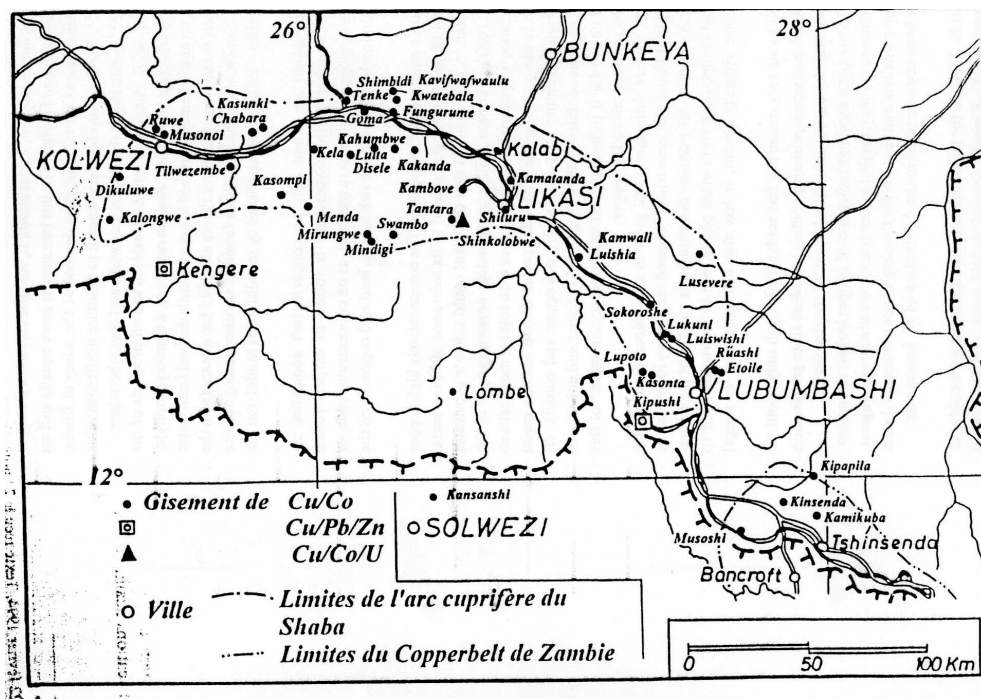


Figure 5 : L'arc cuprifère shabien et les principaux gisements métallifères (Leteinturier et al., 1999b)

Les affleurements métallifères se présentent sous forme de collines arrondies. Le ruissellement et l'érosion latérale ont enlevé chaque année des quantités importantes de cuivre, qui s'est répandu dans les plaines environnantes, s'y accumulant suivant un gradient de concentration décroissant. Les zones les plus riches présentent la même absence de ligneux que les collines elles-mêmes, et sont appelées « dembo d'empoisonnement » (Duvigneaud et al., 1963).

La zonation des groupements végétaux s'effectue donc sous la dépendance des facteurs topographiques, avec le cuivre comme facteur déterminant. La disposition spatiale des groupements végétaux présents sur les gisements sera la même, quel que soit l'élément dominant dans le sol. Ainsi, une colline métallifère est toujours entourée d'une auréole de contamination portant une steppe à *Loudetia simplex*, *Monocymbium ceresiiforme*, *Tristachya spp*, *Cryptosepalum*, etc. (Duvigneaud et al., 1963).

L'effet du manganèse sur les formations végétales semble moins restrictif que celui du cuivre. En effet, la flore des sols manganifères est beaucoup plus riche et variée que celle des sols cuprifères. Il existe également une végétation cobalticole. Les minerais (zinc et plomb) ont un effet très marqué sur les végétaux. Lorsqu'ils sont présents à forte dose, on n'observe plus qu'une seule espèce: *Ascolepis metallorum* (Duvigneaud et al., 1963).

Duvigneaud et Denaeyer-de Smet (1963) reconnaissent plusieurs types de formations, suivant un gradient décroissant de toxicité du sol:

- La pelouse : formation ouverte, pelouse basse essentiellement composée de graminées vivaces (les dominantes les plus fréquentes appartenant aux genres *Sporobolus*, *Eragrostis*, *Monocymbium* et *Andropogon*), de Cypéracées (*Bulbostylis*, *Ascolepis*) et Dicotylédones annuelles (*Haumaniastrum*, *Crotalaria*) auxquelles s'ajoutent des Monocotylédones à corne ou à bulbe (*Gladiolus*, *Lapeyrousia*, *Eriospermum*, *Dasystachis*) ou des dicotylédones vivaces à épaisse souche souterraine (*Icomum*, etc.) . Il s'agit du biotope primaire et original des polycuprophytes. Le plus souvent surmonté d'une strate semi-ligneuse, dense ou dispersée, faisant jusqu'à 1 m de haut, constituée de diverses espèces de Velloziacées (une espèce par colline cuprifère, généralement *Xerophyta equisetoides*).
- La steppe : formation fermée, plus drue, à *Loudetia*, *Tristachya*, *Andropogon* et nombreux autres genres de Graminées. Elle se caractérise par un géofrutex du genre *Cryptosepalum*, associé à des plantes vivaces à bulbe, à corne (*Haumaniastrum*, *Commelina*, etc.) ou à souche lignifiée formant souvent des cespites de tiges rameuses et enchevêtrées. On observe des Cypéracées (*Bulbostylis filamentosa-laniceps-zambesica*, *Cyperus tenax*, *Scleria* sp, ...). Certaines espèces sont aussi présentes sur pelouse à *Eragrostis* des sols plus riches en cuivre. (*Monocymbium ceresiiforme*, *Andropogon dummeri*, ...) Groupement peu ou pas arbustif.
- Le bosquet à *Uapaca robynsii*. C'est un arbuste de 2-3 m, qui ne tolère que de faible dose de cuivre.
- La brousse enrochée (la steppe enrochée, à *Xerophyta* spp.), à petits arbres, arbustes et broussailles diverses: visible sur les collines rocheuses à peine minéralisées. C'est une brousse arbustive assez dense, formant un taillis de 3-4m de haut, avec des espèces saxicoles des roches dures. L'espèce ligneuse la plus caractéristique est *Dichaetanthera schuilingiana*. Il semble que la très faible teneur en cuivre suffise à empêcher le développement de la forêt claire climax. Lorsqu'ils sont stabilisés, ces groupements appartiennent à des associations régionales qui sont des climax édaphiques.

- Les remblais, déblais et tas de minerais provenant de travaux miniers présentent des concentrations encore plus élevées que la terre des pelouses cuprifères. Peu tassés, ils sont colonisés par des « éphémérophytes cupricoles », qui forment parfois des groupements d'*Haumaniastrum (robertii* ou autre) et/ou de *Bulbostylis*, le plus souvent mixtes. Dans les derniers stades de colonisation, il y a apparition de graminées sociales cuprorésistantes mais non spécialistes : *Monocymbium*, *Alloteropsis*, *Brachyachne* (Duvigneaud et Al., 1963). A cette pelouse d'annuelles succède généralement, alors que le sol se tasse, la pelouse à *Eragrostis*, bientôt envahie par *Monocymbium*, *Andropogon*, *Diheteropogon*, on aboutit finalement à une végétation équilibrée qui rappelle celle de la pelouse cupricole naturelle (Duvigneaud et al., 1963).

L'aspect de la pelouse dépend donc du degré d'action humaine encourue, du tassement du sol, du stade de la succession, de la teneur en cuivre et en fonction des autres conditions écologiques (compacité, charge caillouteuse, pente, humidité, richesse en éléments fins, ...). Le tapis végétal de sols à forte teneur en ETM peut être fluctuant (Duvigneaud et al., 1963).

Sur les talus de malachite entourant les anciens puits de prospection, on retrouve des arbustes appartenant à la flore des grandes termitières du miombo : *Ficus sp.*, *Allophylus sp.*, *Clerodendron sp.*, *Ampelocissus sp.*, etc. (Duvigneaud et al., 1963). Ces espèces rudérales du cuivre (et les groupements cupricoles qu'elles forment) n'appartiennent pas à la végétation naturelle du cuivre, et ne se trouvent jamais dans les groupements cupricoles stabilisés.

2.4.4 Végétation au voisinage de la cheminée Gécamines

Dans les quartiers entourant le site de la Gécamines, on retrouve des espèces végétales telles que *Bulbostylis pseudoperennis*, *Bulbostylis cupricola*, *Equisetum ramosissimum*, *Haumaniastrum katangense* ainsi que *Haumaniastrum robertii* et *Crepidiorhopalon dambloni*. On peut également en observer aux alentours du cimetière des pionniers et du jardin zoologique. En 1963, Duvigneaud mentionnait déjà de vastes étendues de pelouses monophytiques rases de *Bulbostylis pseudoperennis* au sud-est de Lubumbashi, suite aux retombées atmosphériques de la cheminée. Ces plantes indiquent de fortes teneurs en ETM (particulièrement cuivre et cobalt) dans les sols. En effet, elles peuvent être présentes sur des sols à teneur en cuivre, cobalt et nickel allant respectivement jusqu'à 5500, 9900 et 9800 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de sol séché au four (Leteinturier et al., 1999a ; Malaisse et Brooks cités par Brooks, 1998). En outre, ces espèces sont souvent les seules, avec d'autres plantes métallophiles, à pouvoir se développer sur des substrats considérés comme stériles.

3 Méthodologie

L'industrie minière située au centre de Lubumbashi est source potentielle de pollution, les éléments traces se sont déposés par voie aérienne sur le plateau de la Gécamines. La démarche qui a été employée dans le cadre de ce travail a pour but de replacer le sol dans son contexte naturel et de le mettre en relation avec la roche-mère, le relief et l'occupation des sols. Il s'agit d'une démarche géomorphopédologique qui tente de comprendre les sols dans leur environnement général et d'apprécier leurs caractéristiques et leur organisation à l'aide de l'analyse des sondages, profils et miniprofils. Ces caractéristiques observées à la Gécamines seront comparées à des sols se retrouvant sur des sites non ou peu contaminés. Ces derniers ont été choisis pour exprimer un maximum de similitude avec les sites contaminés.

3.1 *Méthodologie de terrain*

3.1.1 **Traitements des documents existants**

Tout d'abord, à l'aide de la carte pédologique et du plan de la ville, nous avons effectué un premier recensement des sites à observer. Un maillage a aussi été réalisé par un doctorant et ces résultats nous ont permis de nous donner une idée sur les différents paramètres à évaluer dans le cadre de cette étude. La localisation de la zone d'étude par rapport à la ville de Lubumbashi est illustrée à la figure 6.

Ensuite, sur base de la carte pédologique (1/60000), nous avons établi la diversité des sols retrouvés au sein de la zone d'étude ainsi que les toposéquences à effectuer sur le terrain. Les différents sols sont appelés respectivement série Kaponda (terres rouges tropicales faiblement décolorés), série Baya (terres jaunes tropicales), série Musaonga (terres jaunes tropicales) pour les sols zonaux. Les sols intrazonaux sont au nombre de deux : la série Mutwale (sols gris hydromorphes) et la série Lubumbashi (sols des marais). La série Katuba est un sol azonal caractérisé par des substrats graveleux et latérites en voie de démantèlement.

3.1.2 **Reconnaissance sur le terrain**

Cette phase a pour but de confirmer les hypothèses posées par le traitement des documents existants. Dans un premier temps, le site de la Gécamines a été observé pour distinguer les différents types de sol et les différents reliefs retrouvés dans nos deux toposéquences.

La première étant la toposéquence partant de la cheminée de la Gécamines jusqu'au plateau Karavia. Le relief est composé d'un versant, du plateau de la Gécamines, d'un versant, de la rivière Karavia et enfin du plateau de la Karavia. Cette toposéquence fait environ 10 km. La deuxième suit le tracé de la rivière Karavia ainsi que celui de son affluent. Dans un deuxième temps, les toposéquences seront comparées avec des toposéquences effectuées sur des sites non ou peu contaminés. Ces toposéquences sont au nombre de trois : Kiswishi, Kansebula, Kasapa. Ces sites ont été choisis en fonction de la connaissance du terrain ainsi que pour les caractéristiques semblables au sol de la Gécamines. Quelques sondages ont été réalisés au sein de chaque ensemble afin d'en observer les caractéristiques principales.

3.1.3 Phase de terrain

Chacun des sondages effectués a été décrit suivant une fiche de sondage, établie par le laboratoire de Géopédologie de la faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux (FUSAGx) (Annexe 1). Elle permet de n'oublier aucun élément essentiel à la description du sondage. La première partie de cette fiche reprend diverses rubriques, permettant de replacer le sondage dans son contexte environnemental : localisation (à l'aide du GPS), géomorphologie, végétation, occupation des terres, influences humaines ainsi que des photographies qui permettent d'illustrer ce sondage. La seconde partie est réservée à une description plus approfondie de chaque horizon du sol reprenant la couleur (charte Munsell), la charge et les tâches présentes ainsi que le pH (kit de terrain).

La description des profils a été réalisée à l'aide des fiches conçues par l'unité de Géopédologie de la FUSAGx. Ce descriptif reprend les caractéristiques des fiches de sondages ainsi que d'autres critères tels que la porosité, les racines, les éléments secondaires, la structure et d'autres caractéristiques qui nous permettent d'approfondir notre étude du site en vue d'une caractérisation des sols.

Les miniprofils ont été définis comme étant des profils de 40 à 50 cm caractérisés par des fiches de sondages mais certains paramètres ont été rajoutés en vue d'une meilleure description. Ces paramètres sont au nombre de trois : la structure ; la porosité (taille, abondance) ; les racines (taille et abondance) (Annexe 1).

Chaque horizon a été échantillonné pour une étude plus détaillée du site. Ces études seront réalisées au laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx. Au total, deux cent cinquante six échantillons ont été prélevés pour analyse ultérieure.

3.2 Méthodologie de laboratoire

3.2.1 Conditionnement des échantillons

Chaque échantillon récolté sur le terrain a été séché à l'air et émotté en vue d'un tamisage à 2 mm dans le Laboratoire de l'université de Lubumbashi (UNILU). Le tamisage a été effectué au Laboratoire de l'UNILU sur un tamis de 2 mm. Chaque échantillon et son refus ont fait l'objet d'une pesée sur une balance à deux décimales en vue de l'estimation de la charge grossière. Enfin, les échantillons ont été emballés pour être envoyés au Laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx où une aliquote a été broyée à 200 µm. Tous les échantillons ont été réceptionnés et identifiés par une référence unique, ils ont aussi été conditionnés dans des boîtes hermétiques préservant ainsi leur atmosphère d'un taux d'humidité trop élevé.

3.2.2 Analyses réalisées

Les 256 échantillons récoltés ont fait l'objet des analyses suivantes :

- pHeau et pHKCl ;
- Carbone organique total ;
- Acidité d'échange pour les échantillons ayant un pHeau < 4,9 (seuil choisi pour garder un nombre d'échantillons raisonnables) ;
- Azote total pour les échantillons ayant un pourcentage de carbone organique total > à 0,8% ;
- Humidité résiduelle.

Le temps disponible et les moyens financiers pour accomplir les déterminations n'étaient pas suffisants pour effectuer l'ensemble des analyses sur tous les échantillons prélevés. C'est pourquoi, nous avons réduit le nombre d'échantillons à analyser, néanmoins les échantillons repris pour les analyses essaient d'être les plus représentatifs possible de la diversité des sols rencontrés. Ces échantillons ont été choisis en fonction des observations sur le terrain et des premières analyses de laboratoire (pH, carbone organique total). Il fallait représenter l'ensemble des sols rencontrés dans les deux toposéquences ainsi que la variabilité au sein de celles-ci. Des échantillons des toposéquences réalisées sur des sols non ou peu contaminés ont aussi été repris pour une future comparaison entre les sites contaminés et ceux non ou peu contaminés.

Au total, 69 échantillons ont été sélectionnés et ont subi les analyses supplémentaires suivantes :

- Analyse granulométrique ;
- Capacité d'échange cationique ;
- Eléments échangeables à l'acétate ammonique à pH 7 (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺, Cu⁺⁺) ;
- Eléments totaux (Cd, Cu, Zn, Co, Pb, Mg, Mn, Al, Fe, Ca, Na, K).

Les résultats ont été intégrés dans un tableau récapitulatif qui nous a permis de distinguer quels prélèvements étaient les plus représentatifs de la zone d'études. (Annexe 2).

3.2.3 Méthodes de laboratoire

Duchaufour et *al.*, 1997 ; Baize, 1997 ; Baize, 2000 ; Laroche et *al.*, 1999 ; Page et *al.*, 1988.

3.2.3.1 Humidité relative

Le dosage de l'humidité résiduelle s'effectue au départ de 5 g de terre, séchée à l'air, tamisée à 2 mm et pesée sur balance analytique (quatre décimales). La différence de poids entre l'échantillon frais c'est-à-dire séché à l'air et l'échantillon sec passé à l'étuve (105°C) donnera le pourcentage d'humidité présente dans une terre ou l'humidité résiduelle.

3.2.3.2 pH_{eau} et pH_{KCl}

Vingt grammes de terre tamisée à 2 mm sont agités dans 50 ml d'extractif (H₂O ou KCl 1 N) durant deux heures. Après centrifugation (10 minutes), la mesure est effectuée dans le surnageant au moyen d'un pH mètre (Laroche et *al.*, 1999).

3.2.3.3 Carbone organique total (méthode Springer-Klee modifié)

Un gramme de terre broyée à 200 µm est oxydé par du bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇ 0,1 N) en milieu fortement acide (H₂SO₄ 56%). Il s'agit d'une réaction exothermique normale accélérée par chauffage. La mesure revient à titrer l'excès d'oxydant par un sel réducteur (sel de Mohr – Fe (NH₄)₂(SO₄).6H₂O) en présence d'un indicateur, la diphenylamine qui permet de visualiser la fin de la réaction (virage du violet au vert foncé) mais également en présence d'un « complexant » (NaF) qui empêche l'indicateur d'agir avant que la réaction ne soit complète.

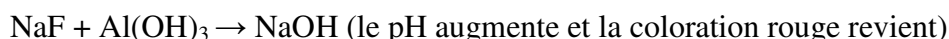
3.2.3.4 Azote total

La forme directement assimilable est minérale : cationique, NH⁴⁺ ou anionique, NO₃⁺. La « réserve d'azote » est elle toujours sous forme organique.

Un gramme de terre broyée à 200 µm est minéralisé par H₂SO₄ concentré (95-97%), cette attaque est effectuée à ébullition pendant deux heures, c'est la phase de clarification. Elle se réalise en présence de sélénium, de Na₂SO₄ et de billes en verre qui facilitent l'attaque de l'échantillon. Une fois celle-ci terminée, une distillation à l'aide de soude (NaOH) et d'acide borique (H₃BO₃) est exécutée sur les échantillons. Le distillat est titré, en présence d'un indicateur (Tashiro), par de l'acide chlorhydrique (HCl 0,01 N). L'indicateur de Tashiro nous permet de visualiser la fin de la réaction (virage du vert au bleu violacé).

3.2.3.5 Acidité d'échange

20 g de terre tamisé à 2 mm subissent une extraction par du chlorure de potassium (KCl 1 N). La prise d'essai est lessivée avec trois portions successives de KCl. Le filtrat est récolté dans une fiole jaugée et porté au trait à 250 ml par du KCl. Le filtrat est alors titré par de l'hydroxyde de sodium (NaOH 0,1 N) jusqu'à obtenir une couleur rose persistante. Ensuite, la solution est décolorée par une goutte de HCl (0,1 N). La solution est chauffée avec du NaF (4%) et elle est portée à ébullition pendant une minute. Si l'extrait de sol contient de l'aluminium échangeable, la couleur rouge apparaît selon la réaction :



Enfin, la solution est titrée par HCl (0,1 N) jusqu'à décoloration.

3.2.3.6 Granulométrie

Les particules sont classées en fonction de leur diamètre dans le tableau 2. Un certain nombre de prétraitements destinés à éliminer des ciments entre les particules, sont mis en œuvre :

- Elimination de la matière organique qui s'effectue par oxydation avec l'eau oxygénée (H₂O₂ 30% vol) ;
- Destruction des liaisons dues aux carbonates par l'acide chlorhydrique (4 N) ;
- Destruction par l'acide chlorhydrique (0,2 N) des liens calciques.
- Il est alors nécessaire de disperser correctement chaque particule (peptisation) et d'empêcher la formation d'agglomérats (floculation), qui fausseraient l'analyse granulométrique. On procède alors à la séparation des sables et des autres fractions par tamisage humide sur tamis de 50 µm :
 - Les fractions fines de 0 à 50 µm (argiles et limons) sont mesurées après sédimentation, via la pipette Robinson automatisée. L'analyse repose sur la loi de Stokes ;
 - La fraction sableuse de 50 µm à 2 mm est pesée après évaporation de l'eau à l'étuve (105°C) pendant environ 24 heures.

Tableau 2 : Classification des particules

Classement des particules	Dimensions
Cailloux et graviers	> 2 mm
Sables	De 50 µm à 2 mm
Limons	De 2 µm à 50 µm
Fraction fine (argile)	< 2 µm

3.2.3.7 Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique est la quantité totale de cations que le sol peut retenir sur son complexe adsorbant, à pH donné. Le complexe adsorbant est un ensemble qui est formé des particules argileuses et humiques, des hydroxydes de fer et d'aluminium. Ces derniers sont chargés positivement tandis que les autres fractions sont chargées négativement, ce qui permet l'adsorption des ions négatifs et positifs. Les particules chargées négativement sont responsables de la CEC mais il existe aussi une capacité d'échange anionique due aux particules chargées positivement. La CEC, représentée par la lettre T, correspond à la capacité du sol à stocker et à maintenir les éléments nutritifs sous une forme échangeable.

La méthode repose sur un échange des cations fixés sur le complexe d'échange de l'échantillon et les ions ammonium d'une solution aqueuse molaire d'acétate d'ammonium tamponné à pH 7. Elimination des ions ammonium en excès au moyen d'alcool éthylique. Extraction des ions ammonium fixés par une solution molaire de chlorure de sodium. La CEC est déterminé par dosage des ions ammonium échangés.

3.2.3.8 Eléments échangeables

Les cations les plus généralement présents sur le complexe de sorption sont Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} et Na^+ . La somme de ces cations est traditionnellement symbolisée par la lettre S. la garniture cationique du complexe sorbant traduit l'état du sol au moment du prélèvement. Leur détermination permet d'évaluer le pool d'éléments nutritifs disponibles pour la plante. Il est ensuite possible de calculer le taux de saturation en bases (V) :

$$V = S/T * 100$$

C'est une indication de la fertilité potentielle des sols. Elle permet également de se faire une idée globale quant à la nature des minéraux argileux. Les cations échangeables sont dosés dans les solutions d'extraction obtenues pour la détermination de la CEC. Le dosage des cations s'effectue par Absorption atomique avec le spectromètre.

Calcium :

Les formes les plus mobilisables sont les carbonates de certaines roches sédimentaires puis après viennent les minéraux altérés des roches éruptives basiques. Il est généralement présent en quantité suffisante pour assurer les besoins des plantes (améliore l'activité biologique générale et les conditions de nutrition en augmentant le pH).

Potassium :

La principale source de potassium provient des fertilisations régulières sur les sites agricoles. Certains types de sol présentent des micas et des illites qui grâce à l'ouverture des feuillets permettent au K^+ de passer de la forme fixe à la forme échangeable mais l'inverse peut avoir lieu. Ces échanges dépendent du contexte et sont peu présents en Afrique centrale.

Magnésium :

Le magnésium est un cation indispensable pour les plantes (cofacteur de plusieurs enzymes et élément constitutif de la chlorophylle). Dans le sol, certaines roches (calcaires actifs) fournissent du magnésium au complexe.

Sodium :

Le sodium, sauf exception, est très minoritaire, il n'est pas indispensable aux plantes. En excès, il est nuisible, aussi bien sous la forme saline que sous la forme échangeable.

3.2.3.9 Eléments totaux

La teneur totale en éléments dans le sol est l'ensemble des formes sous lesquelles ils sont présents dans le sol. Pour cela, ils doivent être extraits de toutes les formes y compris celles intégrées dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et secondaires tels que les argiles, les silicates, carbonates et oxydes (Baize, 1997).

La méthode d'extraction utilisée dans les analyses réalisées au cours de cette étude est la méthode triacide (HF + HClO₄ + HCl). HF permet d'extraire la partie incluse dans les silicates ce que l'eau régale ne permet pas. Une fois l'extrait préparé, les échantillons sont passés au spectromètre d'absorption atomique. Les teneurs des cinq métaux lourds à analyser (Cu, Co, Pb, Zn, Cd) pouvaient être évaluées par lecture directe ainsi que le Fe, l'Al, le Mg, le Mn. Les autres éléments (Ca, Na, Mg, K) devaient d'abord être dilués avant lecture au spectromètre.

4 Cadre bio-physique de la zone d'étude

4.1 Localisation de Lubumbashi

Chef lieu de la province du Katanga située au sud-est de la République démocratique du Congo, Lubumbashi (11°41 S., 27°29 EO.) a une population estimée à 2.000.000 d'habitants, extensions comprises. Elle est divisée en sept communes : Lubumbashi, Kenya, Katuba, Kampemba, Kamalondo, Ruashi ainsi que l'Annexe de Lubumbashi. Elle est la deuxième grande ville de la République Démocratique du Congo après Kinshasa. Lubumbashi (figure 6) est réputée pour ces activités minières et a subi un essor industriel au sein d'une région excessivement riche en minerais de cuivre. Mais cette industrialisation est responsable d'une forte pollution des sols, essentiellement due aux rejets de poussière de cuivre et autres métaux (cobalt, zinc, cadmium, ...) venant des exploitations minières de la ville (Petit et *al.*, 2003).

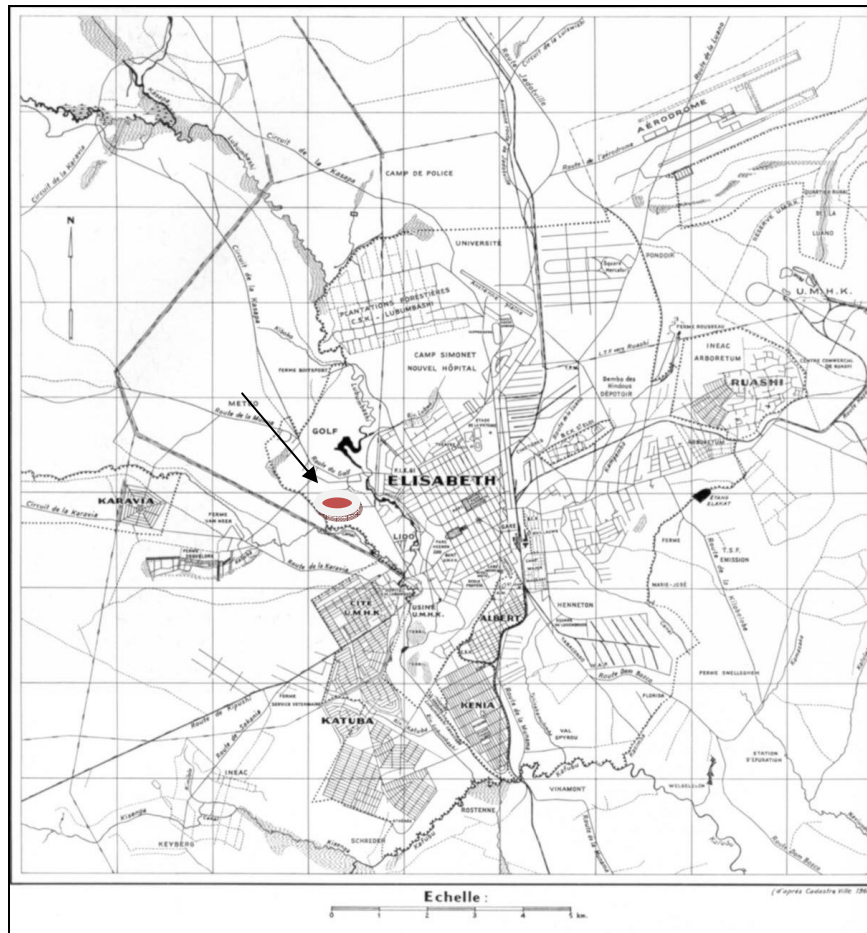


Figure 6 : Carte de Lubumbashi avec ces communes
(Cadastre de la ville en 1960)

4.2 Le climat

Le climat de Lubumbashi appartient au type Cw de la classification de Koppen (figure 7).

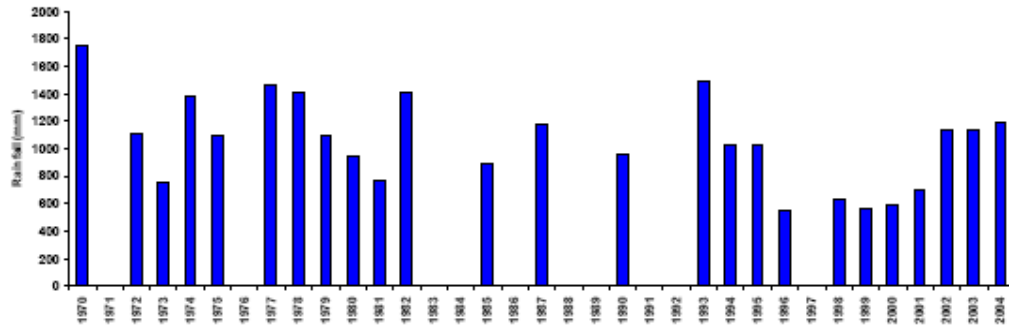


Figure 7 : Précipitations annuelles – Aéroport de la Luano (1970-2005)

4.2.1 Les précipitations et l'humidité atmosphérique

Le régime hydrique de Lubumbashi est caractérisé par une saison des pluies, une saison sèche et deux mois de transition. La saison des pluies débute en novembre et se termine en mars ; février apparaît comme le mois le plus pluvieux tandis que la saison sèche dure de mai à septembre. Celle-ci dure environ 185 jours. Les mois de transition sont octobre et avril. Pour les années de 1916 à 1986, la moyenne des précipitations annuelles est de 1232 mm, avec un maximum de 1768 mm et un minimum de 716 mm. Les minima diurnes de l'humidité relative de l'air varient entre 25 et 40 % en saison sèche et de 60 à 70 % en saison des pluies ; les maxima nocturnes sont voisins ou égaux à 100 % (Leblanc et *al.*, 1978).

4.2.2 Les températures

La température moyenne annuelle est de 20°C, les températures les plus basses sont observées de mi-mai à fin juillet. La moyenne des températures minimales journalières est de 4,2°C en juillet. Octobre et novembre sont les mois les plus chauds, avec un maximum moyen journalier de 31° et 33° et des températures moyennes mensuelles de 22,5 à 23,5°. Et enfin L'amplitude thermique journalière moyenne est de 14,7° (Leblanc et *al.*, 1978).

4.2.3 Le vent

Le régime des vents se caractérise par des alizés, vents réguliers et constants. Deux périodes sont distinctes ; elles correspondent aux deux saisons. Durant la saison sèche, les vents soufflent nettement du secteur compris entre l'est-sud-est et l'est-nord-est. Les vents des sud-est sont les plus nombreux. Durant la saison des pluies, les vents dominants soufflent du nord, c'est-à-dire du secteur compris entre nord-nord-ouest et nord-nord-est (figure 8) (Leblanc *et al.*, 1978).

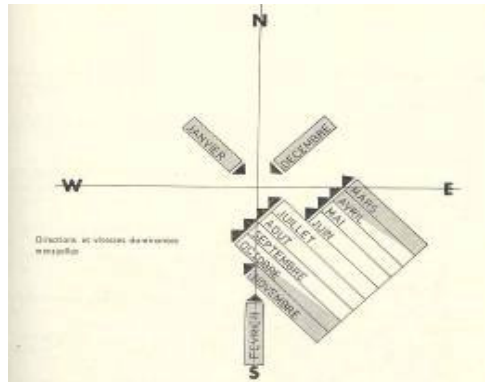


Figure 8 : Direction et vitesse dominante mensuelles des vents de Lubumbashi (Leblanc *et al.*, 1978)

4.3 Hydrologie

Il existe différents bassins au Katanga, nous y distinguons le bassin de la Luiswishi, celui de Lubumbashi, celui de la Ruashi et enfin celui de la Muniama. Tous ces cours d'eau sont des affluents de la rivière Kafubu, qui prend sa source à proximité de la frontière congolozambienne. Il existe aussi un lac de retenue à Lubumbashi. Celui-ci est situé à 1201 m d'altitude, avec une largeur maximale de 600 mètres et une longueur de 1,8 km, sa superficie est de 40 hectares. Sa profondeur est de 6 mètres environ (Leblanc *et al.*, 1978).

4.4 Topographie

La topographie de Lubumbashi est à une altitude moyenne de 1230 mètres, sur un plateau dont les courbes de niveaux s'orientent du nord-ouest au sud-est. Les cours d'eau forment de véritables barrières naturelles, car elles serpentent dans des marais inconstructibles et insalubres. Les voies de circulations suivent les courbes de niveaux ou leur sont perpendiculaires, cette disposition a des conséquences néfastes sur l'écoulement des eaux pluviales soit en pente faible entraînant la stagnation des eaux et le dépôt de limons et de sables soit en forte pente avec des débits conséquents d'où la création d'érosion (Leblanc *et al.*, 1978).

4.5 Géomorphologie

La géomorphologie de la région de Lubumbashi est due d'une part à la minéralisation, la tectonique et la lithologie, d'autre part à des cycles d'érosion successifs y compris le creusement du réseau hydrographique (Sys *et al.*, 1959).

4.6 Géologie et stratigraphie

Les formations classées dans les systèmes de Roan et de Kundelungu constituent le groupe du Katanga (figure 9). Elles sont comprises entre deux périodes orogéniques : l'orogénèse kibarienne et l'orogénèse kundelunguienne. Elles peuvent se présenter sous deux faciès distincts : un faciès plissé et un faciès horizontal ou subhorizontal. Le faciès plissé caractérise plus particulièrement les régions en synclinal ou en dépression où, les couches, après s'être accumulées sous de fortes épaisseurs, ont été violemment plissées. Le faciès horizontal se développe plus largement que le faciès plissé ; il s'étend dans toutes les régions où la plate forme continentale, restée rigide, a résisté aux poussées orogéniques de la période de plissements kundelunguiens. Le passage du faciès horizontal au faciès plissé se fait d'une manière graduelle. Le système de Roan, constitué du Roan Inférieur (Roches Argileuses Talqueuses), du Roan moyen ou Série des Mines (Roches Siliceuses Cellulaires Inférieures et Supérieures) et du Roan Supérieur (Roches Gréseuses Siliceuses jusqu'au Mwashya supérieur), est séparé du système suivant, le Kundelungu, par un grand conglomérat épais de plusieurs centaines de mètres (Tillite de grand conglomérat). Le système de Kundelungu est à son tour subdivisé en Kundelungu supérieur et inférieur par un petit conglomérat de 50 mètres environ d'épaisseur (Tillite du petit conglomérat) (Cailteux *et al.*, 1995).

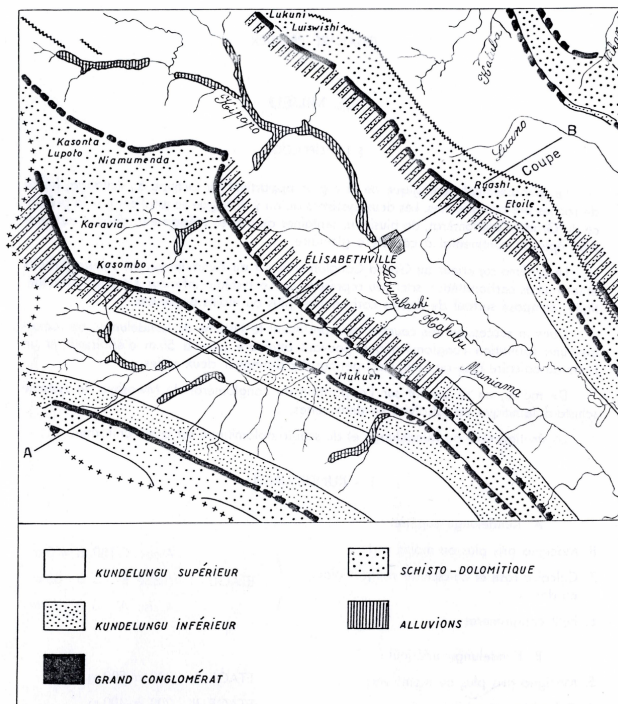


Figure 9 : Carte géologique du Katanga (Sys *et al.*, 1959)

Le groupe du Katanga caractérise le soubassement géologique de la région, il est formé de roches pré-cambriennes. Les deux systèmes qu'on y distingue se justifient par la présence du Grand Conglomérat déposé pendant un épisode continental à caractère glaciaire. Le système supérieur au Grand Conglomérat est le Kundelungu composé de roches carbonatées ou schisto-gréseuses. Le système inférieur est schisto-dolomitique et représenté surtout par des roches carbonatées plus ou moins argileuses. Dans la succession des couches qui constituent le Kundelungu, on remarque que la formation conglomératique peut atteindre jusqu'à 50 m d'épaisseur et un banc de calcaire rose ou bleu. Ceci permettant de distinguer deux séries. De même, en se basant sur l'apparition du conglomérat de Mwashya, le système schisto-dolomitique est subdivisé en deux séries. La stratigraphie de cette géologie est assez uniforme (tableau 3) (Sys et *al.*, 1959). Dans la région de Lubumbashi, les roches de la couverture d'âges primaire, secondaire et tertiaire n'existent pas. Le soubassement pré-cambrien a été pénéplané pendant les cycles d'érosion successifs du paléozoïque, mésozoïque et cénozoïque. Les formations quaternaires, produit du démantèlement de la pénéplaine, peuvent se classer en quatre types :

- Surface d'aplanissement, latéritisée, qui entaille la pénéplaine pliocène ;
- Surface d'érosion et moyennes terrasses, parfois latéritisées ;
- Surface d'érosion et basses terrasses, parfois latéritisées ;
- Colmatage de certaines vallées, creusement de talwegs et érosion locale.

Tableau 3: Lithostratigraphy of the Katangan succession in Congo (modified from Cailleux et *al.*, 1994 ; François, 1987 ; Cailleux, 2003)

	500 Ma	GROUP	SUB-GROUP	LITHOLOGY
		Kundelungu (Ku)	Plateaux (Ku 3)	Shales and arkoses
Kiubo (Ku 2)	Dolomitic shales, sandy shales or sandstones			
620 Ma	Kalule (Ku 1)	Dolomitic or sandy shales; pink limestone. Petit Conglomerat (Ku 1.1)		
	N'Guba (Ng)	Monwezi (Ng 2)	Dolomitic shales or siltstones	
750 Ma		Likasi (Ng 1)	Dolomitic or sandy shales; dolomites or limestone; extensional volcanism; Pb-Zn stratabound mineralisation. Grand Conclomerat (Ng 1.1)	
	Roan (R)	Mwashya (R 4)	Dolomitic shales (R 4.2). Dolomites, jasper beds and volcaniclastic rocks (R 4.1)	
		Dipeta (R 3)	Dolomites interbedded with argillaceous and dolomitic siltstones	
		Mines (R 2)	Dolomites, dolomitic shales and siltstones; main Cu-Co stratiform mineralization	
	R.A.T. (R 1)	Argillaceous dolomitic siltstones; sandstones and pelites		
	base of R.A.T. sequence - unknown			
900 Ma	Basal conglomerate			

4.7 Pédologie

4.7.1 Cadre pédologique

Selon Sys et Schmitz (1959), l'unité de base de la classification des sols de Lubumbashi est la série. Celle-ci représente un groupe de sols à horizons différenciés dont les caractéristiques pédologiques et les profils présentent de grandes affinités (tableau 4). Les différentes séries de sols que l'on retrouve dans la zone de Lubumbashi, appartiennent aux catégories des sols zonaux, intrazonaux et azonaux. L'examen détaillé de plusieurs profils dans la zone d'altération superficielle jusqu'à la roche mère fait apparaître, pour tous les profils zonaux, la même succession : l'horizon des terres de recouvrement, l'horizon de cailloutis parfois latéritisé, l'argile panachée correspondant au rose bariolé de Beugnies ; celui-ci passe graduellement par une roche altérée à la roche intacte ; Les terres de recouvrement, matériel parental des sols zonaux, sont de formation allochtone et sont considérées comme un manteau colluvionnaire ayant subi des remaniements éoliens. Les terres de recouvrement se subdivisent en :

- Groupe A (dépôt originaire des produits d'altération des roches du synclinal et des schistes de la série de Mwashya) ;
- Groupe B (dépôt originaire des produits d'altération du calcaire de Kakontwe, de la pâte basique du Grand Conglomérat et des dolomies et schistes dolomitiques de la série des Mines) ;
- Groupe C (matériel en relation avec le Grand Conglomérat, les grès de Mwashya, les roches siliceuses et certaines dolomies de la série des Mines).

Ces groupes permettent de différencier les terres de recouvrement en classes suivantes : A (plus de 1,20m de terre de recouvrement A), Ag (terres de recouvrement de type A reposant entre 0,20 et 1,20m sur l'horizon de cailloutis), B (plus de 1,20m de terre de recouvrement B), C (plus de 1,20m de terre de recouvrement C) et Cg (terres de recouvrement de type C reposant entre 0,20 et 1,20m sur l'horizon de cailloutis). Les sols zonaux ont atteint un niveau élevé d'altération chimique et la fraction argileuse est composée de kaolinite mélangée à une quantité d'oxydes libres. On observe :

- Des sols rouges ;
- Des sols ocre-rouge ;
- Des sols jaunes.

Les types de profils intrazonaux se retrouvent dans les vallées et certaines parties déprimées du paysage étant colmatées par des colluvions ou des alluvions récentes. On y distingue : le groupe D (dépôts récents argileux à argilo-sableux, avec une teneur en éléments fins supérieure à 50%), le groupe E (dépôts récents argilo-sableux ou sablo-argileux, avec une teneur en éléments fins inférieure à 50%) et le groupe F (sédiments calcaireux). En fonction des conditions de drainage, on différencie :

- Des sols à gley (profil jaune clair avec des tâches de rouille, présente sous forme de concrétions tendres) ;
- Des sols gris hydromorphes (profil gris complètement réduit) ;
- Des sols de marais (profil gris complètement réduit avec Horizon A₀).

Les classes suivantes s'y distinguent : D (plus de 1,20m du dépôt D), Dg (le dépôt D repose entre 0,20 et 1,20m sur l'horizon de cailloutis), E (plus de 1,20m du dépôt E), Eg (le dépôt E repose entre 0,20 et 1,20m sur l'horizon de cailloutis) et F (sédiments calcaireux).

Les sols azonaux possèdent des horizons de cailloutis ou diverses carapaces latéritiques en voie de démantèlement sur des reliefs horizontaux ou modérés (Sys *et al.*, 1959).

4.7.2 Principales caractéristiques analytiques des profils décrits par Sys

Notre travail évoquera 6 séries de sol qui occupent les sites étudiés. Ces séries sont : la série Kaponda, la série Baya, la série Musaongo pour les sols zonaux ; la série Mutwale et Lubumbashi pour les sols intrazonaux et enfin la série Katuba pour les sols azonaux (Sys *et al.*, 1959).

La série Kaponda (A2) représente un type de sol rouge-jaunâtre à structure en blocs moyennement développée. Les 27 premiers cm sont argilo-sableux tandis que les suivants sont argileux. Le pH est supérieur à 5. Les sols appartenant à la série Baya (A3) ont une teinte brun-jaune à structure en blocs. Un horizon de surface limono argilo-sableux se distingue des autres qui ont une texture semblable aux horizons de la série Kaponda. Ces sols sont acides (pH > 5). La série Musaonga (Ag-3) est caractérisée par un couleur jaune brunâtre à structure en blocs grossiers. Sa texture est argilo-sableuse et l'horizon de cailloutis constitué de fragments de schistes rubéfiés, de concrétions latéritiques et de quelques quartz anguleux apparaissent dès les 85 cm.

Les sols de la série Mutwale (D5) sont des sols gris hydromorphes à texture argileuse. Leur couleur caractéristique grise est parsemée de tâches de rouille. Leur structure en blocs grossiers a une tendance prismatique. Les sols des marais, étudiés dans ce document, appartiennent à la série de Lubumbashi (D6) à texture argileuse à l'exception du premier horizon qui se trouve être de la matière organique imparfaitement décomposée, légèrement mélangée à la matière minérale. Ces sols sont très rapidement gorgés en eau (> 64cm). Ils ont une couleur noire sauf pour le dernier horizon qui est gris. Leur pH est bien plus élevé que les autres types de sol.

La série Katuba (g) est une cuirasse latéritique en voie de démantèlement sur des reliefs horizontaux ou modérés.

4.7.3 Transfert des noms de sols dans le système moderne de classification

Selon la *Base de Référence Mondiale pour les ressources en Sols* (WRB) de la FAO (1998), les sols de l'aire étudiée sont classés en trois groupes : les Alisols, les Fluvisols et les Gleysols. Les Alisols occupent la plus grande superficie de l'aire d'étude. Les Gleysols se retrouvent dans le fond des vallées et les bas de versant tandis que les Fluvisols n'occupent que le fond des vallées. Certaines zones très limitées peuvent être des Plinthosols.

4.7.3.1 Les Alisols

Ce type de sol est déterminé par une forte accumulation en argile et une acidité très marquée. Les Alisols sont caractérisés par la présence d'un horizon argique. Plusieurs sous-groupes ont été observés, on distingue les Alisols Rhodiques qui correspondent aux Latosols rouges (série Kaponda), les Alisols ferri endo-squelettiques (série Baya) et les Alisols ferri épi-squelettiques (série Musaonga) qui sont des Latosols brun-jaune. On les différencie par la profondeur d'apparition de la charge caillouteuse, elle est inférieure à 50 cm pour les épi-squelettiques et supérieure à 50 cm pour les endo-squelettiques.

4.7.3.2 Les Plinthosols

Les Plinthosols sont des sols peu épais reposant sur une cuirasse latéritique. Ils représentent la série Katuba (g) de la classification de l'INEAC.

4.7.3.3 Les Gleysols

Les Gleysols sont saturés avec de l'eau souterraine pendant des périodes suffisamment longues pour développer des motifs caractéristiques de couleur gleyique. Les tâches sont essentiellement rougeâtres, jaunâtres ou brunâtres sur la surface des unités texturales et/ou dans les couches supérieures du sol en combinaison avec les couleurs grisâtres ou bleuâtres à l'intérieur des unités structurales et/ou dans le sol plus profond. Le système de classification de l'INEAC les place parmi la série Mutwale (D5).

4.7.3.4 Les Fluvisols

Le groupe des Fluvisols comprend des sols jeunes, développés sur des dépôts alluviaux. L'horizon diagnostique est fluvique. Le système de classification de l'INEAC les place parmi la série Lubumbashi (D6).

4.7.4 Tableau de synthèse sur les types de sol rencontrés dans la zone d'étude

Tableau 4 : Caractéristiques des différents types de sol observés sur l'aire étudiée

Série de sol	Origine	Situation topographique	Type de sol	Drainage
Sols zonaux				
<u>Série Kaponda A2</u>	Terres de recouvrement (type A) des produits d'altération des roches du synclinal et des schistes de la série de Mwashya	synclinaux et en bordure des anticlinaux sur schiste de Mwashya	Latosols rouge-jaunâtres, profond, à texture finement argileuse, imperméable	Bon
<u>Série Baya A3</u>		terrains à pente modérée autour des plateaux latéritiques dans la zone synclinale et parfois en bordure des anticlinaux sur schistes de Mwashya	Latosols jaunes, profond, finement argileux et peu perméables	
<u>Série Musaonga Ag3</u>		modérément ondulé en bandes autour des plateaux latéritiques de la zone synclinale ; parfois en bordure des anticlinaux sur schistes de Mwashya	Latosols jaunes, finement argileux à argilo-sableux, imperméables	
Sols intrazonaux				
<u>Série Mutwale D5</u>	Colluvions récentes argileuses colmatant certaines vallées	Relief horizontal et on les retrouve généralement dans les dembos et en bordure de certaines vallées marécageuses	Sols gris hydromorphes, profond et argileux	Mauvais
<u>Série Lubumbashi D6</u>	Colluvions et alluvions récentes	Relief horizontal dans les vallées	Sol hydromorphe profond, argileux avec accumulation de matières organiques	
Sols azonaux				
<u>Série Katuba g</u>	Horizons de cailloutis ou de diverses carapaces latéritiques en voie de démantèlement	Relief horizontal ou modéré	Substrat graveleux et latéritique, peu ou pas différencié en profil	Mauvais à bon

5 Présentation des toposéquences des sites naturels

5.1 Introduction

Les toposéquences effectuées sur ces sites ont été réalisées en vue d'accomplir une comparaison de ces sites avec la toposéquence de la Gécamines. Ces sites ont été choisis en fonction des types de sol recherchés pour permettre une évaluation de l'évolution de ceux-ci. Le choix de plusieurs lieux permet de voir toute la diversité que ces sols ont et leurs expressions naturelles. Les quartiers de la Gécamines étaient composés de pâturages, de forêt claire et de culture selon Sys, 1954. Ces occupations de sol se retrouvent dans les sites naturels. La démarche de ce chapitre, nous permettra aussi d'établir une relation entre la terminologie utilisée pour décrire les sols et le référentiel WRB.

5.2 Le monastère de Kiswishi

5.2.1 Introduction

Le monastère de Kiswishi est situé juste à côté de la route menant à l'aéroport de Lubumbashi (S 11,53189° ; EO 27,47228°). Il est établi dans la commune Annexe de Lubumbashi. Le monastère possède des terres qu'il utilise en fonction de ses besoins. Trois unités ont été découpées dans cette toposéquence, la première unité se révèle être un haut de versant forestier occupé par une forêt claire ou plus communément appelée miombo. La deuxième unité est un versant à pente faible occupé par des jachères et des cultures de soja ou de maïs. Selon les informations récoltées sur le terrain, les jachères ont une durée importante pour permettre le renouvellement des parcelles. Enfin, le bas-fond est occupé par de l'horticulture avec la présence d'une pépinière (figure 10).



Figure 10 : Localisation du monastère de Kiswishi (Google Earth, 2008)

5.2.2 Physiographie et occupation des sols

La toposéquence effectuée sur le site du monastère de Kiswishi a été réalisée selon le relief et l'utilisation du terrain (figure 11 et planche 1).

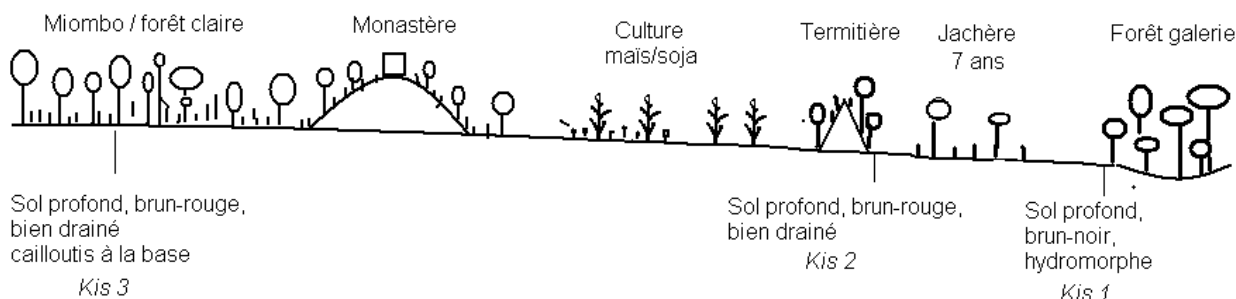


Figure 11 : Toposéquence effectuée au monastère de Kiswishi

Unité 1 : haut de versant forestier

Juste à côté de la route menant à l'aéroport, la forêt claire de Kiswishi est située sur un plateau avec une pente inférieure à 5 %. La formation végétale est constituée de ligneuses hautes et basses. Celle-ci est composée de *Julbernardia paniculata*, de *Brachistegia spiciformis*, d'*Albizia*, d'*Uapaca Robynsii* et de *Smilox anceps*. Cette forêt claire est relativement récente et ne peut être considérée comme une forêt claire primaire étant donné l'âge des arbres présents dans ce miombo.

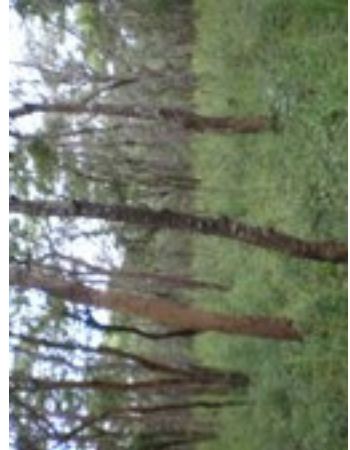
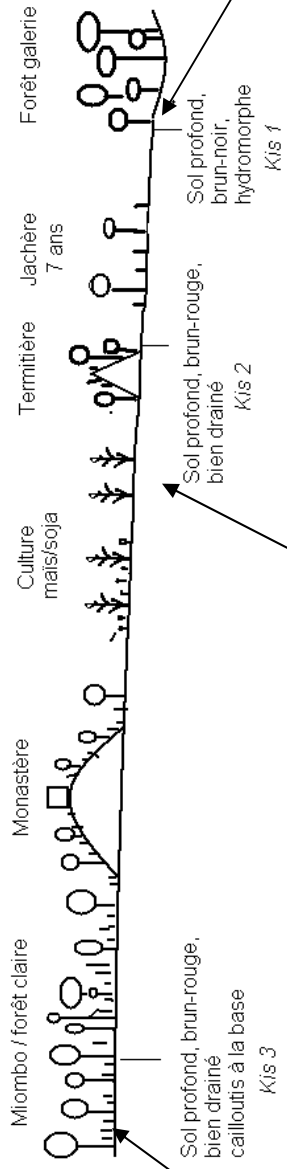
Unité 2 : versant cultivée

Cette deuxième unité est composée d'un versant occupé par des jachères et des cultures de maïs et de soja. Ces jachères et cultures sont situées sur un versant ayant une pente de 12,5 %. Les jachères pratiquées au monastère sont de l'ordre de 10 à 15 ans. La parcelle où le sondage et le profil ont été réalisés était en jachère depuis une dizaine d'années. La végétation qui repousse sur ces parcelles est une formation herbacée composée de *Pteridium afrillima*, de *Titonia diversifolia* et de *Setaria palidifusca*.

Unité 3 : bas-fond horticole

La pente de cette unité est de 10 %. La formation végétale présente sur ce site est herbacée et ligneuse haute. Elle est composée d'*Imperata cylindrica*, de *Titonia diversifolia*, d'*Hypparenia diplandra* et d'*Acacia kiirki*. Les plantes cultivées dans ce bas-fond étaient principalement utilisées pour la vente en fleurs coupées comme le rosier néanmoins certaines plantes de la pépinière servent au renouvellement des plantations du monastère tel que l'*Acacia*. Le site n'est pas très éloigné d'une galerie forestière qui pourrait être les vestiges de la végétation qui poussait avant l'influence du milieu anthropique.

Planche 1 : Illustration de la toposéquence du monastère de Kiswishi



5.2.3 Caractérisation pédologique du site

D'après la carte des sols, trois séries de sols sont retrouvés sur ce site ; la série Kaponda (A-2), la série Mimbulu (Ag-2) et la série Mutwale (D-5). Les deux premiers sont des sols zonaux brun-rouge (2,5 YR) bien drainés avec des cailloutis à la base pour la série Mimbulu. Enfin, la série Mutwale est un sol intrazonal brun-noir hydromorphe (10 YR) (figure 12 et Annexe 3).

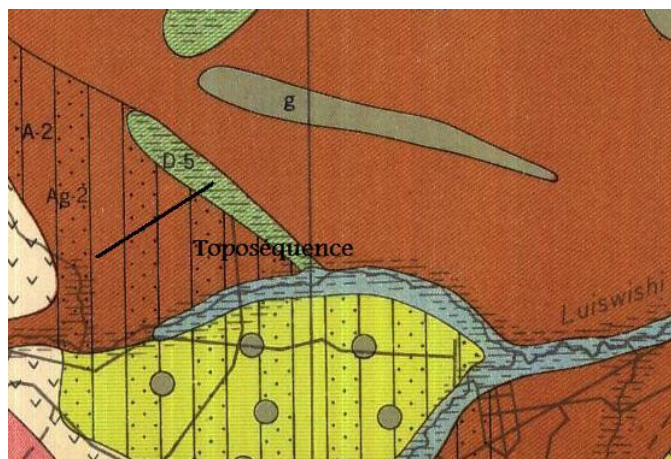


Figure 12 : Situation de la toposéquence de Kiswishi sur la carte pédologique (Sys, 1954-1956)

Les sols de la première et de la deuxième unité correspondent à des Latosols rouge-jaunâtres ou des Alisols Rhodiques, selon la classification WRB, en raison de leurs fortes concentrations en aluminium, leur CEC plus grande que 24 cmol/kg et un horizon B diagnostique. Les sols de la série Mutwale (D-5) sont des Gleysols déterminés par une hydromorphie présente à partir de 60 cm et caractérisés par de nombreuses tâches d'oxydo-réduction (planche 2).

Unité 1

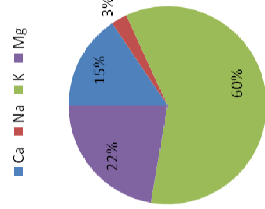
Un sondage (KIS 3) et une fosse ont été observés sur un sol caractéristique d'une forêt claire, il n'y a que le premier horizon qui permet une minéralisation lente ($C/N > 15$). Les autres présentent une concentration en carbone trop faible (0,6 et 0,2 respectivement pour les Hor AB et B1). Ce type de sol possède un pH_{eau} très acide ne dépassant pas les 5,2. Sa texture est limoneuse tout en ayant une teneur non négligeable en argile, l'horizon B1 et B2 sont limono-argileux. Ce type de sol est un Alisol Rhodique qui possède une charge caillouteuse en profondeur. Cette charge est composée de grès et de schiste. Ce sol présente un fort pourcentage en calcium échangeable (81%) avec un taux de saturation de 8,5 pour l'horizon Ah et le taux de saturation est décroissant avec la profondeur. Le taux de saturation de l'horizon AB et B1 est inférieur à 1%. Les plus grandes caractéristiques de ce type de sol sont la distinction du premier horizon par rapport aux autres et leurs horizons B.

Planche 2 : Résultats de la toposéquence du monastère de Kiswishi

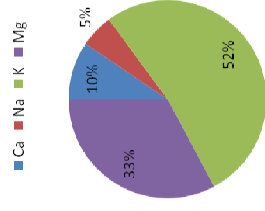
N° Hor.	Prof. éch.	Ch. %	pH			M.O Totale g/100g TS			Granulométrie				Cations échangeables et CEC					% de Sat.	
			pH _{Eau}	pH _{KCl}	ΔpH	C	N	C/N	A%	L %	S %	FAO Text.	Na	Ca	K	Mg	S		CEC
KIS1 A1	0-25	2,8	5,6	4,8	0,9	3,7	0,23	16	31	34	36	LA	0,05	0,08	0,46	0,29	0,88	28	4,8
A2	25-50	2,1	5,5	4,2	1,2	2,1	0,12	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A3	50 - 60	1,8	-	-	-	1,6	0,09	18,2	*	*	*	-	0,03	0,07	0,44	0,07	0,60	16	4,8
Bg1	60 - 93	24,2	-	-	-	-	-	-	34	25	40	LA	-	-	-	-	-	-	-
Bg2	93-108	5,2	5,8	5,2	0,6	-	-	-	24	35	41	L	0,05	0,09	0,37	0,10	0,61	16	3,8
KIS2 A1	0-13	0,6	5,5	4,1	1,4	1,9	0,13	15,2	29	47	25	LA	0,01	0,04	0,16	0,06	0,27	19	1,4
B1	26-39	3,2	5,1	4,1	1,0	1,1	0,06	16,8	21	57	23	LF	0,03	0,04	0,04	0,08	0,19	17	1,8
B2	60 - 70	3,4	-	-	-	0,6	-	-	-	-	-	-	0,05	0,06	0,26	0,06	0,42	24	1,7
Bw1	84-100	1,6	5,2	4,3	0,9	-	-	-	22	57	21	LF	-	-	-	-	-	-	-
KIS3 Ah	0-15	2,6	5,2	4,0	1,1	1,6	0,09	16,8	23	33	44	L	0,02	0,74	0,00	0,15	0,91	11	8,5
AB	30-40	1,9	4,9	4,0	0,9	0,6	-	-	27	35	39	L	0,00	0,00	0,02	0,35	0,37	6	6,0
B1	45 - 60	1,8	-	-	-	-	-	-	29	35	36	LA	0,00	0,04	0,05	0,06	0,15	8	1,9
B2	75 - 90	1,2	-	-	-	-	-	-	29	36	36	LA	-	-	-	-	-	-	-
Bc	90-100	25,7	5,1	4,3	0,8	-	-	-	26	43	31	L	-	-	-	-	-	-	-

Hor : horizon ; prof. Ech : profondeur des échantillons ; Ch. : charge grossière ; M.O Totale : matière organique totale ; CEC : capacité d'échange cationique ; % de sat : pourcentage de saturation ; FAO Text : texture FAO ; * : données absentes par manque de qualité des données obtenues en laboratoire.

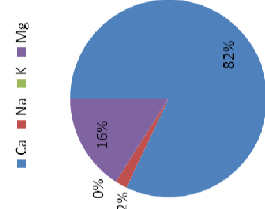
Ratio des cations de l'horizon A1 du sondage KIS 1



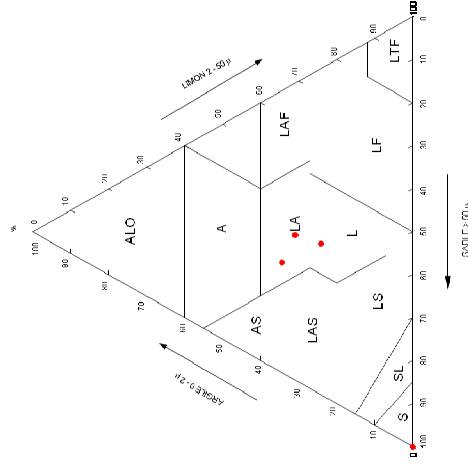
Ratio des cations de l'horizon A1 du sondage KIS 2



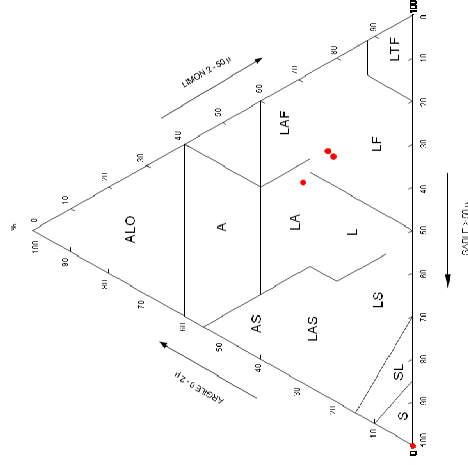
Ratio des cations de l'horizon Ah du sondage KIS 3



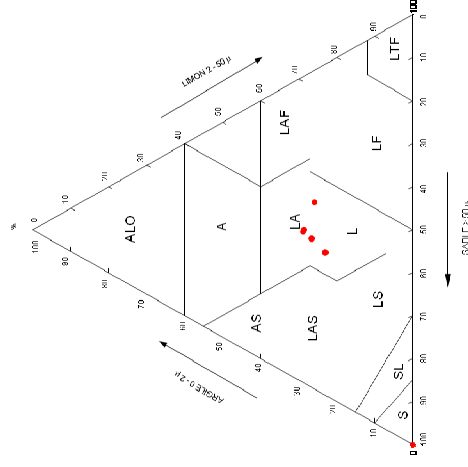
Triangle des textures du sondage KIS 1



Triangle des textures du sondage KIS 2



Triangle des textures du sondage KIS 3



Unité 2

Le sol observé grâce un sondage (KIS 2) et une fosse (P 11) est un Alisol Rhodique, il possède des caractéristiques beaucoup plus acides que le premier sondage. Ses valeurs de pH_{KCl} sont stables, elles sont à 4,1 pour les deux premiers horizons. Son taux de minéralisation (C/N) est plus faible que le Gleysol rencontré dans le bas fond (KIS 1) de cette toposéquence. Les concentrations en carbone et en azote sont plus faibles et moins décroissantes que pour le premier sondage. Néanmoins, le rapport C/N reste supérieur à 15. Sa texture limoneuse augmente avec la profondeur. Les racines sont très présentes dans tous les horizons. Le pourcentage en éléments échangeables est élevé pour le potassium et le magnésium (52% et 32%). La capacité d'échange cationique est plus élevée que pour la troisième unité, elle se situe aux alentours de 20 cmol/kg. Le pourcentage de saturation est très faible, il ne dépasse pas les 2%.

Unité 3

Un sondage (KIS 1) et un profil (P10) ont été considérés sur ce Gleysol, il nous indique un pH_{KCl} inférieur à 5 pour les deux premiers horizons mais une légère variation est à noter en fonction de la profondeur. Le rapport C/N, nous montre une minéralisation secondaire des composés humiques formés. Le premier horizon est enrichi en matière organique et sa concentration diminue avec la profondeur. La texture de ce sol est limono-argileuse pour l'ensemble des horizons à l'exception de l'horizon Bg2 qui a une texture limoneuse. Cette unité possède une structure grumeleuse pour le premier horizon (A1) et polyédrique pour les suivants. Les pores diminuent en fonction de la profondeur et leur taille est fine (1-2 mm). Ces sols ont une profondeur d'environ 100 cm car la nappe phréatique a limité toutes observations plus profondes. Des concrétions de fer se retrouvent dans les deux derniers horizons (Bg1 et Bg2). Les seules traces d'activités biologiques relevées sont la présence de termitières hypogées. Le potassium échangeable représente 60% de la teneur en éléments échangeables. Le taux de saturation reste stable en fonction de la profondeur, il ne dépasse pas les 4%.

5.3 La ferme Kasapa

5.3.1 Introduction

La ferme Kasapa est une ferme expérimentale appartenant à l'université de Lubumbashi. Elle effectue des recherches sur le maïs, l'arachide et d'autres plantes. Cette ferme permet aussi aux étudiants d'y effectuer leur stage et leur mémoire. Ce site est situé sur la route quittant Lubumbashi par le nord (S 11,58717° ; EO 27,41839°). Cette ferme se trouve dans la commune Annexe de Lubumbashi. La toposéquence effectuée reprend trois unités (3 profils) mais étant donné la période d'échantillonnage, le troisième profil n'a pu être caractérisé car il était submergé, nous ne considérerons que le plateau et le versant comme unités.

5.3.2 Physiographie et occupation des sols

La toposéquence a été effectuée selon les profils déjà creusés dans le cadre d'une étude précédemment réalisée pour évaluer et caractériser les sols présents dans cette zone (figure 13 et planche 3).

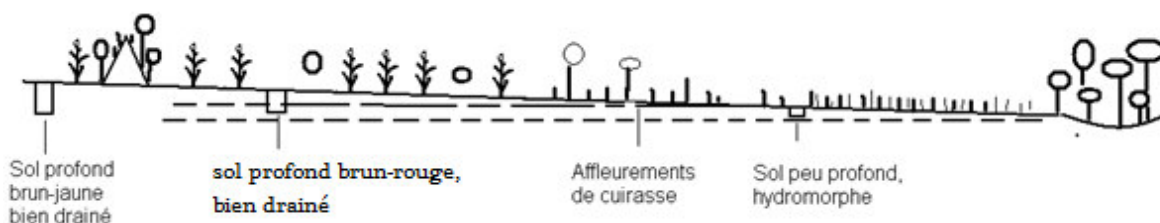


Figure 13 : Toposéquence de la ferme Kasapa

Unité 1 : plateau

Située sur le plateau de la ferme Kasapa, cette unité est composée de jachère et de champ de maïs. Elle peut être considérée comme une surface plane étant donné que sa pente est inférieure à 5%. La formation végétale présente une végétation herbacée et ligneuse haute. Elle est composée de *Setaria palidifusca*, d'*Imperata cylindrica*, de *Titonia diversifolia*, d'*Acacia kiirki* et de *Bidens oligoflora*.

Unité 2 : versant

Situé un peu plus bas que la première unité, cette unité présente une morphologie plane (pente < 5%). Elle est établie juste entre un champ de maïs et une parcelle en friche composée d'*Hypparhenia sp.*, de *Bidens oligoflora* et de *Titonia diversifolia*. Cette formation végétale est une formation herbacée et ligneuse haute et basse (*Acacia kiirki*). Certains travaux de labour et de nivellement ont été effectués pour une mise en valeur de certaines parcelles de cette unité.

5.3.3 Caractérisation pédologique du site

Chaque unité représente une série reprise dans la carte des sols de l'INEAC. L'unité 1 appartient à la série Baya (A-3) et la deuxième unité se rapporte à la série Kaponda (A-2). Ces deux unités sont des sols zonaux. La classification WRB voudrait qu'on les classe tous les deux dans les Alisols mais avec quelques nuances dont la couleur respectivement brun-jaune (10 YR) et brun-rouge (5 YR) pour la série Baya et la série Kaponda. L'ancienne nomenclature nous indique que se sont des Latosols jaunes et rouges jaunâtres. La série Baya se rapporte à un Alisol ferri endo-squelettique et la série Kaponda à un Alisol Rhodique (figure 14 et Annexe 4).

Planche 3 : Illustration de la toposéquence de la ferme Kasapa



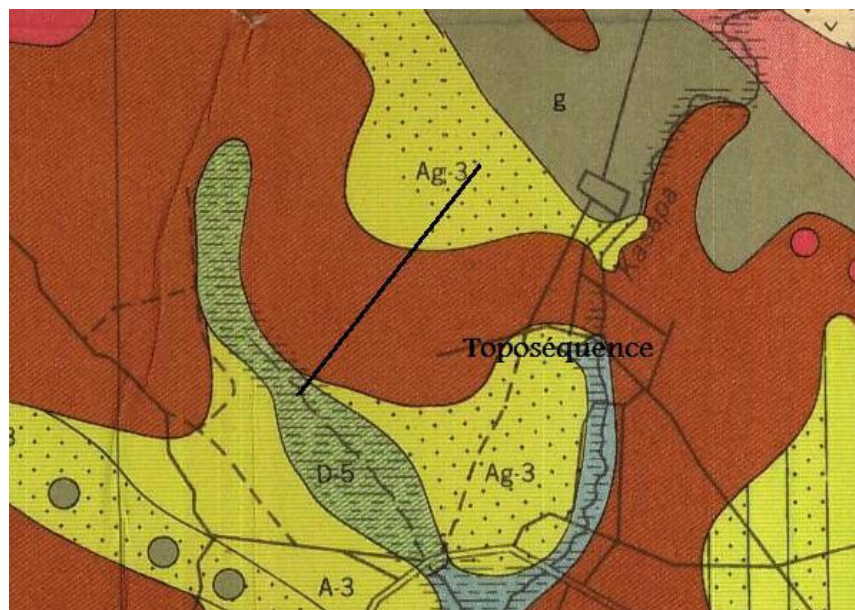


Figure 14 : Localisation de la toposéquence sur la carte pédologique (Sys, 1954-1956)

Unité 1

Le sol de la première unité (Profil 8) est un Alisol ferri endo-squelettique brun-jaune à pH très acide selon les informations recueillies sur le terrain (Kit pH). La texture de ces sols est argilo-sableuse pour l'horizon A1 et argileux pour les horizons Bw. Sa structure est grenue et polyédrique. La porosité est relativement bonne en considérant qu'il y a de très nombreux pores d'une dimension ne dépassant pas les 2 mm. Deux types de racines sont à distinguer en fonction des horizons, les racines d'*Imperata cylindrica* (> 5 mm) se retrouvent en abondance dans l'horizon A1 tandis que les autres horizons ont une distribution plus abondante de fines racines (1-2 mm). Le rapport C/N est de 11 pour le premier horizon et la faible teneur en carbone dans les autres horizons n'a pas permis de justifier la mesure de l'azote. Cette valeur, nous indique une décomposition rapide de la matière organique pour l'horizon A1. Le pourcentage des concentrations en bases échangeables est faible pour tous les horizons analysés sauf pour le potassium qui avoisine les 50%. La concentration en potassium échangeable augmente avec la profondeur (planche 4).

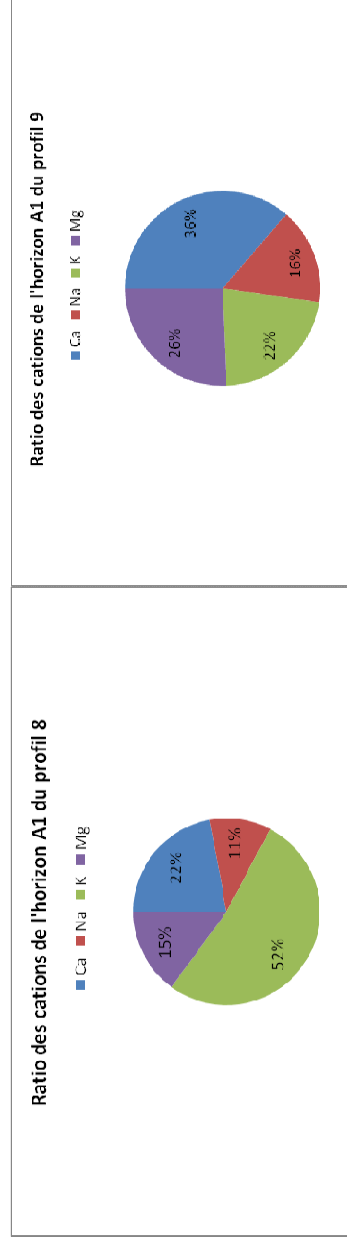
Unité 2

Le sol du deuxième site (Profil 9) est caractérisé par un pH_{KCl} en dessous de 5 c'est-à-dire un pH très acide. Son rapport C/N est légèrement supérieur à celui du premier profil à cause d'une teneur en carbone supérieur. Néanmoins, ce n'est que le premier horizon qui constitue la réserve de carbone. Ce type de sol présente une charge caillouteuse contenant du quartz et des concrétions d'hydroxydes ou d'oxydes de fer. L'horizon A1 montre une texture argileuse tandis que les autres horizons sont plutôt limoneux. La porosité de ces types sols est variable, elle est influencée par la texture et la structure des horizons. Les teneurs des éléments échangeables sont faibles mais l'ensemble des horizons présentent une forte concentration en calcium (planche 4).

Planche 4 : Résultats de la toposéquence de la ferme Kasapa

N° Hor.	Prof. éch.	Ch. %	pH		M.O Totale g/100g TS			Granulométrie				Cations échangeables et CEC					% de Sat. V			
			pH _{Eau}	pH _{KCl}	▲	pH	C	N	C/N	A% (0-2µ)	L %	S %	FAO Text.	Na	Ca	K		Mg	S	CEC
P8 A1	0 - 24	15,8	**	**	**	1,5	0,13	11,0	*	*	*	-	0,03	0,07	0,17	0,05	0,32	14	2,3	
AB	24 - 58	21,0	**	**	**	0,0	-	-	*	*	*	-	0,03	0,07	0,23	0,05	0,37	10	3,7	
Bw1	58 - 103	21,7	**	**	**	-	-	-	*	*	*	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bw2	103 - →	21,5	**	**	**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
P9 A1	0 - 8	7,6	5,5	5,1	0,4	1,9	0,13	14,2	*	*	*	-	0,05	0,11	0,07	0,08	0,30	16	1,8	
AB	8 - 39	22,2	5,7	5,3	0,5	0,9	-	-	*	*	*	-	0,09	0,73	0,04	0,08	0,94	15	6,2	
Bw1	39 - 104	14,3	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bw2	104 - 120	11,2	5,5	4,1	1,4	-	-	-	*	*	*	-	0,06	0,17	0,02	0,09	0,34	11	3,1	

Hor : horizon ; prof. Ech. : Profondeur des échantillons ; Ch. : charge grossière ; M.O Totale : matière organique totale ; CEC : capacité d'échange cationique ; % de sat. : Pourcentage de saturation ; FAO Text : texture FAO ; * : données absentes par manque de qualité des données obtenues en laboratoire ; ** : le manque de temps n'a pas permis de calculer tous les pH.



5.4 Le jardin expérimental de l'UNILU

5.4.1 Introduction

Le jardin expérimental a été établi au sein de l'université de Lubumbashi (S 11°36'90'' ; EO 27°28'35''), son but est pédagogique et expérimental (figure 15). Il regroupe notamment la flore spécifique du Katanga. Ce jardin est situé à la périphérie de la ville. Vu son éloignement du site contaminé, le jardin peut être considéré comme un site peu contaminé. Ce site représentera donc une unité spécifique.



Figure 15 : Localisation du jardin expérimental de l'UNILU (Goolge Earth, 2008)

5.4.2 Physiographie et occupation des sols

Cette unité est présente dans la commune de Lubumbashi, la géomorphologie du site est plane. L'occupation du sol est constituée de culture (soja, maïs), d'*Acacia sp.*, de *Titonia diversifolia* et bien sûr toutes les plantes cuprophytes (*Bulbostylis pseudoperennis*, *Haumaniastrum katangense*). L'utilisation en agriculture de cette parcelle est très ancienne (> 30 ans). Des travaux de mise en valeur tel que le labour ont été effectués sur les parcelles cultivées.

5.4.3 Caractérisation pédologique du site

Le sol de cette unité appartient à la série Kaponda (A-2), c'est un sol brun-rouge (5 YR et 7,5 YR) (figure 16). Celui-ci est un Alisol Rhodique de par sa profonde altération et son accumulation d'argile dans les horizons inférieurs. Sa texture est limoneuse mais une forte concentration en argile, provenant d'une accumulation ou d'une altération, apparaît dans les horizons inférieurs. Le rapport C/N n'est calculé que pour le premier horizon, il est de 10,3. La matière organique du premier horizon se décompose rapidement tandis que la présence et la décomposition de la matière organique est insignifiante pour les autres horizons. La charge caillouteuse est importante dans les trois derniers horizons, elle est constituée de shale et de quartz. Le potassium est l'élément le plus présent avec 67%. La capacité d'échange cationique est élevée (> 20 cmol/kg) ce qui induit un faible pourcentage de saturation ($< 3\%$) (planche 5 et Annexe 5).



Figure 16 : Fosse pédologique effectuée dans le jardin expérimental de l'UNILU

5.5 *Le monastère de Kansebula*

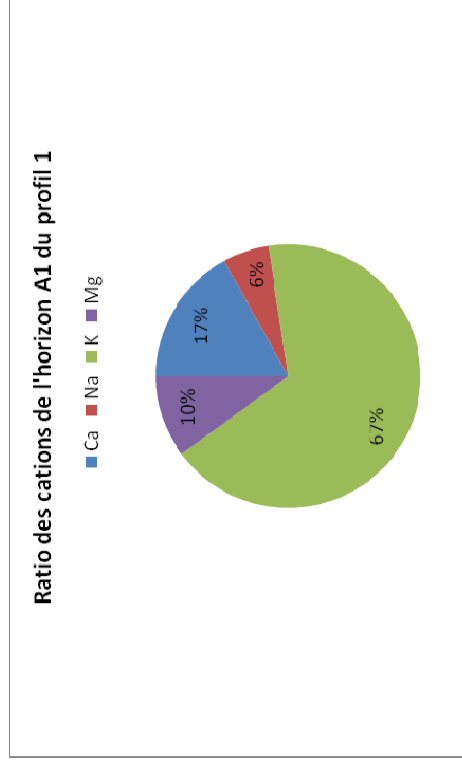
5.5.1 Introduction

Ce monastère bénédictin est établi dans le district du Haut Katanga (S $11^{\circ}45,124'$; EO $27^{\circ}34,609$). Il est situé non loin de la route Kafubu-Sambwa en direction de Sambwa. Il possède des terres cultivées en fonction des besoins et des rotations à réaliser. Il est entouré par une forêt claire où un sondage a été effectué. La toposéquence a été exécutée sur un site dénommé « Maïsha ». Celle-ci est composée de trois unités distinctes de par leurs types de sol, leurs reliefs et leurs occupations. Elle commence sur un plateau et se termine au niveau de la rivière Kafubu.

Planche 5 : Résultats du jardin expérimental de l'UNILU

N° Hor.	Prof. éch.	Ch. %	pH			M.O Totale g/100g TS			Granulométrie				Cations échangeables et CEC					% de Sat. V	
			pH _{Eau}	pH _{KCl}	▲ pH	C	N	C/N	A% (0-2µ)	L %	S %	FAO Text.	Na	Ca	K	Mg	S		CEC
P 1 A1	0 - 16	49,5	6,8	4,5	2,2	2,0	0,19	10,3	*	*	*	-	0,03	0,10	0,38	0,06	0,57	29	2,0
Bw1	16 - 24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bc2	24 - 78	36,5	6,2	4,1	2,1	0,5	-	-	*	*	*	-	0,03	0,07	0,15	0,05	0,30	21	1,4
C1	78 - 115	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	115 - →	63,4	5,0	4,1	0,9	-	-	-	42	47	11	AL	0,02	0,19	0,20	0,14	0,55	21	2,6

Hor : horizon ; prof. Ech. : profondeur des échantillons ; Ch. : charge grossière ; M.O Totale : matière organique totale ; CEC : capacité d'échange cationique ; % de sat. : pourcentage de saturation ; FAO Text : texture FAO ; * : données absentes par manque de qualité des données obtenues en laboratoire.



5.5.2 Physiographie et occupation des sites

Ce site culmine à 1200 m d'altitude, la dénivellation est d'environ 25 m. ce relief ainsi que l'occupation du sol, nous a permis d'établir cette toposéquence (figure 17).

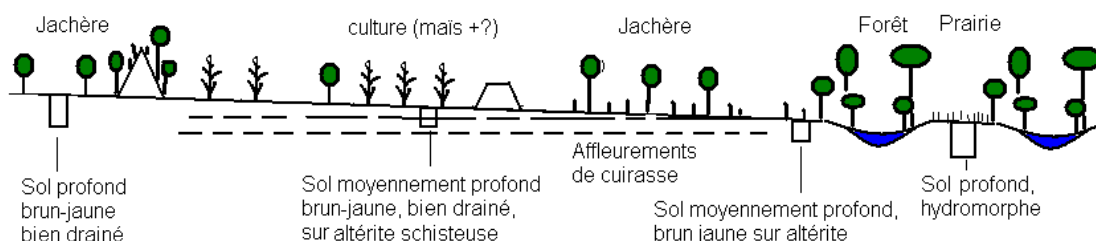


Figure 17 : Toposéquence réalisée non loin du monastère de Kansebula

Unité 1 : plateau sous forêt ou jachères

Cette unité se situe à quelques centaines de mètres de la route Kafubu-Sambwa en direction de Sambwa. Sa géomorphologie est un plateau légèrement incliné. Les parcelles présentes sur cette unité sont des sites forestiers utilisés pour l'abattage sélectif ou la confection de charbon de bois. La végétation est une formation ligneuse haute et basse de type miombo. Les plantes présentes sont le *Brachystegia spiciformis*, le *Combretum melo*, le *Discorea* et l'*Afromum*. L'influence anthropique provoque l'apparition d'une végétation perturbée. Certaines parcelles sont des jachères de dix à quinze ans.

Unité 2 : versant cultivé

Cette unité est située sur le versant où la pente est de 4%. Elle rassemble les parcelles cultivées en rotation. Les cultures pratiquées sont le maïs, les cucurbitacées, le bananier, le manioc, etc. certaines pratiques culturales sont effectuées sur ces parcelles telles que le feu (culture sur brûlis), l'éclaircie de la végétation ligneuse et le labour.

Unité 3 : piémont en jachère

Actuellement en jachère, cette unité est utilisée pour les cultures sur brûlis. Elle se situe à 10 m de la rivière Kafubu. Les sols de ces cultures sur brûlis sont néanmoins labourés partiellement. La végétation de ce site est fortement perturbée, seule une végétation herbacée composée de *Phragmites tiphaniapa*, d'*Imperata cylindrica* repousse. Il est à noter que lors de notre visite sur le site, cette unité était sensible aux inondations et que les profils présents avaient subi un remaniement dû aux apports de sédiments de la rivière.

5.5.3 Caractérisation pédologique des sites

Les séries présentes dans ces unités sont la série Musaonga (Ag-3), la série Baya (A-3) appartenant à des sols zonaux et la série Katuba (g) qui est un sol azonal. La série Kaponda et Baya a déjà été détaillée dans les chapitres précédents. La série Katuba est un sol moyennement profond, brun-jaune sur altérite. La série Baya et Musaonga sont respectivement des Alisols ferri endo-squelettiques et épi-squelettiques tandis que la série Katuba est un Plinthosols (figure 18, planche 6 et Annexe 6).

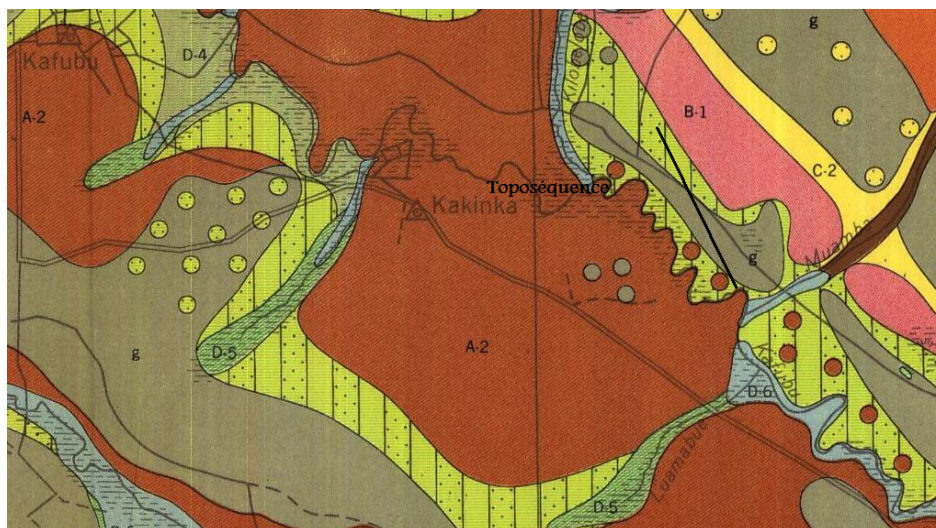


Figure 18 : Localisation de la toposéquence sur la carte pédologique (Sys, 1954-1956)

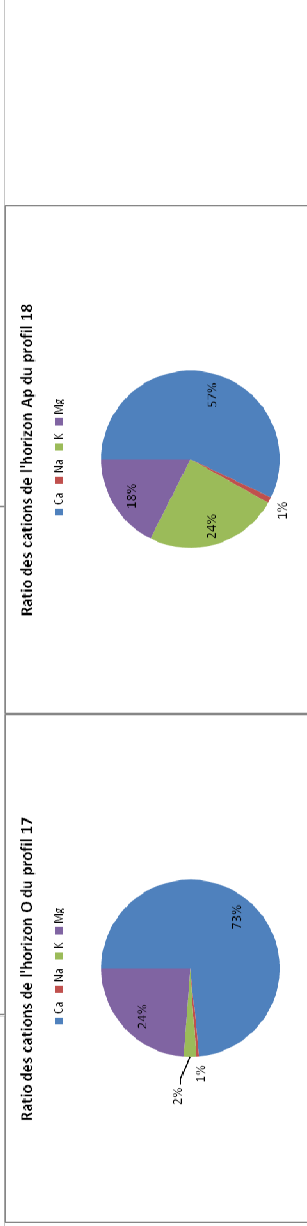
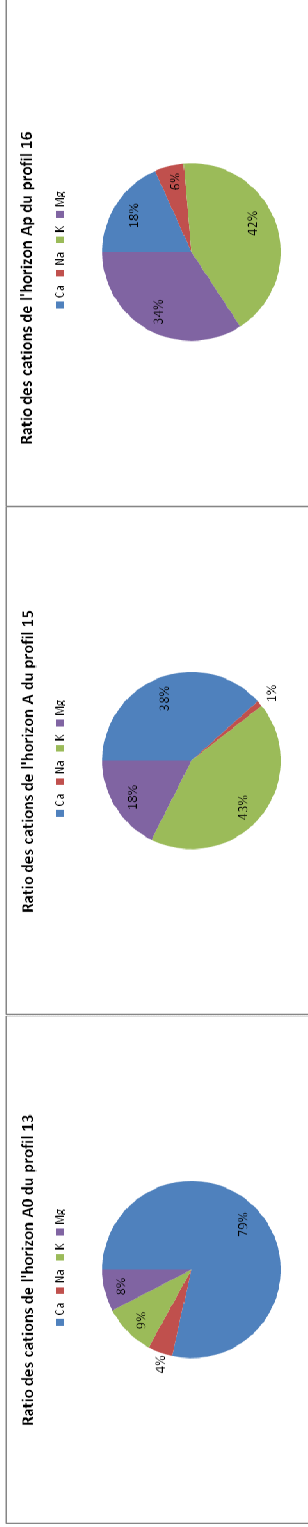
Unité 1

L'unité 1 est un sol profond brun-jaune bien drainé (10 YR à 7,5 YR). Les Alisols ferri endo-squelettiques sont caractérisés par une teinte brun jaune (Profil 13). L'horizon A présente une texture limoneuse tandis que les horizons B sont argileux. Ces sols ont une profondeur allant jusqu'à 150 cm. Le pH de ce type de sol est acide ($5 > \text{pH}_{\text{eau}} < 6$), il est légèrement plus élevé que les autres sites naturels. Nous constatons une activité biologique importante et la forte présence de racines dans les 50 premiers centimètres. Le rapport C/N est de 12,3, ce qui nous indique une décomposition rapide de la matière organique. Le calcium représente 79% des éléments échangeables.

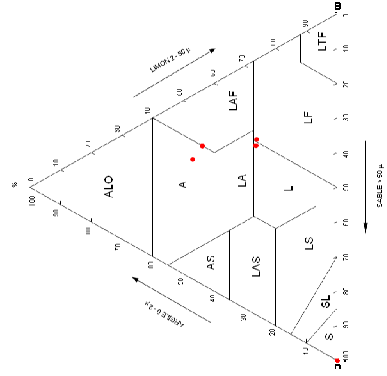
Planche 6 : Résultats de la toposéquence du monastère de Kansebula

N°	Hor.	Prof. des éch	pH			M.O Totale g/100g TS			Granulométrie				Eléments échangeables					% de saturation		
			pH _{Eau}	pH _{KCl}	▲ pH	C	N	C/N	A %	L %	S %	FAO Text.	meq/100g pour éch et cmol/kg pour la CEC	Na	Ca	K	Mg		S	CEC
P 13	A0	0 - 7	5,2	4,0	1,3	2,8	0,23	12,3	26	51	23	LF	0,04	0,69	0,08	0,07	0,88	18	4,8	
	B1	19 - 39	5,3	4,1	1,2	0,2	-	-	47	35	18	A	0,06	0,03	0,22	0,05	0,35	34	1,0	
	B2	39 - 121	-	-	-	-	-	-	44	40	16	A	0,01	0,11	0,07	0,07	0,26	13	2,0	
P 15	Bcs	157 - →	5,2	4,1	1,1	0,1	-	-	26	49	25	L	0,02	0,04	0,00	0,06	0,12	21	0,6	
	A	0 - 12	5,6	4,6	1,0	-	-	-	26	45	29	L	0,01	0,38	0,43	0,17	0,99	21	4,7	
	B1	12 - 32	5,1	3,7	1,4	-	-	-	30	46	24	LA	0,02	0,15	0,26	0,05	0,48	23	2,1	
	Bcs	32 - 84	-	-	-	-	-	-	43	0	57	AS	0,05	0,17	0,18	0,07	0,46	33	1,4	
P 16	Cg	131 - →	6,3	4,1	2,1	-	-	-	22	36	42	L	-	-	-	-	-	-	-	
	Ap	-	5,5	5,0	0,5	-	-	-	46	42	11	AL	0,01	0,04	0,09	0,07	0,21	19	1,1	
	Ah1	-	-	-	-	-	-	-	63	30	7,5	ALO	0,00	0,03	0,43	0,03	0,49	26	1,9	
P 17	E1	-	5,3	4,0	1,4	-	-	-	54	36	10	A	0,00	0,23	0,00	0,08	0,31	7	4,3	
	Ah2	-	5,8	4,8	1,1	-	-	-	51	38	11	A	-	-	-	-	-	-	-	
	O	0 - 9	**	**	**	5,0	0,35	14,1	-	-	-	-	0,01	0,91	0,03	0,29	1,24	34	3,6	
P 18	E1	31 - 69	**	**	**	0,1	-	-	-	-	-	-	0,01	0,18	0,00	0,05	0,24	16	1,5	
	Btc	69 - 93	**	**	**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Cg	112 - →	**	**	**	0,0	-	-	-	-	-	-	0,02	0,00	0,00	0,18	0,29	14	1,4	
	Ap	0 - 9	**	**	**	2,5	0,39	6,4	-	-	-	-	0,02	0,82	0,35	0,25	1,52	34	4,2	
P 18	Bws	80 - 158	**	**	**	0,6	-	-	-	-	-	-	0,01	0,34	0,11	0,13	0,67	32	1,8	
	C	170 - →	**	**	**	0,1	-	-	-	-	-	-	0,02	0,59	0,03	0,21	0,94	38	2,2	

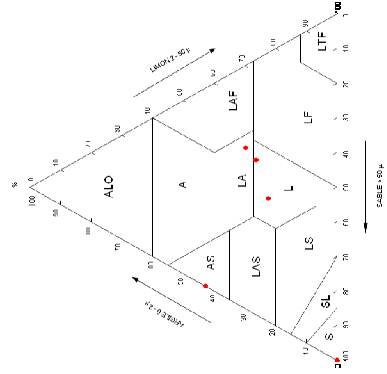
Hor : horizon ; prof. Ech. : Profondeur des échantillons ; Ch. : charge grossière ; M.O Totale : matière organique totale ; CEC : capacité d'échange cationique ; % de sat. : Pourcentage de saturation ; FAO Text : texture FAO ; ** : le manque de temps n'a pas permis de calculer tous les pH.



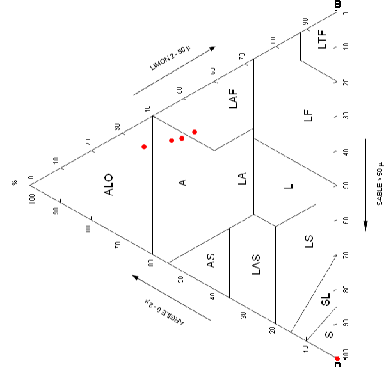
Triangule des textures du profil 13



Triangule des textures du profil 15



Triangule des textures du profil 16



Unité 2

Le type de sol (Profil 15) retrouvé sur cette unité appartient à un Alisol ferri épi-squelettique qui est un sol moyennement profond brun-jaune, bien drainé sur altérite schisteuse. La grande caractéristique de ce type de sol est la présence de charge caillouteuse dès le deuxième horizon. La décomposition de la matière organique est plus lente que pour la première unité (14,1). La texture de ces sols est limoneuse pour le horizon A avec une augmentation de la concentration en argile dans l'horizon Bcs. Les éléments échangeables les plus présents sont le potassium et le calcium. Le taux de saturation est de 4,7% pour l'horizon A et est décroissant en fonction de la profondeur.

Unité 3

Les types de sol représentés par les profils 16, 17 et 18 sont des sols faisant partie des Alisols ferri épi-squelettiques. La série Katuba est une série composée de carapaces latéritiques en voie de démantèlement parsemées de sol peu profond brun-jaune (Ag-3). La charge caillouteuse apparaît à partir de l'horizon E sous forme de fragments de roches altéritiques. Le rapport C/N est de respectivement 14,1 et 6,4 pour l'horizon O et Ap. Les teneurs en éléments échangeables sont faibles par rapport aux autres unités à part les teneurs en calcium qui sont élevées pour ce type de sol (0,91 et 0,82 méq/100g pour les horizons O et Ap des profils 17 et 18). Ces teneurs diminuent avec la profondeur. Le taux de saturation est plus élevé pour les premiers horizons et décroît avec la profondeur.

5.5.4 Le plateau entourant le monastère de Kansebula

Le monastère est entouré d'une forêt claire secondaire. Cette unité est située sur un plateau possédant une pente plus petite que 5%. Ce miombo est caractérisé par une influence anthropique (utilisation du bois pour la confection du charbon). Ce miombo peut être considéré comme une unité particulière située sur un sol appartenant à la série Baya (A-3) (figure 19). La végétation présente dans cette zone est ligneuse haute et basse. Elle est composée de *Brachystegia spiciformis*, de *Combretum melo*, de *Discorea* et d'*Afromum*. Le sol est brun-jaune (10 YR) avec un pH variant en fonction des horizons, il est élevé pour l'horizon A1. La texture est limono-argileuse pour l'horizon A et la fraction argileuse augmente avec la profondeur. La teneur en calcium échangeable est élevée pour l'horizon A et B2 (respectivement 0,54 et 0,42 méq/100g). Le potassium est présent à raison de 86% dans l'horizon C2. La capacité d'échange cationique est supérieure à 20 cmol/kg sauf pour l'horizon A. Le taux de saturation de l'horizon A est de 5,4% et diminue avec la profondeur (planche 7 et Annexe 7).

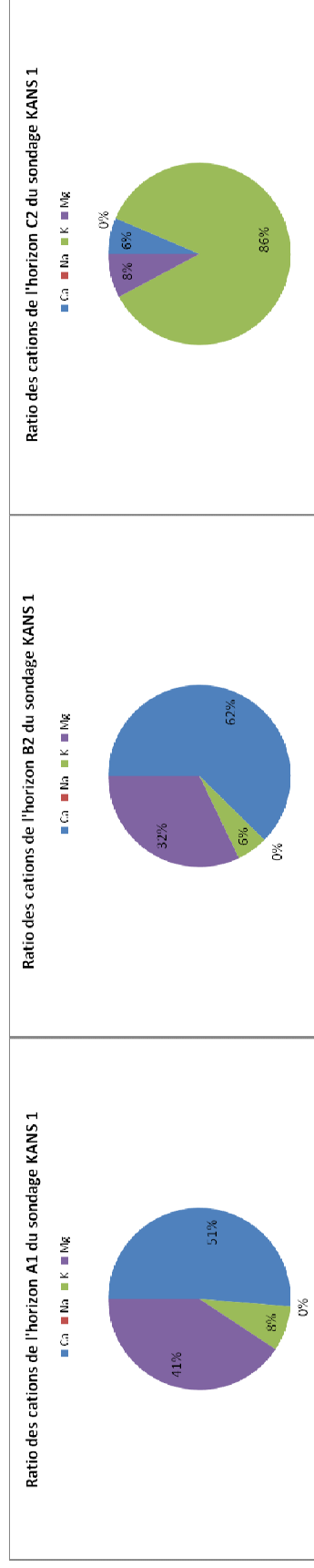


Figure 19 : Horizon du sondage effectué en Miombo

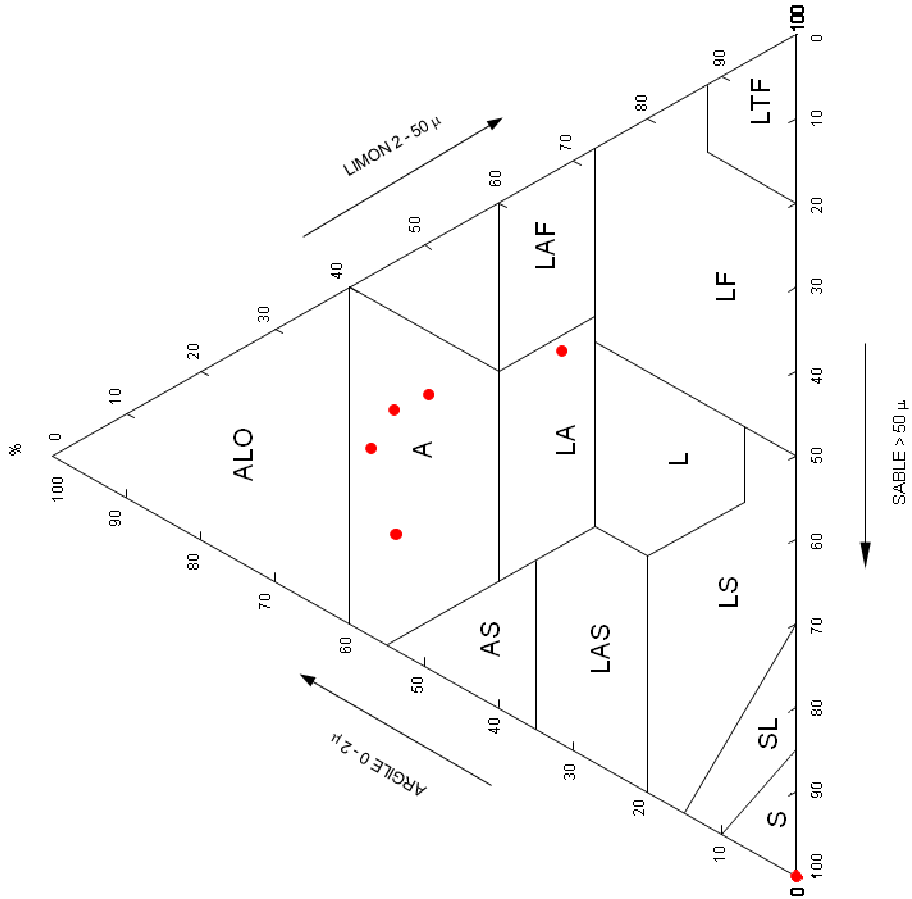
Planche 7 : Résultats obtenus dans la forêt claire de Kansebula

N° Hor.	Prof. éch.	Ch. %	pH		M.O Total g/100g TS			Granulométrie				Cations échangeables et CEC					% de Sat. V		
			pH _{Eau}	pH _{KCl}	▲pH	C	N	C/N	A% (0-2µ)	L %	S %	FAO Text.	meq/100g pour la CEC	Na	Ca	K		Mg	S
A1	0 – 16	1,2	6,0	5,0	1	-	0,17	-	32	47	22	LA	0,00	0,54	0,08	0,43	1,06	20	5,4
B 1	16 – 24	4,1	-	-	-	-	0,06	-	49	32	18	A	-	-	-	-	-	-	-
B 2	35 – 50	5,2	4,9	3,9	1	-	-	-	54	28	18	A	0,00	0,42	0,04	0,22	0,68	26	2,6
B 2	60 – 75	2,0	-	-	-	-	-	-	54	14	32	A	-	-	-	-	-	-	-
C 2	78 – 115	1,1	5,3	4,0	1,3	-	-	-	57	22	21	A	0,00	0,03	0,37	0,03	0,43	25	1,7

Hor : horizon ; prof. Ech. : profondeur des échantillons ; Ch. : charge grossière ; M.O Totale : matière organique totale ; CEC : capacité d'échange cationique ; % de sat. : pourcentage de saturation ; FAO Text : texture FAO.



Triangle des textures du sondage KANS 1



6 Le site de la Gécamines

6.1 Introduction

Ce chapitre tentera de mieux cerner les observations effectuées sur le terrain à l'aide de profils, de miniprofils et de sondages ainsi que les données obtenues en laboratoire. Dans un premier temps, le site sera décrit de manière générale. Puis, les deux unités présentes sur le site de la Gécamines seront caractérisées. La première unité reprend les plateaux et les versants de ce site. Une première toposéquence effectuée sur la première unité recoupe le site contaminé selon une direction SE-NO, elle débute à la cheminée, traverse le plateau Gécamines pour se terminer sur le plateau Karavia. Une seconde toposéquence qui recoupe l'unité de fond de vallées suit le tracé de la rivière Karavia et permettra d'apprécier le transfert des éléments traces métalliques dans les sédiments. Cette description permettra de classer les différentes observations dans les types de sol repris sur ce site. Différentes approches ont été entreprises : l'approche pédopaysagère visant à évaluer les caractéristiques générales des différentes unités tandis que l'approche solum vise à établir une différenciation verticale entre les horizons. Une fois, les sols décrits, nous établirons des comparaisons entre ce site et les sites non ou peu contaminés (figure 20).



Figure 20 : Localisation des deux toposéquences par rapport à Lubumbashi (Google earth, 2008)

6.2 Description du site

Le quadrant nord-ouest de la cheminée situé dans la direction des vents dominants présente une grande étendue de sols ayant un état de dégradation très avancée. Certains sols dénudés sont soumis à l'érosion, à l'imperméabilisation et au ruissellement des eaux de pluies. Les quartiers de la Gécamines constituent un site très fortement influencé par l'anthropisation et très fortement dégradé. De nos jours, le trafic routier est devenu très important et il conduit à une augmentation des effets néfastes. L'exploitation du site pour la fabrication de briques et la récolte du quartz ont remanié partiellement les sols. Ces facteurs ont dû être pris en compte pour l'évaluation des contaminations entre les différents types de sol. De nombreuses habitations illégales se sont installées dans ce quartier et favorisent encore plus le transfert des éléments traces métalliques (remblai). Plusieurs études ont montré que la distribution et la répartition des particules atmosphériques étaient liées à leur dimension et aux propriétés des surfaces sur lesquelles elles se déposent (Haubert et *al.*, 1971). Ces dépôts pouvant être délocalisés par le vent, les pluies ou les écoulements des surfaces. En effet, les sols situés dans l'enceinte ou au voisinage de l'usine, qui sont des collecteurs naturels des retombées atmosphériques, constituent à leur tour des sources de contamination diffuse susceptibles de contaminer. La zone d'étude est constituée de deux plateaux (Gécamines et Karavia) séparés par une vallée au versant faiblement incliné. Cette vallée est divisée par un affluent de la rivière Karavia ainsi que par la rivière Karavia. Les rivières sont abondamment polluées par des déchets ménagers. Une augmentation de l'urbanisation du plateau Karavia est constatée et des lignes électriques mal entretenues parsèment le site (figure 20).

La carte de l'occupation des sols levée en 1955 par Sys (figure 21), nous indique que ce site présentait quatre grandes occupations :

- I b1 = zone de marais nécessitant un drainage toute l'année ;
- IIa = pâturages naturels ou artificiels de saison des pluies ;
- IIIa = forêt exploitable ;
- IV = site urbain.

Les pâturages se situent dans les zones humides tandis que les forêts exploitables sont sur les plateaux proches des habitations. Les zones de culture sont limitées aux zones de vallée. L'occupation actuelle des sols se limite à des habitations, des cultures maraîchères (potagers) et un cimetière ainsi qu'à de vastes zones en friche. La détérioration du site ne permettrait plus la présence de pâturages ou de forêt exploitable. Les photos de la planche 8, nous montrent bien l'évolution du site depuis cinquante ans. Les arbustes ne dépassent pas le mètre et se limitent à quelques espèces. La végétation est plus abondante au niveau des termitières mais elle reste néanmoins restreinte au niveau de l'abondance des espèces. Chaque culture est effectuée au prix d'un apport élevé en matière organique. Les cultures les plus productives se situent le long de la rivière Karavia. Le plateau Karavia présente plus une allure de pâturages naturels ou artificiels que le plateau Gécamines.

Planche 8 : Comparaison des occupations actuelles avec celle anciennement présentes

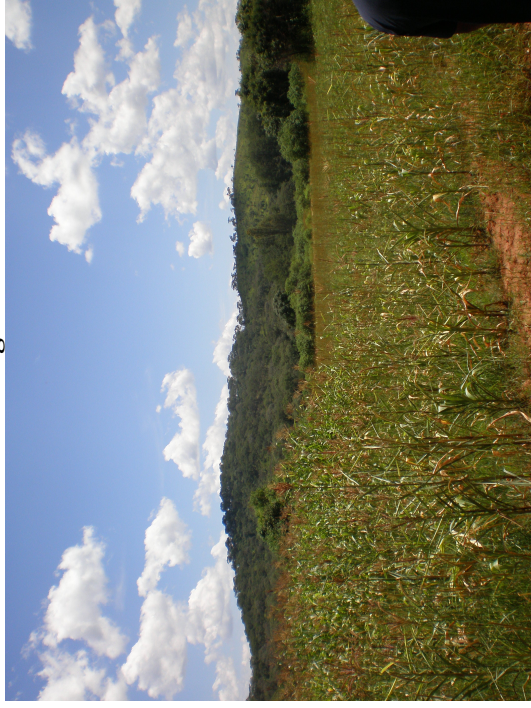
Forêt claire exploitable



Ancien site d'exploitation forestière



Site agricole



Potager dans les zones de vallées



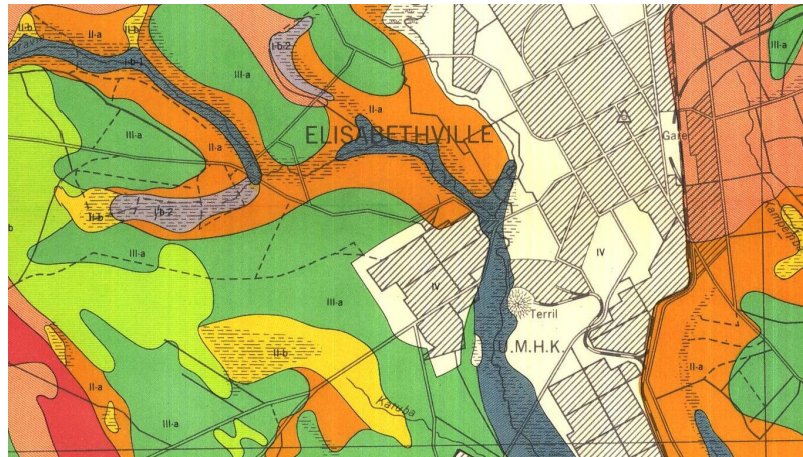


Figure 21 : Carte de l'occupation des sols d'après Sys, 1955 (échelle 1/60000)

Les documents en notre possession nous ont permis de distinguer plusieurs types de sol (figure 23). Trois types de sol zonaux sont repris. La série Kaponda (A2) est largement distribuée sur le plateau de la Gécamines surtout au niveau du cimetière et du versant vers la rivière Karavia. Ces sols sont soit nus et subissent alors une forte érosion, soit occupés par une végétation herbacée et arbustive décrite ci-dessous. La série Baya (A3) qui est un sol brun-jaune, bien drainé et la série Musaonga (Ag3) qui est aussi un sol brun-jaune avec présence de cailloutis à la base sont les types de sol les plus fréquents sur cette aire. La série Baya est fortement présente sur le plateau de la Gécamines ainsi que sur le plateau Karavia. La série Musaonga se situe sur le versant du plateau Gécamines et peut s'observer en alternance avec la série baya sur le plateau de la Karavia. La série Mutwale (D5) et la série Lubumbashi sont des sols intrazonaux de fond de vallées, ces sols se retrouvent au niveau de la rivière Karavia et de son affluent. Ils sont caractérisés par une végétation herbacée. La série Mutwale présente une hydromorphie commençant à 50 cm de profondeur tandis que la série de Lubumbashi est composée de sols jeunes développés sur sols alluviaux. Il s'agit de nappes d'épandage d'alluvions formant des cônes de déjections extrêmement aplatis. Ces sols sont homogènes, profonds et à structure polyédrique parfois bien marquée. Certains sols peuvent être des cuirasses latéritiques en voie de démantèlement (g), ils sont appelés série Katuba (g). Ils parsèment les sols brun-jaune profonds et peu profonds sur le plateau Karavia. Les Gleysols des versants se situent au même niveau topographique que les Alisols ferri endo et épi-squelettiques. La transition entre ces sols est progressive et la pente est inférieure à 5% (figure 22).

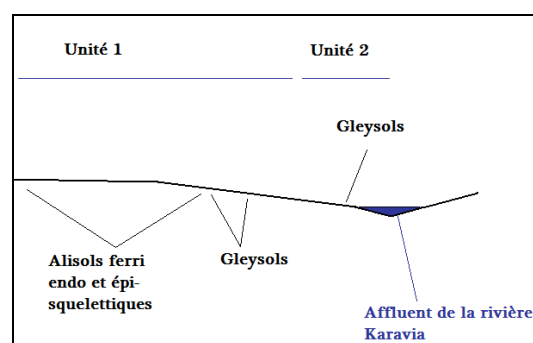


Figure 22 : Distinction entre les Gleysols de versant et ceux de fond de vallée (échelle exagérée)

Comme cité dans le chapitre précédent, les sols zonaux sont des Alisols. Chaque série se distingue des autres par certaines caractéristiques. Il y a trois sous-groupes présents les Alisols Rhodiques, les ferri endo-squelettiques et les ferri épi-squelettiques, ils correspondent respectivement à la série Kaponda, la série Baya et la série Musaonga. Les Alisols Rhodiques sont caractérisés par un profil homogène d'une teinte 2,5 YR sur une grande profondeur. Les sols ferri endo-squelettiques sont jaunes et des concrétions d'oxydes de fer apparaissent à plus de 50 cm de profondeur et deviennent plus nombreuses jusqu'à former un banc compact. Les ferri épi-squelettiques se distinguent du précédent par l'apparition de concrétions à une profondeur inférieur à 50 cm. La série Mutwale est un Gleysol et la série Lubumbashi est un Fluvisol Umbrique selon la classification WRB. Les Gleysols ont été examinés le long de l'affluent qui se jette dans la rivière Karavia et les Fluvisols Umbriques se retrouvent le long de la rivière Karavia. Les sols azonaux sont des Plinthosols caractérisés par une cuirasse latéritique présente dans les cinq premiers centimètres du sol (figure 23).

L'anthropisation est un facteur qui remanie complètement les horizons. Un dépôt surfacique peut être distingué à l'œil nu au niveau du sol (planche 9). Ces couches de dépôts ont une épaisseur variable d'environ 5 cm. Ces horizons peuvent soit se retrouver à l'air libre, soit être enfouies en dessous d'autres horizons ou soit être absentes à cause de l'érosion. Le plateau de la Gécamines est un plateau présentant ces trois types d'observation. cet horizon contaminé a été appelé l'horizon (C). En raison de sa faible épaisseur, certains échantillons ont été mélangés avec cet horizon c'est pourquoi les observations de ces couches ont été décrites par des minifosses de 50 cm. Les minifosses nous ont permis de mieux caractériser cet état de surface différent. La construction d'habitations ainsi que leur abandon a créé des horizons remaniés les différenciant de leur sol originel.

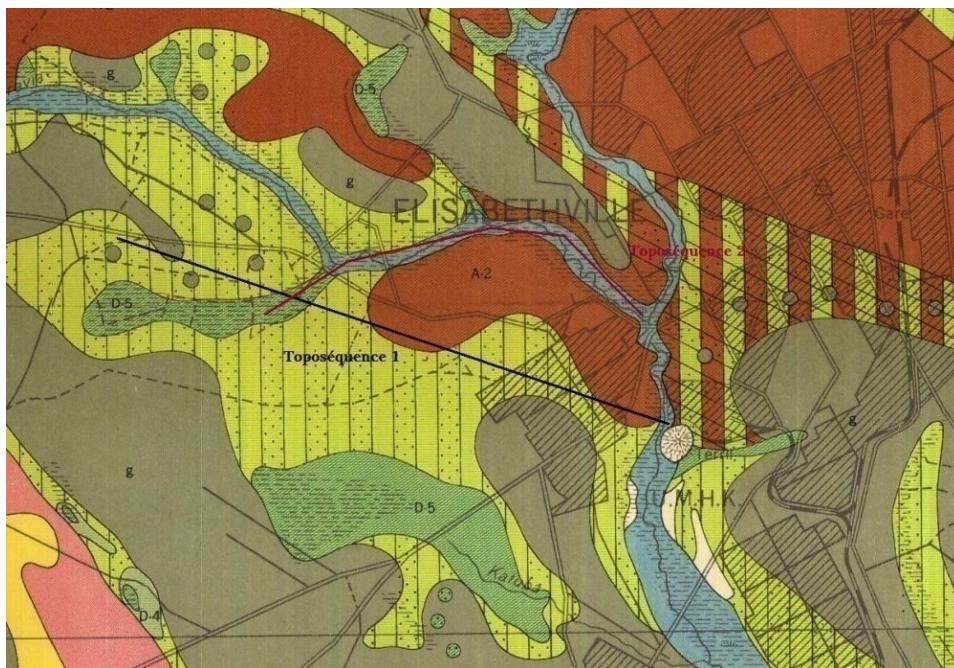


Figure 23 : Localisation des deux toposéquences sur la carte pédologique (1/60000) (Sys, 1954-1956)

Planche 9 : Horizon remanié sur les sites de la Gécamines



Horizon (C)



Site érodé sur le plateau de la Gécamines



Déchets ménagers

La toposéquence 1 recoupe quatre unités : le plateau Gécamines ; le versant ; la rivière Karavia et le plateau Karavia (figure 24). Elle commence au niveau du plateau de la Gécamines pour descendre en direction de la rivière Karavia et se termine sur le plateau Karavia. Elle représente environ 10 km de long sur 1 km de large. Aucun sondage ni profil n'a été réalisé entre la cheminée de la Gécamines et le plateau car la population locale se trouvait être fort méfiante vis-à-vis de nous et refusait toute observation sur les parcelles. La zone de la Gécamines est entourée au Nord par le quartier Golf, au Sud par le quartier Mampala, à l'Ouest par les quartiers de la commune Katuba ; elle comprend le quartier résidentiel composé de quatre cellules et un cimetière en face duquel, on trouve une zone inhabitée ; elle correspond au quadrant Nord-Ouest, si on considère la grande cheminée des usines Gécamines comme centre (figure 6 et figure 20). Les pentes sont peu marquées, < 2 % pour le plateau et entre 2 et 5 % pour le versant. Les habitations sont présentes jusqu'à la rivière Karavia sauf du côté du cimetière où le site est resté relativement préservé d'activité humaine et la pente est supérieure à 5 %. La rivière Karavia mesure environ 10 à 20 mètres de large en saison des pluies. Elle influence très fortement le comportement des sols qui l'entourent (caractère hydromorphe). Le cercle hippique se situe juste après la rivière Karavia. La dégradation de ce site est moins forte, la végétation y est plus développée et on peut considérer la formation végétale comme étant herbacée et ligneuse haute. Le plateau Karavia est moins urbanisé que celui de la Gécamines et sa végétation est plus dense. Toute cette toposéquence est parsemée de termitières qui sont soit exploitées pour la fabrication de brique soit laissées intactes. Les sols du plateau de la Gécamines sont généralement nus et donc subissent plus fortement l'érosion. La strate arbustive présente sur cette aire se limite à quelques espèces n'atteignant pas leur croissance optimale, les plus présentes sont le *Brachystegia spiciformis*, l'*Anona senegalensis*, le *Julbernardia paniculata*. Le *Bulbostylis pseudoperennis*, l'*Haumaniastrum katangense*, le *rendlia altera* et le *Crepidorhodon tenuis* sont les espèces cuprophytes les plus courantes. Certaines espèces sont des vestiges des pâturages naturels ou artificiels anciennement présents tels que l'*Imperata cylindrica*, l'*Hypparhenia diplandra*, le *Setaria palidifusca* et le *Pennisetum sp.*.

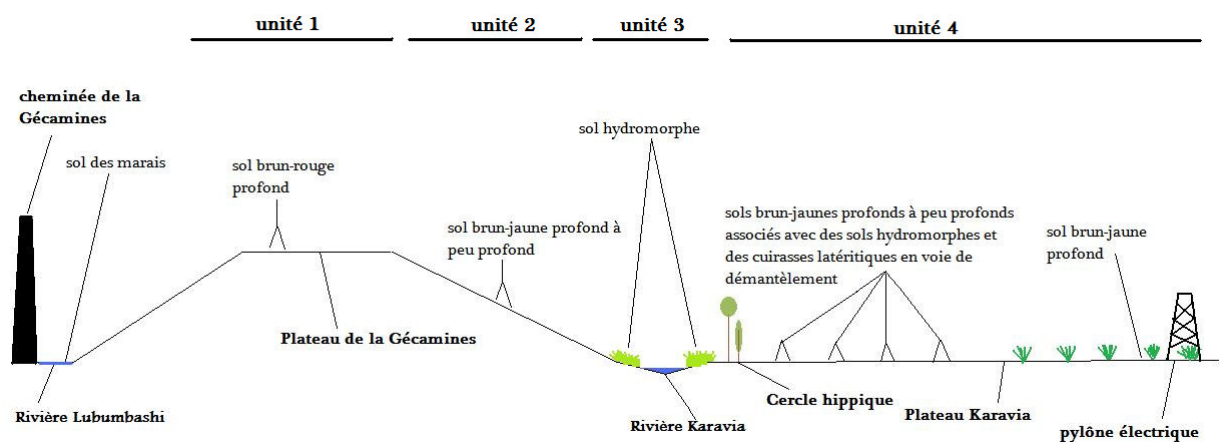


Figure 24 : Toposéquence du site de la Gécamines (échelle exagérée)

La toposéquence 2 vise à évaluer les transferts des ETM dans les sédiments. Celle-ci suit le tracé de la rivière Karavia jusqu'à son confluent avec la rivière Lubumbashi. Un affluent de la rivière Karavia a aussi été pris en compte. En fin de compte, ce transect ceinture le plateau Gécamines et permet de mieux apprécier les transferts de surface. Cette toposéquence se situe dans un bas fond où deux unités pédologiques ont été distinguées. La végétation de la première unité est constituée d'une végétation de vallée et de marais tels que le *Phragmites tiphaniapa*, le *Papyrus sp.* et le *Cyperus sp.* tandis que la deuxième unité est composée d'une pelouse herbacée constituée *Crepidiorhopalon tenuis*, *Haumaniastrum Katangense*, *Setaria palidefusca*, *Imperata cylindrica*, etc.

6.3 Approche pédopaysagère

6.3.1 Plateau et versant

6.3.1.1 Alisols Rhodiques

Ces types de sol sont présents sur le plateau de la Gécamines, ils présentent soit un horizon contaminé (C) soit un sol érodé qui dévoile directement les horizons B. Certaines observations ont un horizon A comme premier horizon mais il faut rappeler que cet horizon est parfois mélangé à l'horizon contaminé. Il faut bien entendu séparer deux types d'observations : les observations sur le plateau et celles sur le versant du cimetière car la pente de ce versant est d'environ 10% (figure 25). Les observations du plateau présentent des surfaces contaminées et des surfaces érodées tandis que l'érosion est moins forte sur le versant qui possède une pente inférieure à 5%. La végétation est principalement herbacée et parsemée de quelques arbustes. On peut notamment observer le *Bulbostylis pseudoperennis*, l'*Haumaniastrum Katangense*, le *Rendlia altera* et les arbustes sont le *Brachystegia spiciformis* et le *Julbernardia paniculata*. La majorité de cette aire est un site urbain où certaines activités sont présentes comme des carrières ou des fabriques de briques (planche 10 et Annexe 8).

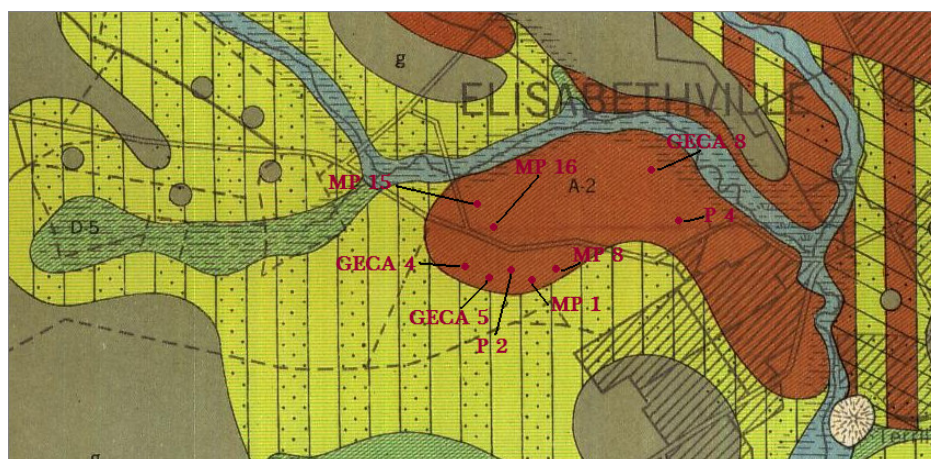
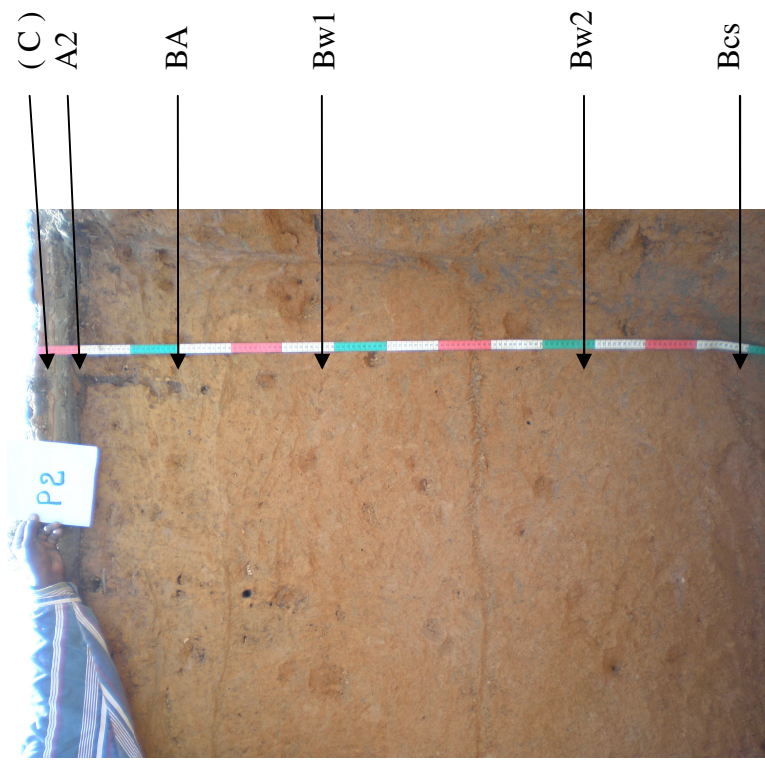


Figure 25 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Alisols Rhodiques

Planche 10 : Fosse effectuée sur un Alisol Rhodique



Le pH de ces sols est très acide avec une moyenne égale à 5 et 4,6 respectivement pour le pH_{eau} et le pH_{KCl} . La moyenne du rapport C/N est de 14. La texture de ces sols est argileuse. C'est le potassium qui est l'élément échangeable le plus présent avec 0,10 et 0,30 méq/100g pour respectivement l'horizon de surface et l'horizon en profondeur. Le sodium est plus présent dans ce type de sol. La moyenne de la CEC est relativement faible. Une charge caillouteuse est parfois présente à partir de 50 cm, elle est composée de quartz et de shale. La structure est polyédrique subangulaire mais la structure de certains horizons est parfois grenue, grumeleuse ou particulaire surtout pour les horizons de surface. La porosité de ces types de sol varie de peu poreux à très poreux avec des pores d'une dimension égale à 1 mm (tableau 5).

Tableau 5 : Résultats des Alisols Rhodiques

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Élément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH_{eau}	pH_{KCl}	▲ pH	Ac. Ech.	C g/100g	N	C/N	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V %
Horizon de Surface																	
Effectif	9	9	9	5	9	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Moyenne	5,0	4,6	0,4	2,9	0,9	0,07	14,9	43	23	33	0,00	0,14	0,10	0,01	0,25	15	2
Ecart type	0,6	0,9	0,4	0,4	0,6	0,02	1,9	15	16	17	0,00	0,05	0,04	0,01	0,09	6	0
CV%	12,4	20,2	96,1	14,9	66,7	33,48	12,4	36	69	53	14,20	36,87	40,17	35,51	36,60	41	5
Horizon en Profondeur																	
Effectif	5	5	5	4	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
Moyenne	4,7	3,9	0,8	3,1	0,3	0,05	6,8	47	27	18	0,09	0,10	0,30	0,06	0,56	18	4
Ecart type	0,4	0,1	0,3	0,3	0,3	0,03	2,4	5	5	12	0,09	0,02	0,40	0,03	0,47	9	4
CV%	8,9	3,4	41,1	8,3	106,7	64,59	35,6	10	18	68	100,24	21,65	132,91	43,14	84,42	48,0	104,6

Ac. Ech. : acidité d'échange

Ce type de sol est fortement contaminé par les éléments traces métalliques, la teneur en cobalt est quatre fois plus importante que la moyenne obtenue pour des sols « naturels ». La teneur en cuivre a une moyenne de 10339 mg/kg ce qui indique une forte contamination par des dépôts et nous laisse supposer que le cuivre est fortement lié à la phase solide du sol car même les Alisols Rhodiques érodés montrent des teneurs élevées par rapport aux sols non ou peu contaminés. Les teneurs en plomb, en cadmium et en zinc sont supérieures à la norme AFNOR qui est respectivement de 100 mg/kg, 2 mg/kg et 300 mg/kg, néanmoins, selon Baize (1997), la norme AFNOR n'est utile que pour des sols agricoles. Ces teneurs sont pratiquement le double de celles tolérées par les normes. Les coefficients de variation sont très élevés, certains dépassent les 100%. Les teneurs totales en fer et en aluminium sont très élevées avec respectivement 3,7 et 3,5 g/100g et augmente avec la profondeur (tableau 6).

Tableau 6 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Alisols Rhodiques

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g			mg/kg				
Horizon de surface												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	49	421	1348	52	3,7	3,5	127	10339	168	515	8,9	1162
écart type	7	198	1081	38	2,9	2,8	70	13693	175	687	9,0	1599
CV%	1	5	8	7	76	79	55	132	104	133	101	138
Horizon en profondeur												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	28	309	1347	74	7,7	5,7	322	300	35	19	2,3	571
écart type	1	88	1052	21	4,3	3,7	437	121	17	28	2,4	865
CV%	0,2	3	8	3	55	66	135	41	48	146	106	152

6.3.1.2 Alisols ferri endo-squelettiques

Les Alisols ferri endo-squelettiques sont les types de sol les plus abondants sur cette aire (figure 26). Ils se retrouvent sur le plateau de la Gécamines, le versant de celui-ci et surtout sur le plateau Karavia. La morphologie du relief est plane même sur les versants où la pente ne dépasse pas les 5%. La formation végétale est herbacée et ligneuse basse. Elle se compose de *Brachystegia spiciformis*, de *Julbernardia paniculata*, de *Setaria palidifusca*, d'*Imperata cylindrica* et d'un tapis de *Bulbostylis pseudoperennis* (planche 11 et Annexe 9).

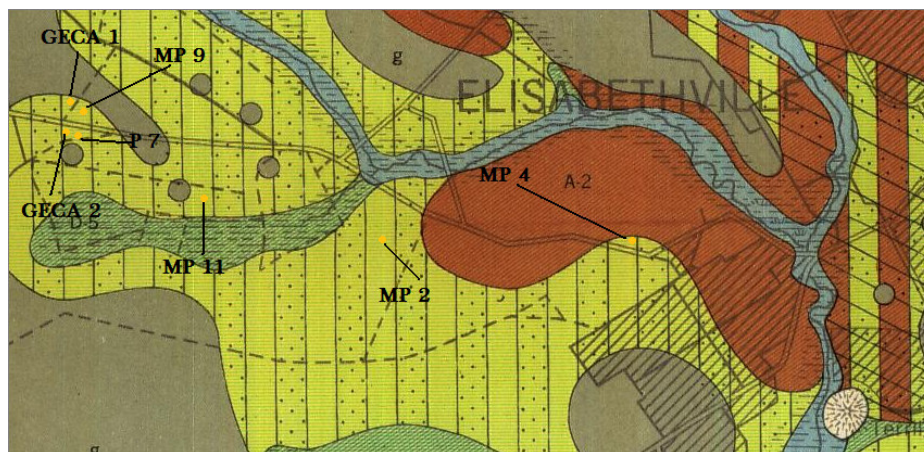


Figure 26 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Alisols ferri endo-squelettiques

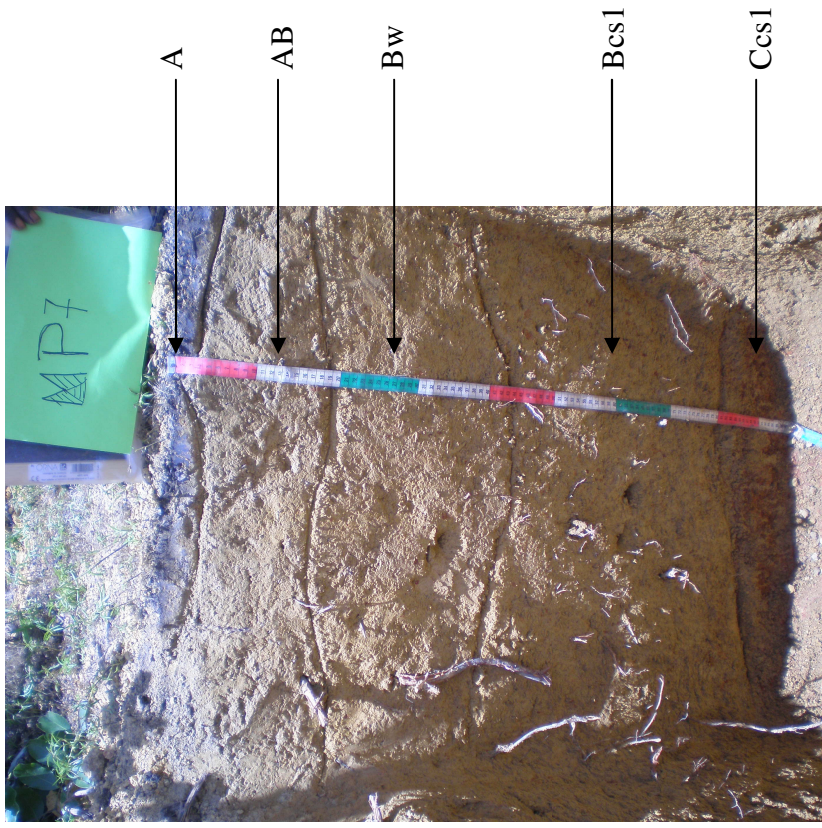
La structure de ces sols est très souvent particulière pour les horizons de surface et polyédrique subangulaire pour les horizons inférieurs. Les racines se situent dans les 20 premiers centimètres du sol. Ces sols ont peu de pores ne dépassant pas les 1 mm. Ils ont un pH moyen plus élevée que les Alisols Rhodiques (5,6 et 4,9 pour le pH_{eau} et pH_{KCl}). La moyenne du rapport C/N est supérieur à 15 ce qui indique une décomposition moyennement lente de la matière organique. La texture de ce type de sol est limono-argileuse. Le potassium, le calcium et le magnésium sont les éléments échangeables les plus présents avec respectivement des teneurs moyennes de 0,28 méq/100g, 0,60 méq/100g et 0,21 méq/100g. Ces teneurs moyennes sont bien plus élevées que pour les Alisols Rhodiques. La capacité d'échange cationique est supérieure à 20 cmol/kg pour l'horizon de surface et égale à 19 cmol/kg pour l'horizon en profondeur (tableau 7).

Tableau 7 : Résultats des Alisols ferri endo-squelettiques

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Élément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH_{eau}	pH_{KCl}	ΔpH	Ac. Éch.	C g/100g	N	C/N	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V%
Horizon de Surface																	
Effectif	6	6	6	-	6	6	6	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Moyenne	5,6	4,9	0,7	-	3,4	0,24	16,9	37	20	21	0,60	0,12	0,28	0,21	1,21	34	4
Ecart type	0,6	0,7	0,4	-	0,9	0,09	9,3	-	-	-	0,83	0,01	0,23	0,19	0,80	10	4
CV%	11,1	14,3	58,0	-	25,1	37,48	55,0	-	-	-	138,39	6,66	81,79	91,56	65,72	29	86
Horizon en Profondeur																	
Effectif	3	3	3	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne	5,3	4,6	0,7	-	-	-	-	36	30	31	0,01	0,11	0,10	0,07	0,28	19	2
Ecart type	0,5	0,8	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	8,5	17,8	128,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ac. Ech. : acidité d'échange

Planche 11 : Fosse effectuée sur un Alisol ferri endo-squelettique



Les teneurs en éléments traces métalliques sont plus importantes que dans les Alisols Rhodiques à l'exception du cuivre et du zinc. Néanmoins, les moyennes obtenues dépassent largement les normes AFNOR et confirment une contamination du site à grande échelle étant donné que ce type de sol est celui qui se retrouve le plus éloigné de l'origine de la contamination. Les coefficients de variations du cuivre et du plomb sont plus faibles que pour les Alisols Rhodiques. Les autres coefficients de variation des éléments analysés ont le même ordre de grandeur. Les teneurs en fer et aluminium sont inférieures à celles des Alisols Rhodiques (tableau 8).

Tableau 8 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Alisols ferri endo-squelettique

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g			g/100g			mg/kg					
Horizon de surface												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	77	204	532	75	2,9	2,0	438	9430	271	578	12,2	372
écart type	27	47	277	2	2,1	0,1	313	6056	62	452	2,5	361
CV%	4	2	5	0	74	4	72	64	23	78	20	97
Horizon en profondeur												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	53	201	532	75	2,9	2,0	438	478	15	9	0,3	70
écart type	26	66	277	2	2,1	0,1	313	593	11	8	0,4	40
CV%	5	3	5	0	74	4	72	124	71	96	126	58

6.3.1.3 Alisols ferri épi-squelettiques

La profondeur d'apparition de la charge caillouteuse est plus faible que les Alisols ferri endo-squelettiques, elle est inférieure à 50 cm. Les observations sont réparties sur l'ensemble du transect. Ces sols se retrouvent sur les versants mais aussi sur les plateaux, leurs pentes ne dépassant pas les 5%. La formation végétale est herbacée et est composée d'*Haumaniastrum katangense*, de *Bulbostylis pseudoperennis* et d'*Imperata cylindrica* (figure 27, planche 12 et Annexe 10).

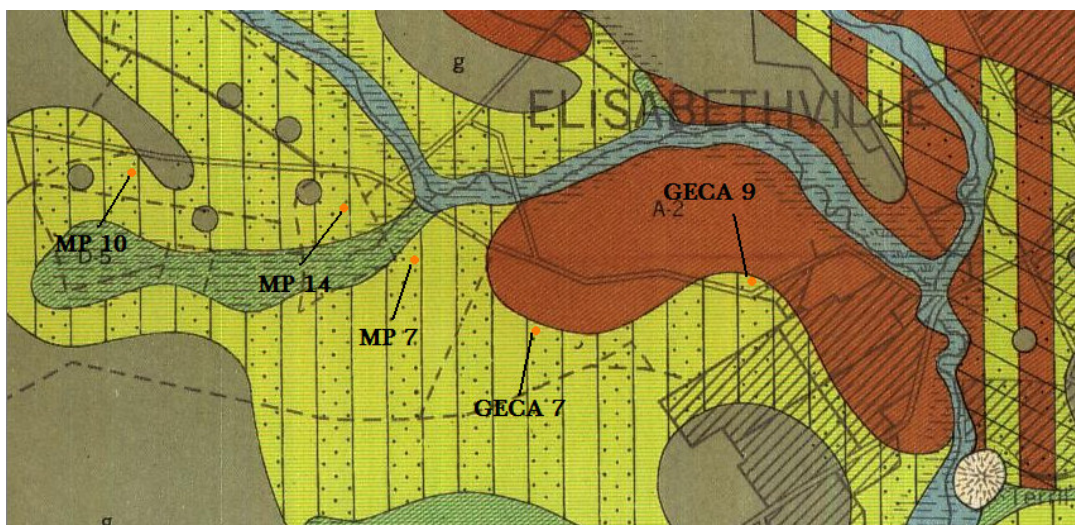


Figure 27 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Alisols ferri épi-squelettiques

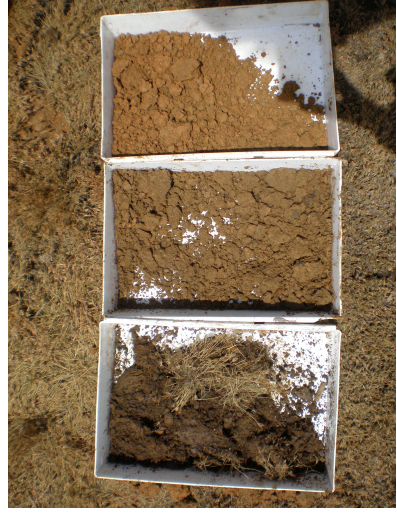
Planche 12 : Minifosse effectuée sur un Alisol ferri épi-squelettique



A (C)

A

Bcs



La structure de ces sols dépend de la texture des sols, elle est polyédrique subangulaire quand la fraction argileuse est fortement présente et grenue quand le sol possède une teneur importante en sable. La texture de ces sols est limono-argileuse. La porosité diminue avec la profondeur et la dimension des pores ne dépasse pas 1 mm. Les racines sont observées dans les vingt premiers centimètres du sol, il est à noter l'abondance des racines d'*Imperata cylindrica* dans les dix premiers cm. Ces sols ont de nombreuses tâches d'altération provenant de la charge caillouteuse. Le pH_{eau} et le pH_{KCl} sont respectivement de 4,9 et de 4,4. Ce sol est donc plus acide que les Alisols ferri endo-squelettiques présents sur cette aire. Le rapport C/N est de 25,5 ce qui montre une décomposition de la matière organique très lente. La moyenne de leur CEC est inférieure aux teneurs obtenues pour les ferri endo-squelettiques, elle est de 20 cmol/kg. Ces sols sont légèrement plus riches en calcium et en magnésium que les Alisols Rhodiques. Les coefficients de variation sont élevés pour la majorité des paramètres analysés à l'exception du pH (tableau 9).

Tableau 9 : Résultats des Alisols ferri épi-squelettiques

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Elément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH_{Eau}	pH_{KCl}	ΔpH	Ac. Ech.	C g/100g	Z	C/N	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V%
Horizon de Surface																	
Effectif	5	5	5	2	5	4	4	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Moyenne	4,9	4,4	0,6	3,1	3,0	0,19	25,5	37	38	25	0,29	0,10	0,15	0,07	0,61	20	4
Ecart type	0,5	0,5	0,3	0,2	1,9	0,15	26,3	9	5	8	0,43	0,06	0,11	0,07	0,57	10	4
CV%	9,5	11,5	43,5	6,2	63,6	79,89	103,0	25	13	33	147,98	54,28	78,06	94,24	93,43	47	106
Horizon en Profondeur																	
Effectif	2	2	2	1	2	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2	2	2
Moyenne	4,9	4,3	0,5	3,5	0,2	-	-	-	-	-	0,05	0,06	0,22	0,05	0,38	15	3
Ecart type	0,7	0,8	0,1	-	0,1	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,20	0,03	0,22	1	2
CV%	15,0	19,4	21,8	-	59,4	-	-	-	-	-	0,97	1,24	88,10	58,46	58,49	9	66

Ac. Ech. : acidité d'échange

Les moyennes en cuivre, cobalt sont plus faibles sur ce type de sol que pour les deux précédents. La teneur moyenne en cadmium est inférieure aux deux sols présents sur ce site alors que celle du zinc est supérieure à celle des Alisols ferri endo-squelettiques et correspond à la moitié de celle des Alisols Rhodiques. La teneur totale en cobalt ne dépasse pas les normes AFNOR (300 mg/kg) pour ce type de sol, elles sont de 93 mg/kg. Les coefficients de variation restent élevés pour le cuivre et le plomb tandis que les autres éléments présentent un coefficient de variation inférieur à 100%. Ces types de sol présentent les teneurs en fer et en aluminium les plus élevées après les Alisols Rhodiques (tableau 10).

Tableau 10 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Alisols ferri épi-squelettique

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/kg					
Horizon de surface												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	36	262	1405	72	2,9	3,0	72	4943	93	498	6,4	662
écart type	3	84	619	4	1,3	2,1	41	4713	44	678	5,4	451
CV%	1	3	4	1	44	72	56	95	48	136	84	68
Horizon en profondeur												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	34	286	1734	66	4,2	4,8	117	250	45	5	5,1	141
écart type	9	116	610	21	0,9	4,5	65	103	21	3	2,8	124
CV%	3	4	4	3	22	94	55	41	47	69	56	88

6.3.1.4 Gleysols

La majorité des observations a été effectuée au niveau de l'affluent se jetant dans la rivière Karavia (figure 28). Tous ces profils, sondages et miniprofils ont été réalisés au tiers supérieur d'une morphologie en cuvette de pente inférieure à 5%. La transition entre ces sols et les Alisols ferri endo et épi-squelettiques se discerne peu, le relief et la végétation herbacée sont fortement semblables entre ces sols. La formation végétale est herbacée, elle est constituée du *Crepidiorhopalon tenuis*, du *Bulbostylis pseudoperennis*, d'*Haumaniastrum katangense* et d'*Imperata cylindrica*. Ces Gleysols sont caractérisés par l'apparition de tâches d'oxydo-réduction à partir des dix premiers centimètres et des concrétions d'oxydes de fer apparaissent dans les derniers horizons (planche 13 et Annexe 11).

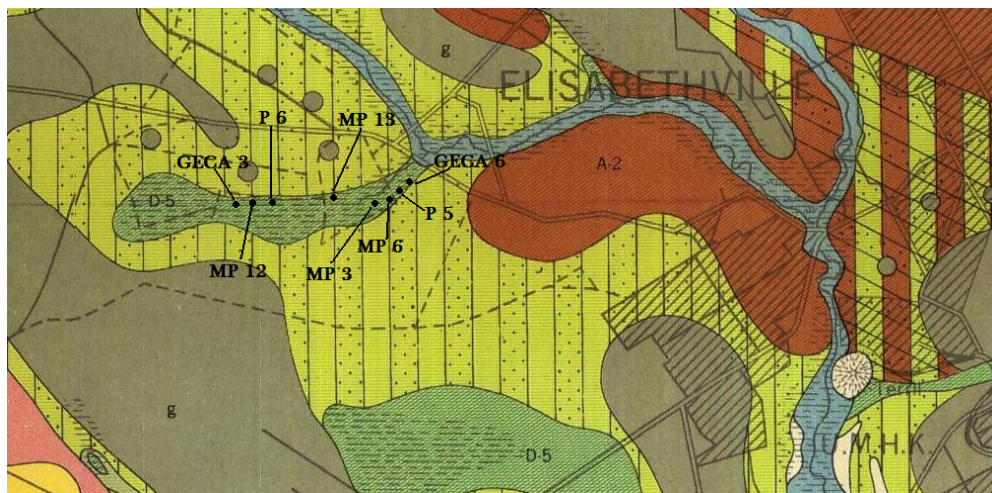


Figure 28 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Gleysols

La structure du sol est influencée par la fraction argileuse, elle est polyédrique subangulaire. L'observation de la texture sur le terrain varie entre un sol composé d'argile et d'argile lourd. Ces sols possèdent beaucoup de pores de petites dimensions (1 mm). Le pH_{eau} est relativement élevé (5,3) par rapport au trois autres types de sol tandis que le pH_{KCl} est assez bas (4,7). La moyenne du rapport C/N est de 22,7. La décomposition de la matière organique est plus lente que dans les Alisols Rhodiques et ferri endo-squelettiques mais plus élevée que dans les Alisols ferri épi-squelettiques. La teneur moyenne en potassium est plus faible que dans les Alisols ferri endo et épi-squelettiques. Le calcium et le magnésium ont une concentration moyenne de respectivement 0,65 et 0,21 méq/100g. La teneur moyenne en calcium et en magnésium est croissante avec la profondeur. La capacité d'échange cationique moyenne est la plus élevée avec 45 cmol/kg. Il est à noter un manque de données pour certains paramètres pédologiques analysés tels que la granulométrie (tableau 11).

Planche 13 : Fosse effectuée sur un Gleysol

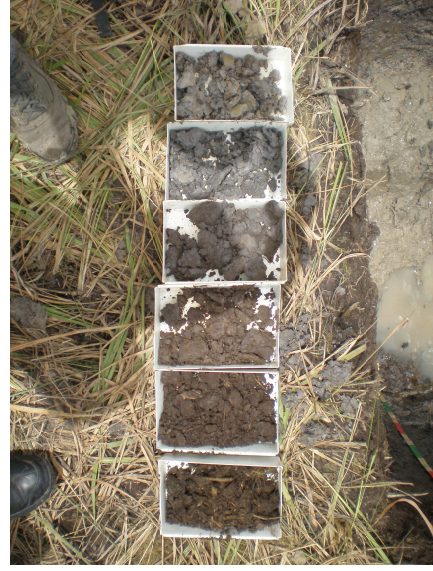
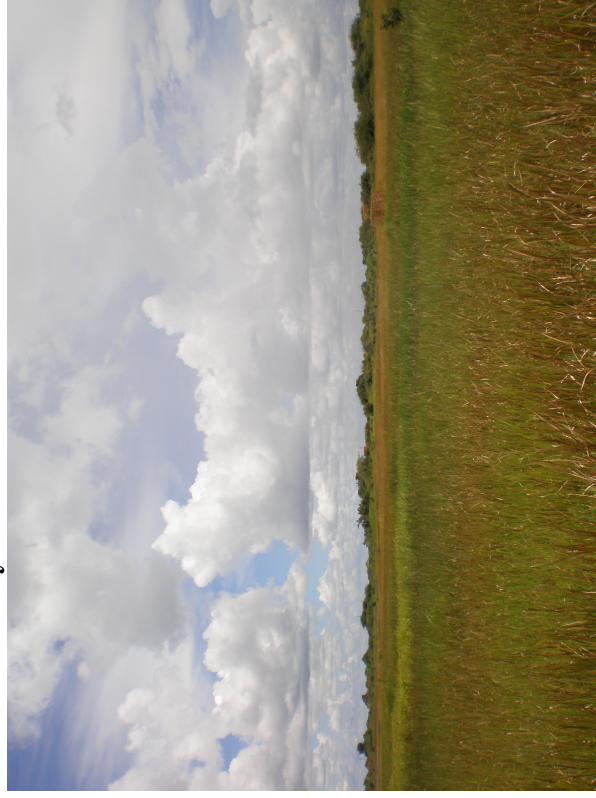
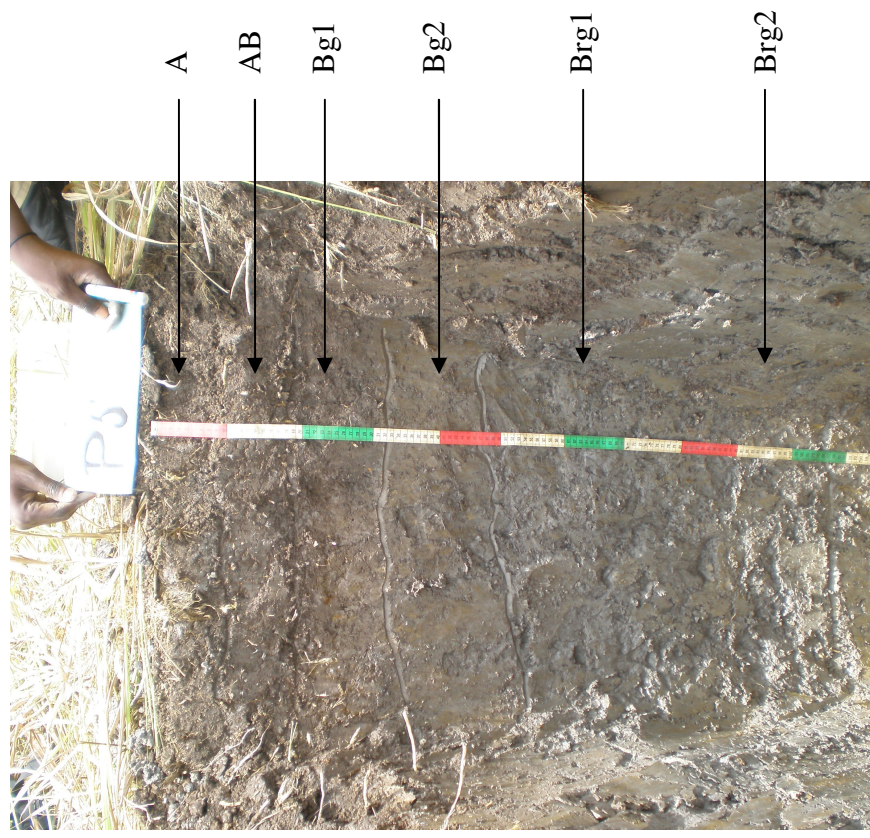


Tableau 11 : Résultats des Gleysols

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Elément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH _{Eau}	pH _{KCl}	▲pH	Ac. Ech.	C g/100g	N	CN	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V %
Horizon de Surface																	
Effectif	7	7	7	1	7	6	6	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne	5,3	4,7	0,5	3,8	4,3	0,23	22,7	-	-	-	0,65	0,10	0,10	0,21	1,07	45	2
Ecart type	0,7	0,6	0,5	-	1,8	0,21	15,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	14,0	13,3	92,4	-	41,1	93,18	66,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horizon en Profondeur																	
Effectif	2	2	2	-	1	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne	5,9	4,5	1,4	-	0,4	-	-	-	-	-	0,88	0,14	0,00	0,34	1,36	27	5
Ecart type	0,1	0,7	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	1,9	14,6	40,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ac. Ech. : acidité d'échange

A part pour le zinc, les concentrations moyennes des principaux éléments traces (Cu, Co, Pb, Cd) sont très nettement supérieures aux autres moyennes des différents types de sol. Les coefficients de variation sont du même ordre de grandeur que pour les autres sols présentés ci-dessus. Les hautes teneurs sont peut être dues à la situation géographique de ces sols, ils se trouvent en bas de versant et accumulent les éléments dans leurs horizons. Les teneurs en fer et en aluminium sont les plus faibles des sols de versants à l'exception de l'aluminium pour l'horizon en profondeur (tableau 12).

Tableau 12 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Gleysols

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/kg					
Horizon de surface												
effectif	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
moyenne	89	329	750	85	2,6	2,0	276	26644	460	2166	24,2	770
écart type	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horizon en profondeur												
effectif	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
moyenne	188	322	748	92	6,3	1,7	41	185	38	15	6,1	86
écart type	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

6.3.1.5 Plinthosols

Ces sols se retrouvent principalement sur le plateau Karavia ; une cuirasse latéritique est présente dès les 5 premiers cm. Le tapis herbacé est essentiellement composé de *Bulbostylis pseudoperennis* et leurs fines racines ne dépassent pas les cinq premiers centimètres du sol mais y sont très abondantes. Quelques *Brachystegia spiciformis* sont présents mais il ne dépasse pas le mètre. Leur texture est argilo-sableuse selon les données observées sur le terrain. Le pH de ces sols est acide ($6 > \text{pH}_{\text{eau}} > 5$) à très acide ($\text{pH}_{\text{KCl}} < 5$). La décomposition de la matière organique ne se situe qu'au niveau du premier horizon. Celle-ci est relativement bonne avec 11,2 (tableau 13, planche 14 et Annexe 12).

Tableau 11 : Résultats des Gleysols

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Elément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH _{Eau}	pH _{KCl}	▲ pH	Ac. Ech.	C g/100g	N	CN	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V %
Horizon de Surface																	
Effectif	7	7	7	1	7	6	6	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne	5,3	4,7	0,5	3,8	4,3	0,23	22,7	-	-	-	0,65	0,10	0,10	0,21	1,07	45	2
Ecart type	0,7	0,6	0,5	-	1,8	0,21	15,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	14,0	13,3	92,4	-	41,1	93,18	66,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horizon en Profondeur																	
Effectif	2	2	2	-	1	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne	5,9	4,5	1,4	-	0,4	-	-	-	-	-	0,88	0,14	0,00	0,34	1,36	27	5
Ecart type	0,1	0,7	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	1,9	14,6	40,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ac. Ech. : acidité d'échange

A part pour le zinc, les concentrations moyennes des principaux éléments traces (Cu, Co, Pb, Cd) sont très nettement supérieures aux autres moyennes des différents types de sol. Les coefficients de variation sont du même ordre de grandeur que pour les autres sols présentés ci-dessus. Les hautes teneurs sont peut être dues à la situation géographique de ces sols, ils se trouvent en bas de versant et accumulent les éléments dans leurs horizons. Les teneurs en fer et en aluminium sont les plus faibles des sols de versants à l'exception de l'aluminium pour l'horizon en profondeur (tableau 12).

Tableau 12 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Gleysols

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/kg					
Horizon de surface												
effectif	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
moyenne	89	329	750	85	2,6	2,0	276	26644	460	2166	24,2	770
écart type	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horizon en profondeur												
effectif	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
moyenne	188	322	748	92	6,3	1,7	41	185	38	15	6,1	86
écart type	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

6.3.1.5 Plinthosols

Ces sols se retrouvent principalement sur le plateau Karavia ; une cuirasse latéritique est présente dès les 5 premiers cm. Le tapis herbacé est essentiellement composé de *Bulbostylis pseudoperennis* et leurs fines racines ne dépassent pas les cinq premiers centimètres du sol mais y sont très abondantes. Quelques *Brachystegia spiciformis* sont présents mais il ne dépasse pas le mètre. Leur texture est argilo-sableuse selon les données observées sur le terrain. Le pH de ces sols est acide ($6 > \text{pH}_{\text{eau}} > 5$) à très acide ($\text{pH}_{\text{KCl}} < 5$). La décomposition de la matière organique ne se situe qu'au niveau du premier horizon. Celle-ci est relativement bonne avec 11,2 (tableau 13, planche 14 et Annexe 12).

Planche 14 : Minifosse effectuée sur un Plinthosol



Tableau 13 : Résultats des Plinthosols

Sondages et profils	Horizons	Profondeur des échantillons	pH				C Tot %		
			pH _{Eau}	pH _{KC}	▲ pH	Ac d'éch.	C	N	C/N
MP 5	A	0 - 3	5,0	4,8	0,3	-	5,7	0,51	11,2
	AC	3 - 5	5,2	4,1	1,1	-	0,1	-	-
	C	5 - 12	-	-	-	-	-	-	-

6.3.1.6 Relations entre éléments traces métalliques

Introduction

Les corrélations entre différents paramètres ont été calculées pour permettre d'établir des lois sur l'évolution générale des teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de plateau et de versant. Le test de corrélation utilisé pour ces comparaisons est celui de Pearson et ils ont été pris en considération quand la p-value était inférieure ou égale à 0,05. Les teneurs des horizons de surface et des horizons en profondeur ont été comparées pour chaque élément.

Corrélation tous types de sol confondus

D'une manière générale, le cuivre, le cobalt, le plomb et le cadmium ont une corrélation très hautement significative entre eux. Une corrélation négative significative a été constatée entre le Co-Al et le Cd-Al. La relation entre l'aluminium et ces deux éléments est inversement proportionnelle, le Co-Al et le Cd-Al présente respectivement des corrélations de -0,459 et -0,516 ce qui traduit des différences de contamination entre les types de sol. Le zinc a une corrélation positive avec le fer (0,559) mais celle-ci est faible et significative. Le cobalt et le cadmium sont significativement liés au pH. Ils ont une faible corrélation positive avec le pH_{KCl} de respectivement 0,515 et 0,552 (figure 29).

Co tot	Cu tot 0,936 0,000	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Pb tot	0,946 0,000	0,870 0,000							
Cd tot	0,764 0,000	0,810 0,000	0,757 0,000						
Zn tot	0,016 0,947	-0,010 0,966	0,047 0,845	-0,078 0,742					
Al tot	-0,401 0,079	-0,459 0,042	-0,392 0,087	-0,516 0,020	0,376 0,102				
Fe tot	-0,246 0,311	-0,264 0,276	-0,239 0,323	-0,298 0,215	0,559 0,013	0,682 0,001			
pH Eau	0,268 0,253	0,468 0,037	0,225 0,340	0,598 0,005	-0,053 0,826	-0,051 0,830	-0,072 0,768		
pH KCl	0,358 0,121	0,515 0,020	0,266 0,257	0,552 0,012	-0,126 0,596	-0,148 0,534	-0,187 0,443	0,882 0,000	
A%	-0,308 0,459	-0,277 0,506	-0,372 0,364	-0,176 0,676	-0,280 0,501	-0,145 0,731	-0,281 0,541	-0,239 0,569	-0,306 0,460
C%	0,352 0,166	0,231 0,372	0,353 0,165	0,167 0,523	0,367 0,147	0,257 0,320	0,395 0,130	-0,042 0,873	-0,172 0,509
C%	A% 0,579 0,173								

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Figure 29 : Corrélation de plateaux et versants tous types de sol confondus

Corrélation verticale

Les quatre premiers éléments présentent six corrélations très hautement significatives en surface alors qu'il n'y a que le cadmium et le cobalt qui présente une corrélation hautement significative en profondeur. Les corrélations entre les ETM et les paramètres pédologiques sont plus nombreux en surface, on peut notamment citer la relation Fe-Zn (0,894), Co-pH (0,744), Cd-C% et Pb-C% (respectivement 0,644 et 0,723). La seule corrélation significative encore présente en profondeur est la relation entre le Fe-Zn (0,711). Le zinc présente donc une corrélation avec le fer tous horizons confondus (annexe 13).

Corrélation entre les types de sol

L'ensemble des types de sol montrent un lien entre les quatre premiers éléments traces métalliques analysés (Cu, Co, Pb, Cd). Cependant, certaines différences apparaissent en fonction du type de sol. Les Alisols Rhodiques et les Alisols ferri épi-squelettiques ont le plus grand nombre d'éléments traces corrélés (6 corrélations) entre eux suivi des Alisols ferri endo-squelettiques. Tandis que les Gleysols ont très peu de lien entre les cinq éléments analysés. Le zinc n'est jamais associé aux quatre autres éléments. Le pH_{KCl} très acide des Alisols Rhodiques est très fortement corrélé aux teneurs totales en cuivre, en cobalt et en cadmium. La teneur totale en zinc des Gleysols est corrélée avec le pourcentage de carbone. La CEC est liée à différents éléments en fonction du type de sol étudié, un Alisol Rhodique présentera une corrélation entre le zinc et la CEC par contre les Alisols ferri épi-squelettiques ont une CEC liée à trois éléments (Cu, Cd, Pb) (annexe 14).

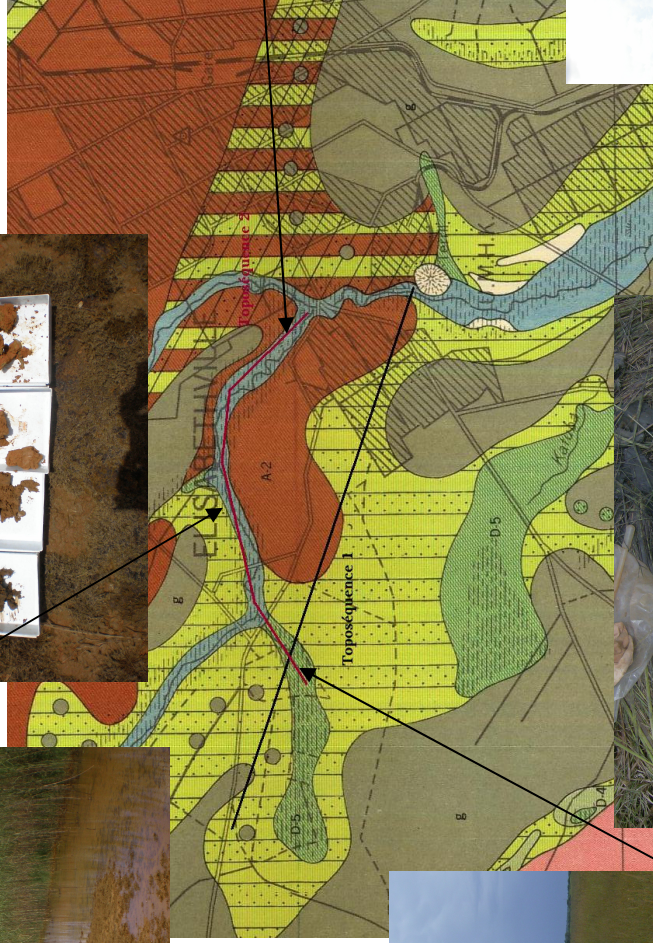
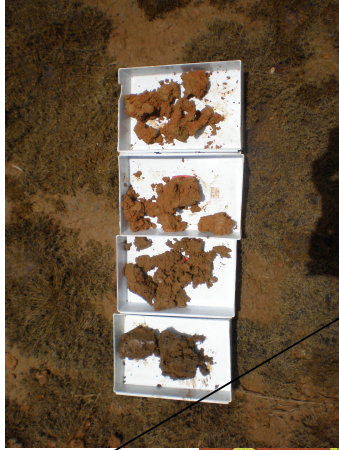
6.3.2 Fond de vallée

6.3.2.1 Fluvisols Umbriques

Les observations ont été effectuées sur le tiers inférieur de la cuvette de la rivière Karavia (figure 30). Cette morphologie est légèrement plane, sa pente est inférieure à 5%. Au plus, nous nous approchions de la cheminée au plus les dépôts de colluvion s'accumulaient sur le site. La dernière observation (GECAS 7) était un sol nu avec de nombreux déchets (scorie, déchets ménagers et gravats). Ceux-ci sont amenés principalement grâce à des fossés mal entretenus, les eaux de pluies ruissellent dedans en érodant et en emportant tous sur leur passage. Les apports de colluvion sont bien plus importants dans cette partie étant donné que la pente du versant du cimetière est plus élevée que celle allant vers le cercle hippique. La végétation est herbacée mais certains arbustes peuvent être présents tel que le *Brachystegia spiciformis*. La végétation est composée de *Bulbostylis pseudoperennis*, de *Phragmites tiphaniapa*, de *Tipha*, de *Setaria palidefusca* et d'*Haumaniastrum katangense* (planche 15 et Annexe 15).

Planche 15 : Sondage effectué sur la toposéquence sédiment (topo 2)

GECAS 2



GECAS 7



GECAS 8

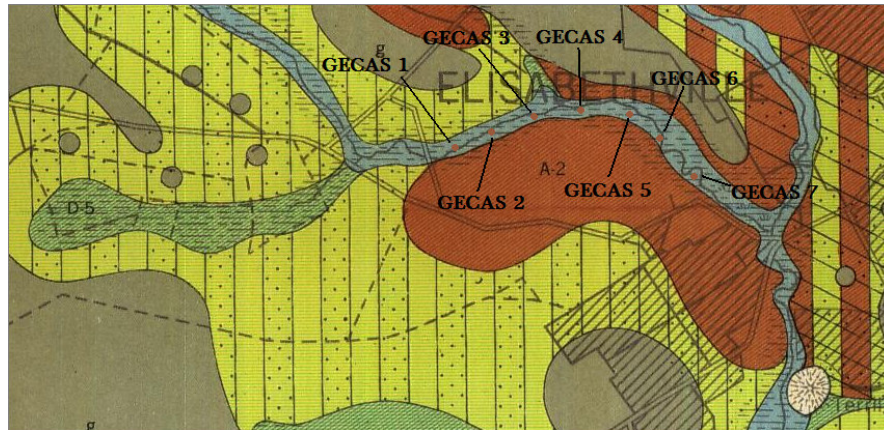


Figure 30 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Fluvisols Umbriques

Ces types de sol possèdent un pH plus élevé que les autres types de sol déjà présentés précédemment, la moyenne du pH_{eau} et du pH_{KCl} sont respectivement de 5,8 et 5,7. Le taux moyen de C/N est égal à 15, il nous indique une décomposition moyennement lente de la matière organique. Leur texture est limono-argileuse mais le coefficient de variation nous montre une haute variabilité au sein de ces sols. Les concentrations des éléments échangeables sont très faibles sauf pour la teneur en potassium qui est égal à 0,13 méq/100g. La capacité d'échange cationique et le taux de saturation sont également très faibles (tableau 14).

Tableau 14 : Résultats des Fluvisols Umbriques

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Élément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH_{eau}	pH_{KCl}	ΔpH	Ac. Éch.	C g/100g	N	C/N	A %	L %	S %	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V %
Horizon de Surface																	
Effectif	6	6	6	1	6	5	5	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3
Moyenne	5,8	5,7	0,1	4,1	1,5	0,10	16,5	23	26	50	0,01	0,02	0,13	0,04	0,21	11	2
Ecart type	0,9	0,5	0,6	-	0,8	0,05	3,3	-	-	-	0,01	0,04	0,03	0,02	0,02	3	1
CV%	14,7	9,3	568,8	-	54,6	51,83	19,8	-	-	-	93,19	173,21	26,04	37,70	7,71	26	31
Horizon en Profondeur																	
Effectif	6	6	6	0	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Moyenne	6,3	5,0	1,3	-	0,9	0,10	9,7	37	33	30	0,01	0,00	0,17	0,04	0,22	14	2
Ecart type	0,8	1,2	0,6	-	0,1	0,00	1,1	8	22	14	0,01	0,00	0,07	0,03	0,08	5	1
CV%	13,4	24,4	48,3	-	15,3	4,42	10,9	21	66	46	81,91	-	39,30	59,30	37,65	37	42

Ac. Ech. : acidité d'échange

Les teneurs moyennes en éléments traces métalliques sont du même ordre de grandeur que les autres mais les teneurs sont constantes avec la profondeur. Le cobalt et le cadmium ont respectivement une teneur moyenne de 290 mg/kg et 6 mg/kg. Les coefficients de variation sont assez faibles par rapport aux autres types de sol à l'exception du plomb et du cobalt. Ces types de sol présentent les teneurs en fer et en aluminium les plus élevées des sols présents sur cette zone ainsi que les sols présents sur les plateaux et les versants (tableau 15).

Tableau 15 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Fluvisols Umbriques

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/kg					
Horizon de surface												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	141	199	207	69	6,0	4,4	199	3488	290	236	6	295
écart type	108	57	51	11	1,6	2,6	126	2959	376	255	6	171
CV%	8	3	2	2	26	59	63	85	129	108	93	58
Horizon en profondeur												
effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
moyenne	113	232	299	66	6,7	5,4	199	2307	288	173	6	231
écart type	145	60	85	23	2,0	3,4	158	2822	437	298	5	206
CV%	13	3	3	3	30	63	79	122	152	172	79	89

6.3.2.2 Gleysols

Les Gleysols observés pour ce transect se situent dans le bas fond de la vallée et près d'un des affluents de la rivière Karavia (figure 31). La morphologie de ce bas fond est plane (pente < 5%). Notons que le piémont est bien plus long que celui des Fluvisols Umbriques. Sa formation végétale est composée d'un tapis d'herbacés composés de *Bulbostylis pseudoperennis*, d'*Haumaniastrum katangense*, *Crepidiorhopalon tenuis*, *Imperata cylindrica*, *Setaria palidefusca* (planche 15 et Annexe 16).

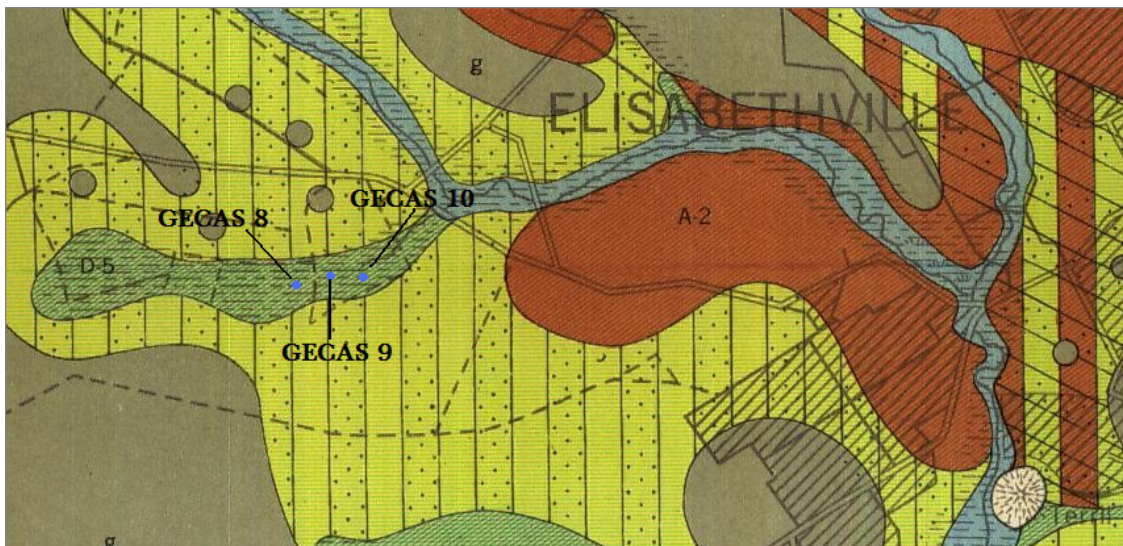


Figure 31 : Localisation de l'échantillonnage réalisé sur les Gleysols

On observe une grande variation entre la lecture du pH_{eau} (6,1) et le pH_{KCl} (5,0), il y a une différence d'une unité. La décomposition de la matière organique se fait plus rapidement que pour les Fluvisols Umbriques. La texture de ces sols est constituée d'argile lourde. Ces sols ont une concentration en éléments échangeables quasi nulle et ont le taux de saturation moyen le plus faible. La CEC dépasse largement les 20 cmol/kg, ce type de sol présente la capacité d'échange cationique la plus élevée avec les Gleysols de bas de versant (tableau 16).

Tableau 16 : Résultat des Gleysols

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Elément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH _{Eau}	pH _{KCl}	▲pH	Ac. Ech.	C g/100g	N	C/N	A %	L %	S %	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V %
Horizon de Surface																	
Effectif	3	3	3	-	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Moyenne	6,1	5,0	1,1	-	3,8	0,31	12,0	66	15	19	0,03	0,02	0,14	0,06	0,25	38	0,8
Ecart type	0,8	0,8	0,0	-	1,4	0,08	1,4	-	-	-	0,04	0,03	0,02	0,01	0,10	29	0,4
CV%	12,6	15,4	3,7	-	36,8	26,01	11,4	-	-	-	116,9	141,4	12,6	21,5	38,6	77	45,3
Horizon en Profondeur																	
Effectif	3	3	3	-	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Moyenne	6	4,9	1,2	-	1,75	0,13	13	67	15	18	0,02	0	0,17	0,07	0,27	30	0,9
Ecart type	0,9	0,9	0,1	-	0,67	0,03	1,8	-	-	-	0,03	0,01	0,08	0,01	0,11	13	0,0
CV%	14,1	19,4	8,8	-	38,3	26,19	13,3	-	-	-	108	246	48	8,43	42,7	44	1,8

Ac. Ech. : acidité d'échange

Le cuivre, le plomb et le cadmium ont une teneur moyenne plus élevée que celle des Fluvisols Umbriques. Le zinc et le cobalt sont moins présents dans ce type de sols. Les coefficients de variation sont légèrement inférieurs à ceux des Fluvisols. Les teneurs en Aluminium égalent celles des Fluvisols Umbriques mais on peut noter une faible concentration en fer pour l'horizon surfacique (tableau 17).

Tableau 17 : Teneurs totales moyennes des éléments présents dans les Gleysols

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g			mg/kg				
Horizon de surface												
effectif	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
moyenne	174	324	166	77	4,3	1,7	122	7977	155	576	15,7	93
écart type	176	76	100	4	0,7	0,1	49	5551	19	410	13,9	94
CV%	101	23	61	5	17	6	41	70	12	71	88,6	101
Horizon en profondeur												
effectif	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
moyenne	92	261	203	53	6,0	3,5	60	554	27	29	1,8	21
écart type	39	90	107	34	0,5	2,6	19	679	8	24	2,6	14
CV%	42	35	53	64	9	75	31	123	28	84	141,4	65

6.3.2.3 Relation entre éléments traces métalliques

Corrélation tous types de sol confondus

La seule corrélation valant la peine est la corrélation entre le plomb et le cuivre qui est de 0,969. Les autres corrélations entre éléments sont Co-Cu, Co-Pb, Cd-Co et ne dépasse pas 0,632. C'est le cobalt qui est l'élément le plus lié dans ces types de sol, il est influencé par le pH_{eau} et le fer (0,692 et 0,641 respectivement). Le cadmium possède une corrélation significative avec le carbone (figure 32).

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	A%	Al tot	Fe tot	pH Eau
Co tot	0,539 0,031								
Pb tot	0,969 0,000	0,632 0,009							
Cd tot	0,472 0,065	0,509 0,044	0,465 0,069						
Zn tot	-0,048 0,859	0,200 0,458	-0,079 0,772	0,152 0,573					
A%	-0,161 0,760	-0,288 0,580	-0,108 0,839	0,369 0,471	-0,098 0,854				
Al tot	-0,322 0,224	-0,204 0,448	-0,311 0,241	-0,351 0,183	0,077 0,776	-0,015 0,977			
Fe tot	0,078 0,773	0,641 0,007	0,161 0,552	0,062 0,821	0,214 0,425	-0,047 0,929	0,485 0,057		
pH Eau	0,495 0,122	0,692 0,018	0,416 0,203	0,540 0,086	0,251 0,456	0,426 0,720	-0,441 0,174	0,238 0,481	
pH KCl	0,227 0,501	0,563 0,071	0,143 0,674	0,154 0,652	0,555 0,076	0,178 0,886	0,009 0,979	0,595 0,054	0,505 0,113
C	0,312 0,299	-0,234 0,442	0,289 0,338	0,586 0,035	-0,213 0,486	0,969 0,031	-0,501 0,081	-0,508 0,077	0,047 0,904
CEC	-0,228 0,414	-0,269 0,332	-0,195 0,486	0,386 0,156	-0,146 0,603	0,944 0,005	0,009 0,976	-0,137 0,626	0,149 0,681
		pH KCl		C					
C		-0,529 0,143							
CEC		-0,389 0,266	0,807 0,002						

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Figure 32 : Corrélation pour les fonds de vallée tous types de sol confondus

Corrélation verticale

Les corrélations sont plus nombreuses en profondeur. Les quatre premiers éléments (Cu, Co, Pb et Cd) sont corrélés de manières hautement significatives, les six corrélations dépassent les 0,9. À l'inverse des sols de plateau et de versant, il n'y a qu'une corrélation entre ETM (Cu-Pb) pour les horizons surfaciques qui est de 0,998. Cependant, quelques corrélations significatives sont constatées entre Co-pH_{eau}, Zn-pH_{KCl}, Cd-CEC pour les horizons de surface alors que les horizons de profondeur ne présentent pas de relation entre les ETM et les paramètres pédologiques (Annexe 17).

Corrélation pour chaque type de sol

Les Fluvisols ont plus de corrélation entre éléments que les Gleysols. Le cuivre, le cobalt, le plomb et le cadmium ont une corrélation très hautement significative dépassant 0,86. Ces éléments sont proportionnellement liés au fer de manière hautement significative. Enfin, le pH_{eau} a une corrélation positive avec le cuivre et le cadmium (0,929 et 0,922). On peut noter que les Gleysols présentent des relations spécifiques entre certains éléments telles que le zinc et la CEC qui ont une relation positive (0,813) et le carbone qui est significativement lié au cobalt (0,941) (Annexe 18).

6.4 Approche solum

6.4.1 Introduction

L'approche solum va nous permettre d'étudier la distribution en profondeur pour l'ensemble des éléments traces métalliques analysés. Rappelons que la plupart des contaminations anthropiques se reconnaissent par une forte concentration superficielle en éléments traces tandis que les contaminations naturelles se retrouvent également en profondeur. Ce point-ci sera développé pour les quatre types de sol présents sur les plateaux et les versants étudiés ainsi que pour les deux types de sol de fond de vallées. Des planches présentant les minifosses ont été intégrées à cette approche pour faciliter la compréhension des résultats. On peut d'ores et déjà conclure que la distance par rapport à la cheminée n'a aucune influence sur les teneurs totales en ETM étant donné que toutes les occupations des différents types de sols ont été reflétées ce qui a faussé l'estimation de l'impact de la distance sur les teneurs (sol érodé à côté d'un sol avec un couche contaminé).

6.4.2 Description des teneurs totales moyennes en ETM sur les plateaux et versants

Les Alisols Rhodiques montrent une teneur moyenne très élevée dans les horizons superficiels. Les teneurs des cinq éléments sont décroissantes en fonction de la profondeur néanmoins les teneurs en cobalt, en plomb et en cadmium des horizons situés entre 90 et 140 cm sont légèrement plus élevées que les horizons intermédiaires. La teneur moyenne en argile est de 43% pour le premier horizon et augmente avec la profondeur avec 66% et 46% pour les horizons de 30 à 50 cm et ceux de 90 à 140 cm. Ces teneurs sont liés aux concentrations en ETM (tableau 18, planche 16).

Tableau 18 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Alisols Rhodiques

mg/kg	N	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
0 - 12	3	10339	168	515	8,9	1162
30 - 50	3	413	30	14	1,4	674
90 - 140	3	300	35	19	2,3	571

Les teneurs totales en ETM des Alisols ferri endo-squelettiques sont décroissantes en fonction de la profondeur. Elles ne présentent pas d'augmentation de concentration dans les derniers horizons. À part pour le zinc et le cuivre, les teneurs moyennes des autres éléments sont plus légèrement plus élevées que celles des Alisols Rhodiques. Le Cadmium n'est significativement présent que dans les horizons superficiels. Un lien peut être établi entre le pourcentage moyen de la fraction argile qui est de 36% dans les premiers horizons et diminue en fonction de la profondeur (tableau 19, planche 17).

Planche 16 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Alisol Rhodique

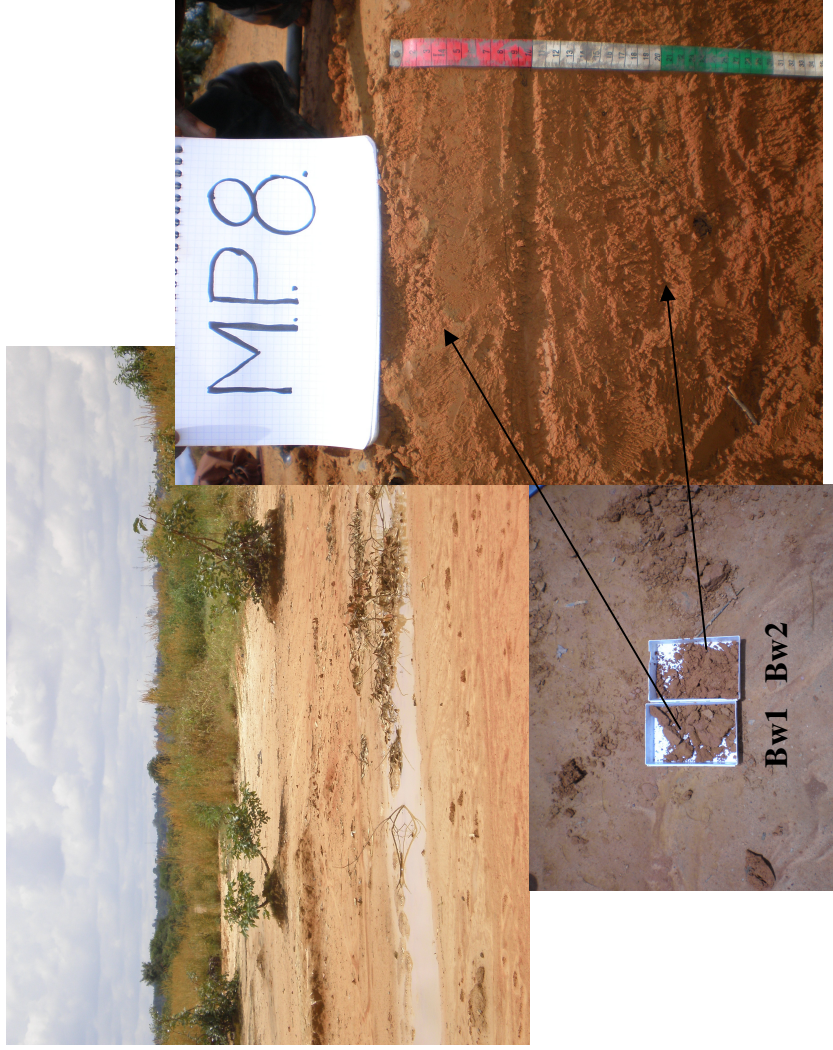


Planche 17 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Alisol ferri endo-squelettique



Tableau 19 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Alisols ferri endo-squelettiques

mg/kg	N	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
0 - 10	3	9430	271	578	12,2	372
15 - 44	3	507	17	12	0,4	70
88 - 150	1	156	8	9	0,0	26

Les teneurs moyennes en ETM des Alisols ferri épi-squelettiques sont les plus faibles de tous les sols rencontrés sur les plateaux et les versants sauf pour le zinc qui présente une teneur moyenne proche de celle des Alisols ferri endo-squelettiques. Les concentrations en cadmium sont plus élevées dans les horizons profonds que dans les deux autres horizons tandis que la teneur en cobalt dans les horizons en profondeur est supérieure à celle obtenue pour l'horizon intermédiaire. Les teneurs en zinc des deux derniers types d'horizons sont très proches (161 et 157 mg/kg). Le pourcentage représentant la fraction argileuse est inférieur à ceux rencontrés pour les Alisols Rhodiques et les Alisols ferri endo-squelettiques cependant les teneurs en argile restent élevées (tableau 20 et planche 18).

Tableau 20 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Alisols ferri épi-squelettiques

mg/kg	N	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
0 - 15	3	4943	93	498	6,4	662
15 - 60	3	409	33	6	2,3	161
47 - 71	2	201	53	3	6,6	157

Les teneurs moyennes des Gleysols sont les plus élevées par rapport aux autres types de sol présents dans cette zone. Ils accumulent au moins le double des teneurs retrouvées dans les trois autres sols. Même les horizons intermédiaires possèdent une teneur moyenne très élevée. La teneur en cadmium est du même ordre de grandeur dans les deux types d'horizons. Notons que les Gleysols présentent un pH plus élevé que les autres types de sol sur l'ensemble des profondeurs couvertes et ont une texture à argile lourde (tableau 21, planche 19).

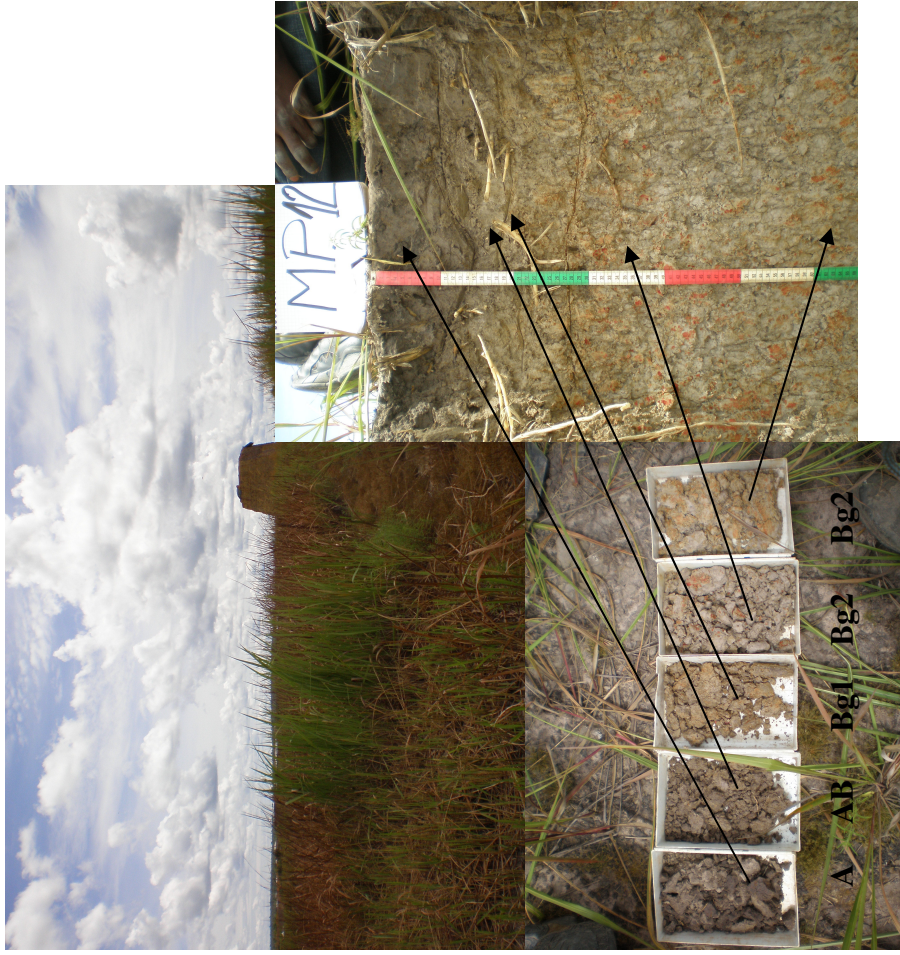
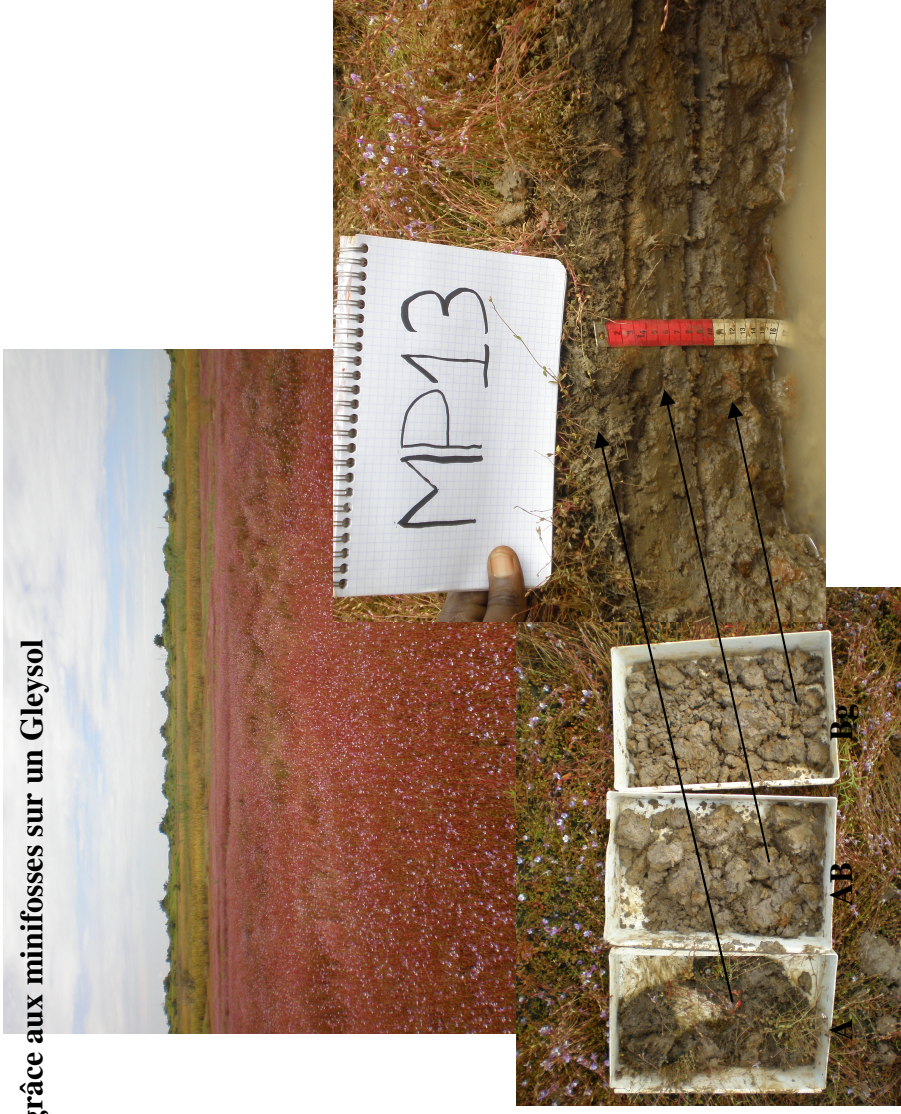
Tableau 21 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Gleysols de bas de versant

mg/kg	N	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
0 - 14	1	26644	460	2166	24,2	770
17 - 52	1	1866	103	108	23,2	345
95 - 120	-	-	-	-	-	-

Planche 18 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Alisol ferri épi-squelettique



Planche 19 : Etat de surface étudié grâce aux minifosses sur un Gleysol



6.4.3 Description des teneurs totales moyennes en ETM dans les fonds de vallée

Les teneurs des Gleysols de fond de vallées (transect 2) sont moins élevées que celles des Gleysols présents en bas de versant toutefois ces concentrations restent élevées pour le cuivre, le plomb et le cadmium. Les teneurs moyennes sont décroissantes en fonction de la profondeur. L'horizon intermédiaire présente une concentration moyenne en cuivre du même ordre de grandeur que les Gleysols présents en bas de versant. La fraction argileuse est la plus importante pour ce type de sol, elle représente 66% de la texture et ce pour l'ensemble des profondeurs (tableau 22).

Tableau 22 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Gleysols de fond de vallée

mg/kg	N	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
0 - 18	2	7977	155	576	15,7	93
18 - 33	2	1785	38	114	2,5	59
39 - 68	2	554	27	29	1,8	21

La teneur totale moyenne en cuivre, plomb et cadmium des Fluvisols Umbriques sont similaires à celle des Gleysols. Les concentrations moyennes en cobalt et zinc sont supérieures à celles retrouvées dans les Gleysols de fond de vallée. Les teneurs moyennes des éléments traces métalliques sont très variables en fonction de la profondeur, pour les 2 premières profondeurs elles sont décroissantes ; par contre les deux derniers horizons ont une relation inverse. Ce type de sol présente les teneurs en argile les plus faibles en surface, elle est de 23% (tableau 23)

Tableau 23 : Teneurs totales moyennes des ETM présents dans les Fluvisols Umbriques

mg/kg	N	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
0 - 15	3	6901	723	530	12,4	467
28 - 76	3	3459	130	135	7,0	106
42 - 121	3	5180	427	332	9,7	286

6.5 Comparaison avec les sites naturels

6.5.1 Relation entre les éléments traces métalliques

La comparaison des sites contaminés avec les sites naturels va nous permettre d'établir un référentiel relatif aux différentes séries de sols. Cette comparaison améliorera la compréhension des relations « naturelles » et des contaminations dans les différents types de sol présents sur les sites étudiés. Les teneurs présentées dans ce point sont les teneurs totales moyennes surfaciques.

Les Gleysols contaminés ont la concentration en cuivre la plus élevée avec 26644 mg/kg. Ces sols sont suivis par les Alisols Rhodiques et ferri endo-squelettiques qui ont respectivement 10339 et 9430 mg/kg. Les Alisols ferri épi-squelettiques ont la teneur moyenne en cuivre la plus faible (4943 mg/kg). Pour les sites non ou peu contaminés, ce sont les Alisols Rhodiques qui ont la valeur la plus élevée avec 220 mg/kg suivis des Alisols ferri endo-squelettiques avec 178 mg/kg. En comparaison avec les sites contaminés, l'ordre de grandeur des teneurs en cuivre des sites non ou peu contaminés est donc globalement le même de 116 à 220 mg/kg. Les Gleysols contaminés accumulent le cuivre à cause de leur situation topographique (figure 33).

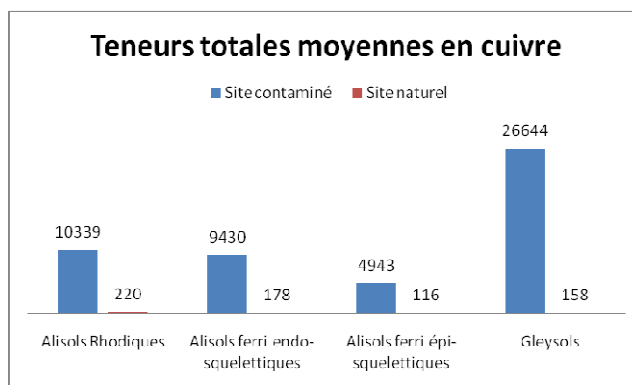


Figure 33 : Histogramme des teneurs totales moyennes en cuivre

Les teneurs des sites contaminés en cobalt présentent globalement la même distribution que les teneurs totales moyennes en cuivre. Les teneurs en cobalt des Gleysols sont les plus importantes suivies des Alisols ferri endo-squelettiques, Rhodiques et ferri épi-squelettiques. L'ordre de grandeur des teneurs en cobalt n'est pas la même que celle du cuivre. Elle varie de 93 à 460 mg/kg pour les sites contaminés, les sites non ou peu contaminés ont des valeurs fortement groupées (12 à 25 mg/kg) et aucune différence marquante n'est constatée entre les différents types de sol (figure 34).

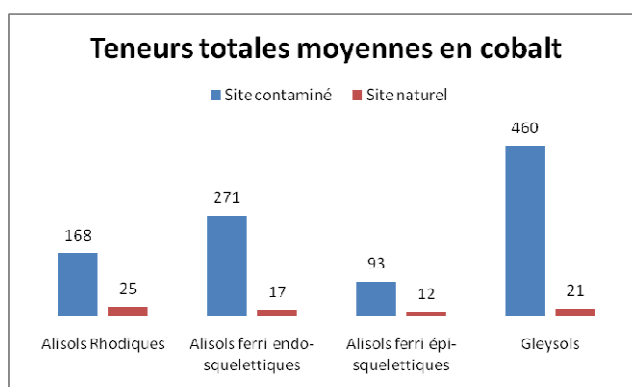


Figure 34 : Histogramme des teneurs totales moyennes en cobalt

La distribution des teneurs en plomb est la même que celle des teneurs en cuivre et en cobalt. Les concentrations moyennes des sites non ou peu contaminés sont négligeables par rapport aux sols contaminés. La teneur moyenne des Alisols ferri épi-squelettiques non ou peu contaminés est de 14 mg/kg (figure 35).

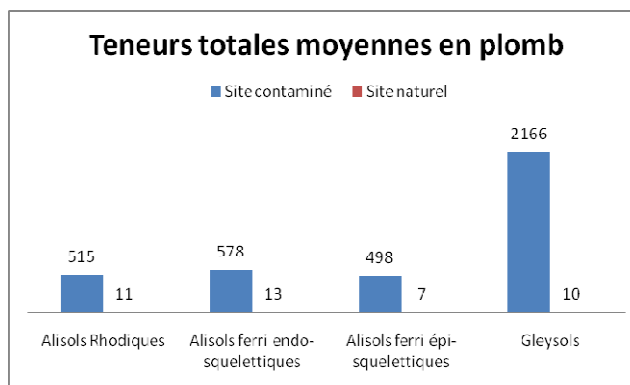


Figure 35 : Histogramme des teneurs totales moyennes en plomb

Les Gleysols montrent de nouveau la plus grande concentration en cadmium pour les sites contaminés, ils ont une teneur de 24,2 mg/kg. Une différence très significative est à noter entre les sites contaminés et non ou peu contaminés pour l'ensemble des sols. Les teneurs des aires non contaminées sont presque nulles (figure 36).

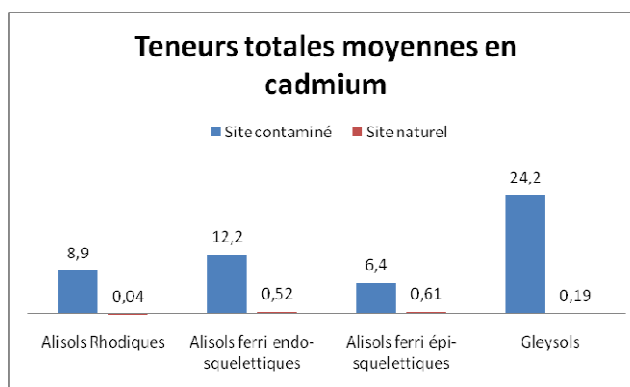


Figure 36 : Histogramme des teneurs totales moyennes en cadmium

Les teneurs en cuivre, en cobalt, en plomb et en cadmium des sites contaminés sont les plus élevées dans les Gleysols et les Alisols ferri endo-squelettiques alors que les valeurs les plus élevées des sites non ou peu contaminés se retrouvent dans les Alisols Rhodiques. Cette constatation n'est pas valable pour les concentrations en cadmium des sites non ou peu contaminés.

Les teneurs totales moyennes en zinc des Alisols Rhodiques contaminés sont les plus élevées avec 1162 mg/kg. Les Alisols ferri endo-squelettiques et les Gleysols présentent des teneurs assez proches variant de 662 à 770. Les Gleysols contaminés ont une concentration de 770 mg/kg, celle-ci est assez proche des Gleysols non ou peu contaminés (497 mg/kg). Les valeurs des Alisols non ou peu contaminés sont très semblables avec une faible variation en fonction du type d'Alisols présents (figure 37).

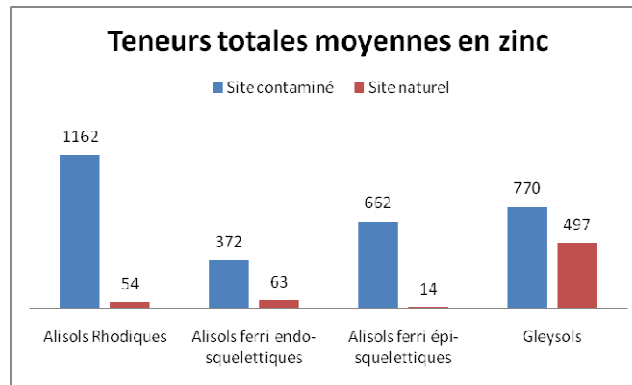


Figure 37 : Histogramme des teneurs totales moyennes en zinc

On peut dès lors distinguer les distributions des éléments en deux groupes : le cuivre, le cobalt, le plomb et le cadmium pour lesquels la différenciation contaminé-non ou peu contaminé est bien marquée et d'autre part le zinc pour lesquels certaines références naturelles sont élevées. Les teneurs les plus élevées se retrouvent dans les Gleysols à l'exception du zinc où se sont les Alisols Rhodiques qui présentent la concentration la plus forte.

6.5.2 Corrélation avec les Sites naturels

Corrélation entre les éléments traces métalliques tous types de sol non ou peu contaminés confondus

Quatre éléments (Cu, Co, Cd, Pb) ont une corrélation très hautement significative entre eux. Ces corrélations sont de l'ordre de grandeur de 0,585 à 0,880. Le plomb, le cadmium et le zinc ont une relation positive avec le carbone néanmoins leurs corrélations se situe au alentour de 0,7. Le cobalt et le cuivre se distinguent des autres éléments par une faible corrélation positive avec la CEC (0,589 et 0,491) (figure 38).

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	0,860 0,000								
Pb tot	0,880 0,000	0,755 0,000							
Cd tot	0,585 0,008	0,637 0,003	0,792 0,000						
Zn tot	0,236 0,330	0,243 0,317	0,276 0,253	0,147 0,549					
Al tot	-0,181 0,457	-0,111 0,652	-0,306 0,203	-0,265 0,274	0,203 0,404				
Fe tot	0,225 0,354	0,381 0,108	-0,002 0,992	-0,116 0,635	-0,243 0,315	-0,162 0,507			
pH Eau	-0,161 0,537	-0,380 0,132	-0,166 0,524	-0,094 0,720	0,199 0,443	-0,135 0,605	-0,498 0,042		
pH KCl	-0,175 0,501	-0,445 0,074	-0,232 0,370	-0,229 0,377	0,148 0,571	-0,249 0,334	-0,364 0,151	0,762 0,000	
A%	-0,281 0,353	-0,123 0,689	-0,005 0,987	0,498 0,083	-0,212 0,486	0,093 0,763	-0,331 0,269	-0,120 0,697	-0,195 0,522
C%	0,535 0,049	0,177 0,544	0,798 0,001	0,719 0,004	0,722 0,004	-0,006 0,985	-0,368 0,196	0,435 0,157	0,329 0,296
CEC	0,491 0,033	0,589 0,008	0,444 0,057	0,347 0,145	0,456 0,050	0,155 0,526	0,310 0,197	-0,393 0,119	-0,259 0,316
	A%	C%							
C%	-0,559 0,150								
CEC	0,116 0,706	0,290 0,314							

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Figure 38 : Corrélation pour les sites peu ou non contaminés tous types de sols confondus

Corrélation pour chaque type de sol

Des corrélations plus spécifiques se retrouvent pour chaque type de sol par rapport au tableau général. Dans celui-ci, il n'y a qu'une relation avec le carbone et la CEC alors que les sols ont des corrélations plus importantes en fonction du type de sol. Les Alisols Rhodiques et ferri endo-squelettiques sont les types de sol qui présentent le plus de relation entre leurs éléments traces métalliques. La CEC influence le zinc dans les Alisols Rhodiques et les Gleysols. Les ETM des Gleysols sont les seuls éléments qui ont une relation avec le fer. Le carbone et l'argile des Alisols endo-squelettiques ont un impact important sur la présence des ETM. Les corrélations des sols non ou peu contaminés sont plus élevées que celles des sites contaminés (Annexe 19).

6.5.3 Relations entre les ETM et les paramètres pédologiques

Ce point tentera de mieux cerner les relations entre les ETM et les paramètres pédologiques des sites non ou peu contaminés en vue d'établir des lois générales et de vérifier dans quelle mesure elles sont différentes aux sites contaminés. La transformation logarithmique (\log_{10}) a légèrement amélioré les droites de régression. Ensuite, les sites contaminés présentent des niveaux de corrélation entre les paramètres moins élevés que les sites non ou peu contaminés. Les sites naturels présentent des relations entre les ETM et la CEC et le carbone. Les sites contaminés ont des corrélations significatives avec l'aluminium et le pH contrairement aux sites non ou peu contaminés (Annexe 14, 19 et figure 33 et 39).

Dans les sites non ou peu contaminés, les régressions présentant le meilleur coefficient de détermination (R^2) sont celles entre ETM (Cu-Co, Cu-Pb, Co-Pb), les coefficients de détermination sont supérieurs à 70%. Les régressions avec le cadmium ne présentent qu'un R^2 situé entre 0 et 10%. La régression ayant le R^2 le plus important est celle entre le cuivre et le plomb (figure 39).

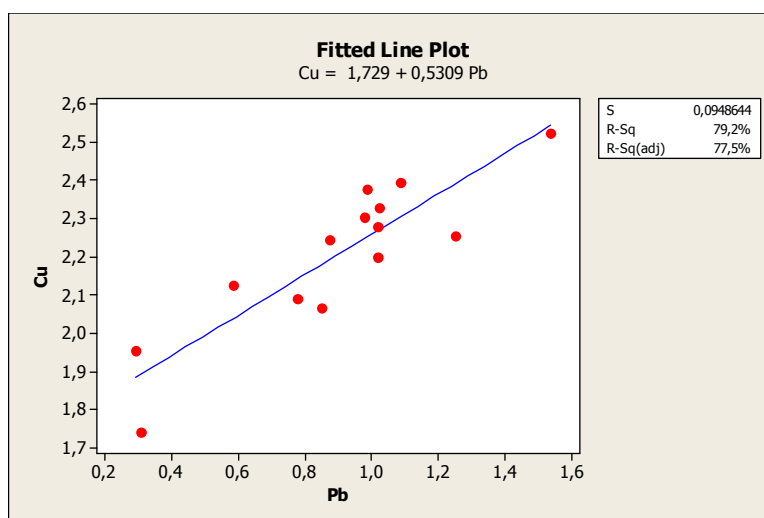


Figure 39 : Régression entre le cuivre et le plomb sur sites « naturels »

Les relations des ETM (Cu, Co, Pb) avec la CEC présentent un nuage de point relativement homogène à l'exception du graphique Pb-CEC. La régression entre le cuivre et le carbone présente une distribution des points aux deux extrémités de la droite ($R^2 = 49\%$). La régression entre le plomb et le pourcentage de carbone montre un nuage de point fortement concentré à une extrémité de la droite ($R^2 = 51\%$). Le graphique présentant la relation entre le cadmium et le C% est fortement irrégulier. Enfin, le zinc présente la relation la plus homogène avec le pourcentage en carbone ($R^2 = 43\%$) (Annexe 20 et figure 40).

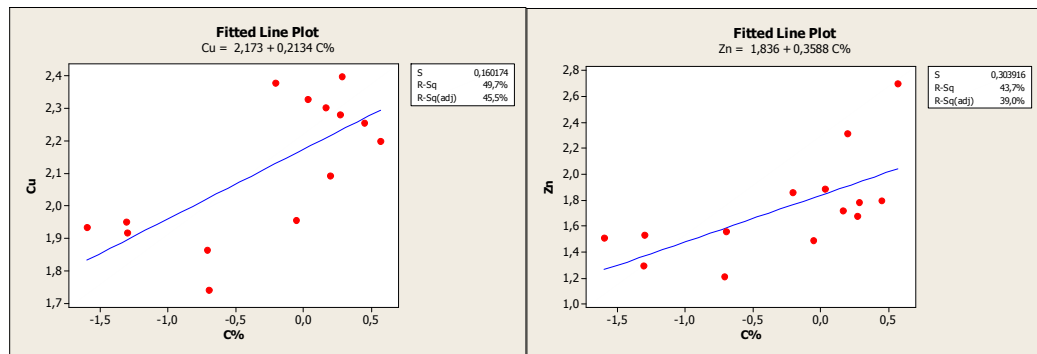


Figure 40 : Régression entre le Cu-C% et Zn-C% sur les sites non ou peu contaminés

Si on compare ces relations par rapport à celles trouvées pour les sites contaminés, on constate que les droites de régression entre les quatre premiers ETM (Cu, Co, Pb, Cd) présentent une meilleure répartition des points sur le graphique ainsi qu'un meilleur coefficient de détermination (R^2 entre 75 et 80%) (figure 41).

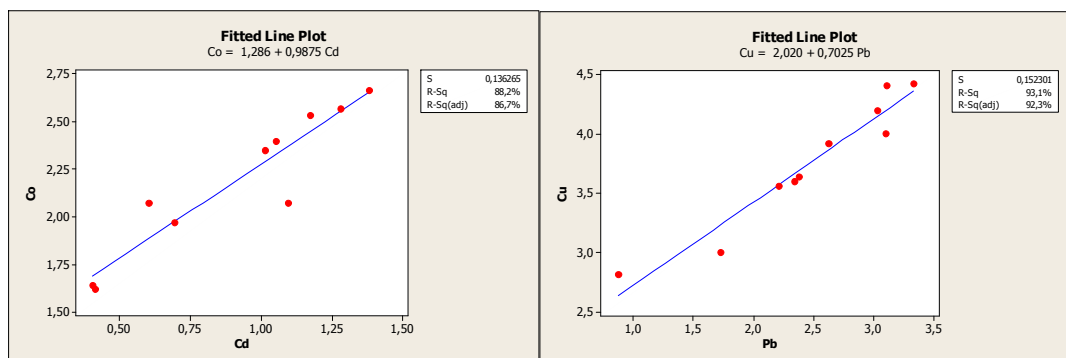


Figure 41 : Régression entre Co-Cd et Cu-Pb sur les sites contaminés

Par contre, les régressions des ETM avec des paramètres pédologiques sont moins bonnes que celle des sites « naturels ». Par exemple, les régressions entre le Co-Al et Cd-Al présentent un nuage de points fortement dispersés tandis que le zinc et le fer ont un nuage de point situé aux deux extrémités de la droite ($R^2 = 34\%$). La seule relation satisfaisante est celle avec le pH (Co-pH et Cd-pH), leurs nuages de points sont assez homogènes (R^2 Co-pH = 66 et R^2 Cd-pH = 41 %) (Annexe 21 et figure 42, 43).

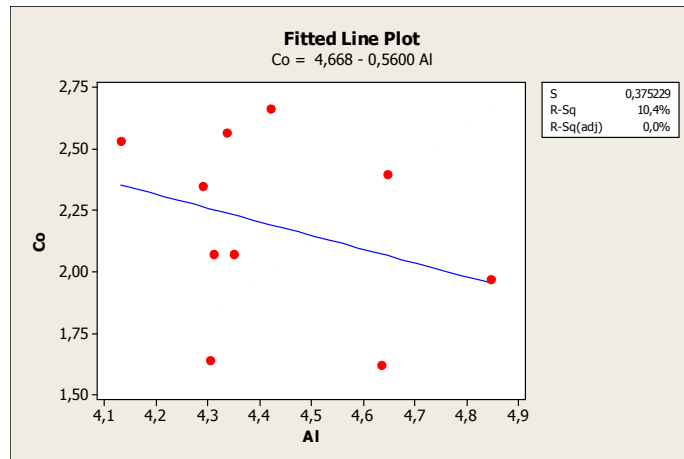


Figure 42 : Régression entre le Co et l'Al sur les sites contaminés

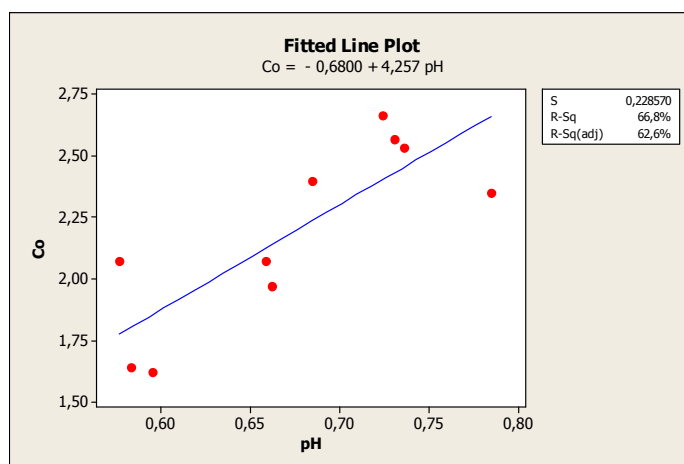


Figure 43 : Régression entre le Co et le pH sur les sites contaminés

En conclusion, les ETM sont liés entre eux, particulièrement dans les sols contaminés. Les relations avec les paramètres pédologiques sont plus étroites pour les sites non ou peu contaminés. Il est à noter que les relations entre ETM et paramètres pédologiques ne sont pas les mêmes entre les deux sites.

7 Conclusion

Ce travail visait les objectifs suivants : caractériser les sols de Lubumbashi et développer leurs caractéristiques environnementales par l'analyse des teneurs en éléments traces métalliques. Deux grandes unités géomorphopédologiques ont été étudiées sur le site de la Gécamines : une unité de plateau et de versant et une unité de fond de vallée. Ces unités sont influencées principalement par deux facteurs : la situation topographique et l'occupation des sols.

Deux plateaux peuvent être dissociés dans cette première unité, il s'agit du plateau Karavia et du plateau Gécamines. Celui-ci a subi une très forte érosion par rapport au plateau Karavia qui présente une végétation herbacée plus abondante. L'occupation de ces unités est principalement urbaine, plusieurs activités anthropiques peuvent être discernées telles que la fabrication de briques, l'extraction de quartz et quelques cultures maraîchères. La moitié du plateau Gécamines est occupée par le cimetière de Lubumbashi. Ce site présente une végétation plus abondante que la partie urbanisée. Le versant menant à l'affluent de la rivière Karavia est occupé par des habitations et ne présente aucune végétation à l'exception de quelques jardinets ayant un apport en matière organique élevé et de la végétation poussant sur les termitières.

Le relief de ces plateaux et versants est plane avec une distinction entre le versant du cimetière qui possède une pente de 10% et le versant allant vers l'affluent de la rivière Karavia dont la pente est inférieure à 5%. Les sols présents sur cette unité peuvent être regroupés grâce à leurs caractéristiques semblables à l'exception des Gleysols qui diffèrent des autres. Les Alisols sont des sols très acides pauvres en éléments nutritifs. Ces sols ont un rapport C/N supérieur à 15 en surface. La fraction argileuse de ces sols dépasse les 30%. Ceux-ci sont caractérisés par un horizon Bw en profondeur. Les Gleysols se distinguent par certains paramètres pédologiques. Ils occupent le pied des versants et ont une végétation herbacée très abondante. pH et teneur en carbone sont légèrement plus élevés que pour les Alisols. Ces sols ont également une plus grande capacité d'échange cationique. Malgré des variations au sein des Alisols, les teneurs totales en éléments traces sont élevées par rapport aux mêmes types de sol retrouvés sur des sites non ou peu contaminés. Les Gleysols sont les sols présentant les teneurs en ETM les plus fortes au sein de cet ensemble topographique, tout spécialement le cuivre et le cadmium, où leur concentration est le double de celle retrouvée dans les Alisols. Les Alisols Rhodiques se distinguent des autres sols par leur forte teneur totale en zinc.

Dans la deuxième unité, les sites sont majoritairement occupés par des terrains humides et quelques habitations mais certaines parties situées le long de la rivière Karavia sont consacrées à la culture maraîchère. La végétation de cette unité se compose principalement d'herbacées (*Phragmites tiphaniopa*, *Bulbostylis pseudoperennis*, *Imperata cylindrica*, *Haumaniastrum katangense*). Des fossés mal entretenus sont présents tout au long du transect réalisé pour caractériser cette unité. Plus la cheminée est proche et plus les colluvions venant du plateau sont importantes. Au vu de la situation topographique autour des sols de fond de vallée, la quantité de sédiments reçue est plus importante pour les sols situés au niveau de la rivière Karavia que pour les Gleysols de l'affluent de la rivière Karavia. Il en ressort que les ETM sont plus concentrés en profondeur qu'en surface pour ces types de sols car la couche contaminée en surface est la première à être érodée sur les plateaux, suivie d'autres colluvions moins contaminées. La morphologie de cette unité est une cuvette relativement plane ayant une pente ne dépassant pas les 5%. Les sols de cette unité ont un pH acide et sont pauvres en éléments nutritifs. Les Fluvisols Umbriques ont la capacité d'échange cationique la plus faible de tous les types de sol étudiés (11 méq/100g). Leur pourcentage en argile est faible en surface et augmente avec la profondeur tandis que la fraction sableuse subit la relation inverse. Les Gleysols de fond de vallée ont un pourcentage en argile très élevé (60%) tous horizons confondus. Ces deux types de sol se distinguent aussi entre eux par leur concentration en carbone : les Fluvisols ont une faible teneur tandis que les Gleysols ont une concentration proche des teneurs des Gleysols de versant. Les teneurs totales en éléments traces métalliques sont inférieures à celles obtenus pour les sols de plateau et de versant. Cependant, les Gleysols ont des teneurs totales moyennes plus élevées que celles des Fluvisols Umbriques de fond de vallée.

Deux groupes d'éléments se distinguent : le cuivre, le cobalt, le plomb et le cadmium très fortement corrélés entre eux et le zinc n'ayant presque pas de corrélation avec les autres ETM. Ces éléments (Cu, Co, Pb, Cd) présentent des corrélations avec la CEC, l'argile et parfois le pH. Le zinc quant à lui possède une forte corrélation avec le pourcentage en carbone. Lors d'une phytoremédiation du site, il faudra donc tenir compte des teneurs élevées en éléments traces métalliques ainsi que de l'acidité du sol. Les corrélations trouvées en sites contaminés confirment le caractère polymétallique des contaminations. Notons que les relations entre ETM et paramètres pédologiques ne sont pas les mêmes entre les sites contaminés et non contaminés. Si les sites non contaminés ont des teneurs totales en ETM plus faibles que les sites contaminés, la teneur en zinc est néanmoins élevée dans les Gleysols des sites « naturels ».

En conclusion, les constatations de ce travail devraient être complétées par une étude comprenant plus d'échantillons pour mieux cerner les variations de teneurs en ETM dans les différentes unités. Les transferts entre le sol et la plante devraient être approfondis par une étude des teneurs en éléments biodisponibles tout en tenant compte des différences entre les unités géomorphopédologiques présentées ci-dessus. Enfin, d'autres types de sols devraient être mieux caractérisés tels que les Plinthosols et il serait intéressant d'élargir la gamme de sol étudiée pour avoir une meilleure compréhension de l'évolution des sols.

8 Bibliographie

- Alloway B.J., 1990. *Heavy metal in soils*. Halsted Press, New York. 339 p.
- Baize D., 1997. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols*. INRA. 395 p.
- Baize D., 2000. *Guide des analyses en pédologie*. INRA. 224 p.
- Bourrelier P.H. et Berthelin J., 1998. *Contamination des sols par les éléments traces : les risques et leur gestion*. Rapport n°42 Académie des sciences. 439 p.
- Baker A.J.M., Brooks R.R., Pease A.J., Malaisse F., 1983. *Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus Silene L. (Caryophyllaceae) from Zaïre*. Plant and Soil. 73. p 377-385.
- Brooks R.R., Baker A.J.M., Malaisse F., 1992. *Copper flowers*. National Geographic Research and Exploration 8 (3). p 338-351.
- Brooks R.R., 1998. *Plants that hyperaccumulate heavy metal. Their role in phytoremediation, Microbiology, Mineral Exploration and Phytomining*. Londres, CAB International : xii. 380 p.
- Cailteux J., Binda P.L., Kampunzu A.B., Katekesha W.M., Kaunda C. and Wendorff M., 1995. *The late proterozoic Roan supergroup between Zambia and Zaïre, central african copperbelt*. Royal Museum of Central Africa. p 21-27.
- Cailteux J., Binda P.L., Katekesha W.M., Kampunzu A.B., Intiomale M.M., Kapenda P., Kaunda C., Ngongo K., Tshiauka T. et Wendorff M., 1994. *Lithostratigraphical correlation of the neoproterozoic Roan supergroup from Shaba and Zambia, in the central african copper-cobalt metallogenic province*. Journal of African Earth Sciences, Vol 19. p 265-278.
- Cailteux J., 2003. *Proterozoic sedimentary-hosted base metal deposits of Western Gondwana*. Conference and field workshop, Lubumbashi. p 223.
- Comtois Y., Maurice R. et Arpin M., 2003. *Etude sur la restauration des mines de cuivre et de cobalt en République Démocratique du Congo – Rapport E739 V2*, SNC-LAVALIN International, Montréal (Québec).
- Duchaufour P., 1997. *Abrégé de pédologie sol, environnement, végétation*. MASSON, Paris Milan Barcelone. 291 p.
- Duvigneaud P. et Denaeyer-De Smet S., 1963. *Cuivre et végétation au Katanga*. Bulletin de la Société royale de Botanique de Belgique. Publication n°47, Tome 96. p 93-231.
- FAO, 1998. *World reference base for soil resources*. World Soils Resources Report 84. Food and Agricultural Organization of United Nations, Rome.
- François A., 1987. *Synthèse géologique sur l'arc cuprifère du Shaba (Rép Du Zaïre)*. Centenaire de la Société belge de géologie. p 55-65.

Haubert.H. et Pinta.M., 1971. *Les éléments traces dans le sol*. Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M. 87 p.

Juste C., Chassin P., Gomez A., Lineres M., Mocquot B., Feix I. et Wiart J., 1995. *Les micropolluants métalliques dans les boues résiduelles des stations d'épuration urbaines*. Convention ADEME-INRA. 209 p.

Kabata-Pendias A. et Pendias H., 2001. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton, CRC Press Inc. 3^{ème} Ed. 315 p.

Kodva V.A., Yakushevskaya I.V., Tyuryukanov A.N., 1964. *Microelements of the soils in the Union of Soviet Socialist Republics*. UNESCO/NS/NR/49. Paris-Février 1964.

Laroche J. et Bock L., 1999. *L'état de fertilité des terres wallonnes*. Dossier de gestion de la terre agricole. p 16-17.

Leblanc.M, Malaisse.F, 1978. *Lubumbashi, un écosystème urbain tropical, université nationale du Zaïre*. p 1 à 152.

Leteinturier B., Baker A.J.M., Malaisse F., 1999a. *Early stages of natural revegetation of metalliferous mine workings in South Central Africa : a preliminary survey*. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. p 28-41.

Leteinturier B., Malaisse F., 1999b. *De la réhabilitation des sites pollués par l'exploitation minière du cuivre en Afrique centro-australe*. Bull. Séanc. Acad. r. Sci. Outre-Mer 45 (1999-4). p 535-554.

Malaisse F., Colonval-Elenkov E., Brooks R.R., 1983. *The Impact of Copper and Cobalt Orebodies upon the Evolution of Some Plant Species from Upper Shaba, Zaïre*. Plant Systematics and Evolution. 142. p 207-221.

Malaisse F., 1995. *Cuivre et végétation au Shaba (Zaïre)*. Bull. Séanc. Acad. R. Sci. Outre-mer. 40 (1994-4). p 561-580.

Maton J. et Lecompte H.-B.S., 2001. *Congo 1965-1999 : les espoirs déçus du « Brésil africain »*. Centre de Développement de l'OCDE, Document de travail n°178.

Page A.L., Miller R.H, Keeney D.R., 1988. *Methods of soil analysis. Vol 2. Chemical and Microbiological properties*. Madison: American Society of Agronomy. 1159 p.

Petit P., Bukome E., Dibwe D.M. et Kalaba M., 2003. *Ménages de Lubumbashi entre précarité et recomposition*, l'Harmattan. p 81 à 150.

PNUD, 2004, *Conflits armés en République Démocratique du Congo. Le rôle des facteurs économiques et leçons pour la reconstruction*, Rapport d'analyse.

Quevy B., Laudelout H., André P., 1990. *Le comportement des métaux lourds dans les sols*. Centre de Recherches Forestières de la Fagne, Unité des Eaux et Forêts, FUSAGx, UCL. 63 p.

Sillanpää.M., 1979. *Les éléments traces dans les sols et en agriculture*. Bulletin pédologique de la FAO. Rome 1979. 84 p.

Sys A., 1954-1956, *Carte de reconnaissance sur l'utilisation des sols*. Publications de l'Institut National pour l'étude Agronomique du Congo belge.

Sys A., 1954-1956, *Carte de reconnaissance des sols*. Publications de l'Institut National pour l'étude Agronomique du Congo belge.

Sys.A et Schmitz.A, 1959. *Notice explicative de la carte des sols et de la végétation*. I.N.E.A.C. 1 à 69.

Turekian K.K., Wedepohl K.H., 1961. *Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust*. Bull. geol. Soc. Amer. 72. p 175.

Vinogradov A.P., 1959. *The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils*. Translated from Russian). Consultants bureau, New York. 209 p.

<http://www.forrestgroup.com/fr/stl/stl.html>, consulté le 6 juillet 2008.

<http://earth.google.fr/>, consulté le 6 juillet 2008.

<http://ochaonline.un.org>, consulté le 6 juillet 2008.

Annexe

Annexe 1 : Fiches pédologiques

Fiche pédologique et classe (structure, racine et pore) utilisée pour l'élaboration des fiches récapitulatives d'après Delecour F et al., 1980*.

Fiche de sondage

N° horizon	Symbole horizon	Profondeur cm	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur (Munsell)		Taches				Charge	pH (Kit)
							Hue	V C A	Nt Na	A	Nature			
0														
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														

Résistance

1= facile
2= normale
3= difficile

Comportement

1= moulage
2= structuré
3= meuble

Humidité

1= humide
2= frais
3= sec

Texture

ALO= Argile lourde
A= Argile
AL= Argile limoneuse
AS= Argile sableuse
LA= Limon argileux
L= Limon
LS= Limon sableux
SL= Sable limoneux
S= Sable
NID= Non identifié

Abondance

1= Absentes
2= peu
3= nombreuses
4= Très nombr.

Netteté

1= Très nettes
2= nettes
3= diffuses

Abondance

1= Absente
2= <15%
3= 15 - 50%
4= >50%

Nature

1= oxydo-réd.
2= altération
3= indéterminée

ROCHES ET ELEH, GROSSIERS

NI Non Identifié
AV Alluvions
AL Dépôt d'altération
AM Amphibolite
AN Andésite
AR Arène
AI Argille
AK Arkose
BR Brèche
BC Brèche calcaire
CC Calcaire cristallin
CQ Calcaire coquillier
CG Calcaire gréseux
CL Calcaire lithographique
CM Calcaire massif
CP Calcaire coquilique
CS Calcaire schisteux
CH Chert
CV Colluvions
CT Conglomérat
CN Cornéenne
CR Crasse
DI Diorite
DG Dolomite
GN Gneiss
GR Granite
GD Grandiorite
GM Granwacke
GR Grès
GC Grès calcaire
LI Limon
Lg Loess

DIMENSIONS ELEH, GROSSIERS

G Gravieres (0,2-2 cm)
C Cailloux (2-7,5 cm)
P Pierres (7,5-25 cm)
B Blocs (> 25 cm)

ROCHES ET ELEH, GROSSIERS

MA Marne
MS Micachistes
PH Phylite
PP Poudingue
PC Poudingue calcaire
PP Porphyre
PM Psammite
QU Quartzite
QP Quartzophyllade
RC Roche cristalline
RV Roche volcanique
SB Sable volcanique
SH Schiste
SC Schiste calcareux
SG Schiste gréseux
SP Schiste phylladeux
SI Siltex
SY Syénite
TU Turfeu
TC Tur calcaire

MINÉRAUX

NI Non Identifié
AM Amphibole
AP Apatite
BI Biotite
CA Calcite
FE Feldspath
GL Glaucosite
MT Micas
MU Muscovite
OL Olivine
PL Plagioclase
PY Pyrite
QU Quartz
VX Verre volcanique
ZE Zéolite

Géopédologie - FSAGx - sept. 1998

* : Delecour F., Kindermans M., 1980. *Manuel de description des sols. Service de la science du sol. FUSAGx.* 118 p.

Structure

La description du type de structure comporte les modalités suivantes :

01. massive : absence d'agrégats structuraux, ensemble cohérent ;
02. particulaire (ou élémentaire) : absence d'agrégats structuraux, ensemble non cohérent de particules individualisées ;
03. lamellaire : agrégats arrangés selon des plans horizontaux, à faces horizontales planes et à arêtes anguleuses ;
04. squameuse : structure lamellaire à bords relevés ;
05. prismatique : agrégats arrangés selon des plans verticaux, à faces verticales bien marquées, à arêtes anguleuses et à sommets plus ou moins plans ;
06. en colonnes : structure prismatique à arêtes émoussées et sommets arrondis ;
07. polyédrique anguleuse : agrégats arrangés autour d'un point, sans dimensions prédominantes et s'embottant plus ou moins bien l'un dans l'autre, faces planes et arêtes anguleuses ;
08. polyédrique subanguleuse : même type mais avec des faces planes et bombées en mélange, à arêtes émoussées ;
09. cubique : faces planes et orthogonales, sensiblement de même dimension et à arêtes anguleuses ;
10. en plaquettes obliques : faces généralement planes, parfois gauchies, presque toujours lissées et souvent striées (surfaces de glissement ou slickensides), à arêtes vives et à orientation préférentielle oblique (structure caractéristique des horizons profonds des vertisols) ;
11. grenue (ou granulaire) : agrégats plus ou moins sphéroïdaux, non poreux, arrangés autour d'un point mais s'embottant mal ou pas du tout avec les agrégats voisins ;
12. grumeleuse : même type mais à agrégats poreux ;
13. fibreuse : structure particulière aux horizons organiques dans lesquelles les résidus végétaux à structure fibreuse sont encore bien identifiables (s'applique aux horizons H et O de résineux) ;
14. feuilletée : même type de structure, correspondant aux organes végétaux à structure de feuilles (s'applique aux horizons O de feuillus) ;
15. coprogène : structure particulière aux horizons organiques constitués, pour au moins la moitié, d'une masse de coprolithes, parfois plus ou moins remaniés mais toujours individualisés.

Porosité

Classes	Nombre de pores/unité de surface	
	pouce ²	dm ²
	m ²	
1. pas de pores	0	0
2. très peu nombreux	< 1	< 15
3. peu nombreux	1-5	15-75
4. nombreux	5-15	75-200
5. très nombreux	> 15	> 200

11.2.2. Dimensions des pores.

Les classes suivantes sont définies :

1. très fins : pores à diamètre < 1 mm,
2. fins : pores de 1 à 2 mm,
3. moyens : pores de 2 à 5 mm,
4. larges : pores à diamètre > 5 mm,
5. très fins et fins (< 2 mm),
6. très fins à moyens (< 5 mm),
7. très fins à larges (0-5 mm),
8. fins et moyens (1-5 mm),
9. fins à larges (1-> 5 mm).

Racines

18.1. Abondance des racines (obligatoire).

Les remarques énoncées à l'occasion de la description des pores (cf § 11.2.1.) sont applicables également au cas des racines : les critères d'appréciation sont les mêmes.

Classes	nombre de racines par unité de surface	
	pouce ² m ²	dm ²
1. pas de racines	0	0
2. très peu nombreuses	< 1	< 15
3. peu nombreuses	1-5	15-75
4. nombreuses	5-15	75-200
5. très nombreuses	> 15	> 200

18.2. Dimension des racines (obligatoire).

Les classes suivantes sont retenues :

1. très fines : racines de diamètre < 1 mm,
2. fines : racines à diamètre de 1 à 2 mm,
3. moyennes : racines à diamètre de 2 à 5 mm,
4. grosses : racines de diamètre > 5 mm,

5. très fines et fines : ensemble de racines < 2 mm,
6. très fines à moyennes : ensemble de racines < 5 mm,
7. très fines à grosses : racines de toutes classes de diamètre.

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des résultats

Définitions des termes utilisés pour identifier les horizons* :

Horizons minéraux :

A : horizon minéral de surface, caractérisé soit par une accumulation de matière organique humifié plus ou moins intimement associé à la fraction minérale, soit par une morphologie acquise au cours de la formation du sol, sans que cet horizon présente les caractères aux horizons E ou B.

B : horizon illuvial ou assimilé, caractérisé par un ou plusieurs des caractères suivants : (i) accumulation illuviale d'argile, Fe, Al et/ou humus, (ii) concentration résiduelle de sesquioxydes, (iii) néoformation de minéraux argileux, libération de sesquioxydes, (iv) formation d'une structure grenue, polyédrique ou prismatique.

C : horizon minéral ou couche de matériau non consolidé à partir duquel le solum est présumé s'être formé et qui ne présente pas les caractères diagnostic propres à n'importe quel autre horizon principal.

Suffixes alphabétiques utilisés :

c : accumulation concrétionnaire ;

r : réduction énergétique liée à une nappe phréatique permanente (gley) ;

g : tâche d'oxydo-réduction ;

h : accumulation de matière organique humifiée ;

s : accumulation de sesquioxydes ;

w : altération in situ reflétée par néoformation d'argile, couleur, structure... (Bw correspond à l'ancien (B)).

* : Delecour F., Kindermans M., 1980. *Manuel de description des sols. Service de la science du sol. FUSAGx.* 118 p.

Annexe 3 : Fiches récapitulatives des sondages et profils du monastère de Kiswishi

Sondage de la toposéquence du monastère de Kiswishi															
Référence : KIS 3 Date : 16/02/2008 Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu-dit : Monastère de Kiswishi Latitude : 11,31887° S Longitude : 27,28013° EO				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Plateau (surface plane) Série de sol : Série Mimbulu (Ag-2) Occupation : Forêt claire (miombo) Végétation : Herbacée et ligneuse haute (<i>Brachystegia spiciformis</i> , <i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Albizia</i> , <i>Uapaca robynsii</i> , <i>Smilox anceps</i>)								
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Ah	0 – 30	0 – 15	1	3	2	LS	5 YR	4	6	1	-	-	1	-	4
AB	30 – 40	30 – 40	2	1	2	AL	2,5 YR	4	4	1	-	-	2	GR	4
B1	40 – 60	45 – 60	2	1	2	AL	2,5 YR	4	6	1	-	-	1	-	4
B2	60 – 90	75 – 90	2	1	2	AL	2,5 YR	4	6	1	-	-	2	GR	4
Bc	90 – 100	90 -100	3	1	2	AL	2,5 YR	4	6	1	-	-	3	GR	4

GR : grès

Profil de la toposéquence du monastère de Kiswishi																				
Référence : P12 Date : 12/03/2008 Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu dit : Monastère de Kiswishi Latitude : 11,53150° S Longitude : 27,46677° EO				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Plateau (surface plane) Série de sol : Série Mimbulu (Ag2) Occupation : Forêt claire (miombo) Végétation : Ligneuse haute (<i>Brachystegia spiciformis</i> , <i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Uapaca robynsii</i> , <i>Ascolepis</i> , <i>Setaria palidifusca</i>)													
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
Ah	0 – 13	2	1	2	2	AL	5 YR	2	3	1	-	-	1	-	5	12	2	5	2	5
Bw	13 – 34	2	2	3	3	AS	5 YR	3	6	3	2	4	2	SHA	5	8,11	1	2	3	3
Cs	34 – 93	2	4	3	3	AS	5 YR	4	8	2	3	6	4	SHA	5	11	2	3	3	2

SHA : shale

Sondage de la toposéquence du monastère de Kiswishi															
Référence : KIS 2 Date : 16/02/2008 Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu-dit : Monastère de Kiswishi Latitude : 11°31,934' S Longitude : 27°28,339' EO				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : au tiers inférieur du versant Série de sol : Série Kaponda (A2) Occupation : Agriculture (jachère) Végétation : Herbacée (<i>Pteridium afillima</i> , <i>Titonia diversifolia</i> , <i>Setaria palidifusca</i>)								
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A1	0 – 13	0-13	3	3	2	AL	10 YR	3	3	1	-	-	1	-	4
B1	13 – 60	26-39	2	2	2	A	2,5 YR	3	6	1	-	-	1	-	4
B2	60 – 70	60 – 70	2	2	2	A	2,5 YR	3	6	2	2	3	1	-	4
Bw	70 – 100	84-100	1	2	2	A	2,5 YR	3	6	1	-	-	1	-	4

Profil de la toposéquence du monastère de Kiswishi																				
Référence : P11 Date : 12/03/2008 Carte géologique : oui pédologique : oui		Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu dit : Monastère de Kiswishi Latitude : 11,53189° S Longitude : 27,47228°EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Au tiers inférieur du versant Série de sol : série Kaponda (A2) Occupation : Culture à jachère prolongée (jachère et champ de maïs et soja) Végétation : Herbacée (<i>Pteridium aquilinum</i> , <i>Hypparhenia diplandra</i> , <i>Setaria palidifusca</i> , <i>Panicum maximum</i>)													
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0 – 21	2	3	2	3	AL	5 YR	4	3	4	1	4	1	-	4	8,12	1	3	1	3
AB	21 – 55	2	2	2	3	AL	5 YR	3	6	3	3	4	1	-	4	8,12	3	4	2	4
Bw1	55 – 100	2	2	3	2	A	2,5 YR	4	8	3	3	4	1	-	4	8	2	3	3	4
Bw2	100 – 120	2	3	3	3	A	2,5 YR	4	8	1	-	-	1	-	4	8	2	4	-	1

Sondage de la toposéquence du monastère de Kiswishi																	
Référence : KIS 1 Date : 16/02/2008 Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu-dit : Monastère de Kiswishi Latitude : 11°31,882' S Longitude : 27°28,376 'EO Altitude : 1329 m					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : bas fond d'une cuvette Série de sol : Série Mutwale (D5) Occupation : Horticulture Végétation : Herbacée et ligneuse haute (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Titonia divesifolia</i> , <i>Acataspermum hispidum</i> , <i>Acacia kiirki</i>)									
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH		
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			
A1	0 – 25	0 – 25	1	3	2	LS	10 YR	2	3	1	-	-	1	-	4		
A2	25 – 50	25 – 50	1	2	2	LA	10 YR	2	3	1	-	-	1	-	4		
A3	50 – 60	50 – 60	1	2	1	AL	10 YR	2	2	1	-	-	1	-	4		
Bg1	60 – 93	60 – 93	1	2	1	A	7,5 YR	5	3	3	2	1	2	GR, CON	5		
Bg2	93 – 118	93 – 118	1	2	1	A	7,5 YR	6	1	2	2	1	2	GR, CON	5		

CON : concrétions de sesquioxides ; GR : grès

Profil de la toposéquence du monastère de Kiswishi																				
Référence : P10 Date : 12/03/2008 Carte géologique : oui pédologique : oui		Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu dit : Monastère de Kiswishi Latitude : 11,53126° S Longitude : 27,47279° EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : au bas d'une cuvette (bas fond) Série de sol : Série Mutwale Occupation : Horticulture Végétation : Herbacée et ligneuse haute et basse (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Acacia kiirki</i> , <i>Bidens oligoflora</i> , <i>Titonia diversifolia</i> , <i>Panicum maximum</i>)													
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A1	0 – 26	3	1	2	4	LA	10 YR	2	1	2	1	3	1	-	4	12	2	3	3	4
A2	26 – 51	3	1	3	4	A	2,5 Y	2	1	3	2	3	2	CON	4	8	2	2	2	3
Bg	51 – 79	4	2	4	3	A	2,5 Y	5	1	4	2	3,6	3	CON	5	8	2	4	2	3

CON : concrétions de sesquioxides

Annexe 4 : Fiches récapitulatives des sondages et profils de la ferme Kasapa

Profil de la ferme Kasapa																				
Référence : P8		Commune : Annexe de Lubumbashi					Lithologie : Kundelungu supérieur													
Date : 08/03/2008		Lieu dit : ferme de Kasapa					Géomorphologie : Plateau (surface plane)													
Carte géologique : oui		Latitude : 11,58296° S					Série de sol : Série Baya (A3)													
pédologique : oui		Longitude : 27,41278° EO					Occupation : Agriculture (Jachère et culture de maïs)													
Végétation : Herbacée et ligneuse haute et basse (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Setaria palidifusca</i> , <i>Acacia kiirki</i> , <i>Bidens oligoflora</i> , <i>Titonia diversifolia</i>)																				
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A1	0 – 24	2	1	1	5	SL	10 YR	4	3	3	1	4	1	-	4	11	1	5	3	5
AB	24 – 58	2	3	2	4	AS	10 YR	5	6	3	2	4	1	-	4	11,8	2	5	3	3
Bw1	58 – 103	2	2	2	4	AS	10 YR	5	8	3	2	4	2	CON	5	11,8	2	4	2	4
Bw2	103 – →	2	3	2	4	AS	7,5 YR	7	8	4	2	5	3	CON	5	11,8	2	4	1	2

CON : concrétions de sesquioxydes ;

Profil de la ferme Kasapa																				
Référence : P9		Commune : Annexe de Lubumbashi					Lithologie : Kundelungu supérieur													
Date : 08/03/2008		Lieu dit : ferme de Kasapa					Géomorphologie : dans l'aire rectiligne du versant													
Carte géologique : oui		Latitude : 11,58717° S					Série de sol : Série Kaponda (A2)													
pédologique : oui		Longitude : 27,41839° EO					Occupation : Agriculture (Jachère et champ de maïs)													
Végétation : Herbacée et ligneuse haute et basse (<i>Titonia diversifolia</i> , <i>Hypparhenia diplandra</i> , <i>Bidens oligoflora</i>)																				
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A1	0 – 8	2	1	2	4	AL	5 YR	2	2	2	1	6	1	-	4	1;2	2	5	3	4
AB	8 – 39	2	3	2	2	AS	7,5 YR	3	4	3	1	6	1	-	4	8	2	3	3	4
Bw1	39 – 104	2	3	3	3	A	5 YR	4	8	3	1	6	3	CON	4	8	1	5	2	3
Bw2	104 – 120	2	4	3	3	A	5 YR	5	8	4	2	6	4	CON	4	8	1	4	1	2

CON : concrétions de sesquioxydes

Annexe 5 : Fiches récapitulatives des sondages et profils du Jardin expérimentale de l'UNILU

Profil du jardin expérimentale de l'UNILU																				
Référence : P1 Date : 19/02/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Jardin expérimentale de l'UNILU Latitude : 11°36'30" S Longitude : 27°28'35" EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : surface plane Série de sol : Série Kaponda (A2) Occupation : Agriculture (très ancienne >30 ans) Végétation : Herbacée et ligneuse haute (maïs, <i>Acacia kiirki</i> , végétation cuprophyte)													
Carte géologique : oui pédologique : oui																				
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A1	0 - 16	2	2	2	3	AS	10 YR	2	3	1	-	-	1	-	4	8	2	4	1	2
Bw1	16 - 24	2	3	3	4	A	5 YR	4	6	1	-	-	1	-	4	3	3	4	1	2
Bc2	24 - 78	2	4	3	3	A	7,5 YR	5	8	2	3	6	3	SHA,QZ	4	1	2	3	1	2
C1	78 - 115	2	4	3	3	A	7,5 YR	3	4	4	3	6	3	SHA,QZ	4	1	2	3	-	1
C2	115 - →	2	4	3	3	A	7,5 YR	3	4	5	3	6	3	SHA,QZ	5	1	2	3	-	1

SHA : shale et QZ : quartz

Annexe 6 : Fiches récapitulatives des sondages et profils du monastère de Kasenbula

N° Profil	Horizon	Couleur	Structure	Activité biologique et abondance des racines
P 13	A0	2.5 Y 4/2	grumeleuse	très fines racines
	BA	10 YR 5/6	bloc subangulaire et angulaire	très fines racines
	B1	7.5 YR 5/6	bloc angulaire	très fines racines
	B2	7.5 YR 5/8	bloc subangulaire	peu de fines racines
	B3	7.5 YR 6/8	prisme subangulaire	peu de fines racines
	Bcs	7.5 YR 6/8	bloc angulaire	peu de fines racines
	P 14	A0	10 YR 6/4	granuleuse
BA		10 YR 6/6	bloc subangulaire et angulaire	beaucoup de très fines racines
Bt		7.5 YR 6/8	bloc subangulaire	racines grossières
B2		7.5 YR 6/8	bloc subangulaire et angulaire	racines grossières
Bcs1		7.5 YR 5/8	grumeleuse grossière	fines racines
Bcs2		7.5 YR 6/8	bloc angulaire	fines racines
Cg		7.5 YR 5/8	-	pas de racines
P 15	A	10 YR 6/4	bloc subangulaire	très fines racines
	B1	10 YR 6/6	fin bloc subangulaire	peu d'activité
	Bcs	7.5 YR 6/8	rocailleuse	peu d'activité
	CBg	5 YR 5/8	-	peu de fines racines
	Cg	5 YR 4/6	-	pas d'activité
P 17	O	10 YR 5/3	grumeleuse	beaucoup de très fines et moyennes racines
	A	10 YR 5/4	bloc subangulaire	beaucoup de très fines et moyennes racines
	E	10 YR 6/6	grumeleuse	peu d'activité
	Btc	7.5 YR 6/8	bloc subangulaire	peu d'activité
	BC	10 YR 7/6	bloc subangulaire	peu d'activité
	C	10 YR 7/6	massive	très peu d'activité
P 18	Ap	2.5 Y 6/4	grumeleuse	beaucoup de fines et moyennes racines
	Bt	10 YR 6/6	bloc subangulaire	beaucoup de très fines racines grossières
	Bws	7.5 YR 6/8	bloc subangulaire	très fines à moyennes racines
	BC	10 YR 6/8	bloc angulaire	fines à moyennes racines
	C	10 YR 6/8	bloc subangulaire et angulaire	pas d'activité

Information recueillie à la faculté de Gand

Annexe 7 : Fiches récapitulatives du sondage du monastère de Kansebula

Sondage de la toposéquence de Kansebula															
Référence : KANS 1 Date : 17/02/2008 Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Commune : District du haut Katanga Lieu-dit : Monastère de Kansebula Latitude : 11°45,124' S Longitude : 27°34,609' EO				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Plateau (surface plane) Série de sol : Série Baya (A3) Occupation : Forêt claire (miombo) Végétation : Herbacée et ligneuse haute <i>(Julbernardia paniculata, Combretum melo, Discorea sp, Afromum)</i>								
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A1	0 – 16	0 - 16	1	1	2	AL	10 YR	3	4	1	-	-	1	-	4
B 1	16 – 24	16 - 24	2	1	2	AL	10 YR	5	6	1	-	-	1	-	4
B 2	24 – 78	35 – 50, 60 - 75	2	1	2	AL	10 YR	5	8	1	-	-	1	-	4
C 1	78 - 115	78 - 115	3	1	2	AL	10 YR	5	8	1	-	-	1	-	5

Annexe 8 : Fiches récapitulatives des Alisols Rhodiques

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 4 Date : 25/02/08			Commune : Lubumbashi Lieu-dit : quartier de la Gécamines (cimetière musulman)				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : surface plane Série de sol : série Kaponda (A2) Occupation : site urbain								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67501° S Longitude : 27,4497° EO				Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Setaria palidifusca</i> , <i>Rendlia altera</i> , <i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Brachystegia spiciformis</i> , <i>Celosia sp</i>)								
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 – 21	0 – 12	1	3	2	AS	10 YR	3	4	1	-	-	1	-	5
B	21 – 44	36 – 44	2	1	2	AS	2,5 YR	5	6	3	2	2	1	-	5
Bw	44 – 119	44 – 55, 112 – 119	3	1	2	A	2,5 YR	5	8	1	-	-	1	-	5

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 5 Date : 25/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu-dit : quartier de la Gécamines				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : surface plane Série de sol : série Kaponda (A2) Occupation : site urbain								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67448° S Longitude : 27,45245° EO				Végétation : Sol nu (quelques <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> et <i>Rendlia altera</i>)								
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 – 12	0 – 12	2	1	2	AL	5 YR	5	8	2	2	2	1	-	5
Bw	12 – 41	24 – 31	2	1	2	AL	5 YR	4	8	-	-	-	1	-	4,5
Bc1	41 – 61	41 – 51	2	1	2	A	5 YR	4	8	-	-	-	2	QZ	4,5
Bc2	61 – 77	67 – 70, 75 – 77	3	2	2	A	5 YR	4	8	-	-	-	4	QZ	4

QZ : quartz

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 8 Date : 01/03/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier de la Gécamines				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : En bas du versant Série de sol : série Kaponda (A2) Occupation : Site urbain								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66712° S Longitude : 27,45686° EO				Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i>)								
Horizon	Profondeur	Profondeur Des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 – 16	0 – 16	2	1	2	AL	7,5 YR	3	3	1	-	-	1	-	5
AB	16 – 37	16 – 27	3	1	2	A	7,5 YR	4	6	1	-	-	1	-	5
Bw	37 - 117	95 – 117	3	1	2	A	5 YR	4	8	1	-	-	1	-	5

Profil de la toposéquence Gécamines																					
Référence : P2 Date :01/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Gécamines Latitude : 11,67488° S Longitude : 27,45188°EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Plateau (surface plane) Série de sol : Série Kaponda (A2) Occupation : site urbain (à 15 m d'une termitière) Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Setaria Palidefusca</i> , <i>Rendlia altera</i>)														
Carte géologique : oui		Humidité		Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
pédologique : oui								Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature					Dim	Ab
A1	0-5	2	3	-	-	LS	7,5 YR	5	8	4	4	4	-	-	-	5	2	1	5	1	5
(C)	5-7	2	3	-	-	LS	10 YR	3	4	-	-	-	-	-	-	5	1;2	1	5	1	5
A2	7-9	2	3	-	-	AL	10 YR	3	3	-	-	-	-	-	-	4	14	1	4	1	4
BA	9-24	2	3	-	-	AL	5 YR	5	8	2	2	6	-	-	-	4	8	2	4	2	3
Bw1	24-41	2	3	-	-	A	5 YR	5	8	2	2	7	-	-	-	4	8	2	3	1	2
Bw2	41-84	2	2	-	-	A	2,5 YR	5	8	2	2	7	-	-	-	4	8	2	3	-	1
Bcs1	84-150	2	2	-	-	A	2,5 YR	5	8	-	-	-	3	SE	-	4	8	1	2	-	1
Bcs2	150-200	2	3	-	-	A	2,5 YR	5	8	4	4	6	4	SE	-	4	8	1	2	-	1

SE : sesquioxyde

Profil de la toposéquence Gécamines																					
Référence : P3 Date :01/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Gécamines Latitude : 11,67448° S Longitude : 27,45079°EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Plateau (surface plane) Série de sol : Série Kaponda (A2) Occupation : Site urbain (ancienne carrière de quartz) Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Setaria Palidefusca</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Celosia trigyna</i>)														
Carte géologique : oui		Humidité		Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
pédologique : oui								Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature					Dim	Ab
A1	0-3,6	2	1	-	-	LA	5 YR	4	3	-	-	-	-	-	-	4	8	2	3	2	3
(C)	3,6-5	2	2	-	-	LS	5 YR	4	3	-	-	-	-	-	-	4	1	2	3	2	3
A2	5-8,5	2	3	-	-	AL	10 YR	5	6	-	-	-	-	-	-	4	8	2	4	2	3
BA	8,5-27	2	3	-	-	AL	7,5 YR	3	3	2	2	4	-	-	-	4	8	1	4	-	1
Bw1	27-65	2	3	-	-	A	7,5 YR	5	8	2	2	4	-	-	-	4	8	2	3	-	1
Bw2	65-107	2	2	-	-	A	5 YR	5	8	2	2	4	-	-	-	4	8	2	3	-	1
Bc1	107-140	2	2	-	-	A	5 YR	5	8	2	2	5	3	QZ	-	4	8	1	3	-	1

QZ : quartz

Profil de la toposéquence Gécamines																					
Référence : P4 Date : 03/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Gécamines Latitude : 11,67136° S Longitude : 27,45735°EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Plateau (surface plane) Série de sol : Série Kaponda (A2) Occupation : Site urbain (trou de toilettes en construction) Végétation : Herbacée et ligneuse haute (<i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Celosia trigyna</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i>)														
Carte géologique : oui		Humidité		Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
pédologique : oui								Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature					Dim	Ab
A(C)	0-12	2	3	-	-	AL	7,5 YR	5	6	4	3	4	1	-	-	5	1	2	4	-	1
AB	12-42	2	3	-	-	AL	5 YR	4	8	3	3	4	1	-	-	5	1;2	2	4	-	1
Bw1	42-66	2	3	-	-	A	5 YR	5	8	4	3	4	1	-	-	5	8	1	4	-	1
Bw2	66-158	2	4	-	-	A	2,5YR	5	8	4	3	4	1	-	-	5	8	2	4	-	1
Bcs	158-200	2	4	-	-	A	5 YR	4	8	3	2	6	4	SE	-	5	8	1	3	-	1

SE : sesquioxyde

Miniprofil de la toposéquence Gécamines																			
Référence : MP 1 Date : 20/02/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : plateau du quartier de la Gécamines Latitude : 11°40'28,6" S Longitude : 27°26'59,7" EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : Série Kaponda (A2) Occupation : site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Rendlia altera</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Julbernardia paniculata</i>)												
Horizon	Profondeur	Profondeur Des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
1A	0 – 15	1 – 15	2	2	SL	7,5 YR	5	8	1	-	-	3	AG	7	2	1	4	2	5
(C1)	15 – 17	15 – 17	2	2	LS	7,5 YR	5	3	1	-	-	2	AG	6	2	1	3	1	3
(C2)	17 – 20	17 – 20	1	2	L	5 Y	4	2	1	-	-	1	-	5,5	2	1	3	1	4
A(C)	20 – 24	20 – 24	1	2	LA	2,5 YR	3	1	1	-	-	1	-	5	2	1	3	1	3
2A	24 – 37	24 – 37	2	2	A	5 YR	4	4	1	-	-	1	-	5	8	1	3	1	3
Bw	37 – 50	37 – 50	2	2	A	7,5 YR	5	8	1	-	-	1	-	4	8	1	3	1	2

AG : argile

Miniprofil de la toposéquence Gécamines																			
Référence : MP 8 Date : 11/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Gécamines Latitude : 11,67486° S Longitude : 27,44975° EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : série Kaponda (A2) Occupation : site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Brachistegia spiciformis</i> , <i>Julbernardia paniculata</i>)												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
Bw1	0 – 10	0 – 10	2	2	AS	5 YR	4	8	1	-	-	1	-	4	8,11	1	5	-	1
Bw2	10 – 37	10 – 37	1	2	A	2,5 YR	4	8	1	-	-	1	-	4	8	1	5	-	1

Miniprofil de la toposéquence Gécamines																			
Référence : MP 15 Date : 14/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : plateau Gécamines tout près du cimetière Latitude : 11,67206° S Longitude : 27,44493° EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : série Kaponda (A2) Occupation : carrière abandonné ou en exploitation (quartz) Végétation : sol nu												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A(C)	0 – 5	0 – 5	3	2	AS	10 YR	4	6	1	-	-	1	-	4	1	1	3	2	3
A	5 – 14	5 – 14	3	2	AS	7,5 YR	5	8	1	-	-	1	-	4	8,11	1	4	-	1
Bw1	14 – 26	14 – 26	2	2	A	7,5 YR	4	6	1	-	-	1	-	4	8	1	4	-	1
Bw2	26 – 57	26 – 57	2	2	A	5 YR	5	8	1	-	-	1	-	4	8	2	4	-	1
Bc	57 – 72	57 – 72	3	2	A	5 YR	4	8	3	2	2	4	QZ	4	2	-	1	-	1

QZ : quartz

Miniprofil de la toposéquence Gécamines																			
Référence : MP 16 Date : 14/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : quartier de la Gécamines Latitude : 11,67042° S Longitude : 27,44394° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : à mi-hauteur du versant Série de sol : série Kaponda (A2) Occupation : site urbain (versant du cimetière) Végétation : herbacée et ligneuse basse (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Brachystegia spiciformis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Julbernardia paniculata</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		Racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A (C)	0 – 5	0 – 5	1	2	AL	10 YR	4	4	1	-	-	1	-	5	2	1	5	1	5
A	5 – 23	5 – 23	2	2	A	7,5 YR	4	6	3	2	3	1	-	4	8	1	4	1	4
Bcs	23 – 31	23 – 31	3	2	A	7,5 YR	5	8	1	-	-	3	CON	4	8,2	2	4	1	3

CON : concrétion de sesquioxydes

Annexe 9 : Fiches récapitulatives des Alisols ferri endo-squelettiques

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 1 Date : 20/02/2008			Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu-dit : Cité Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : surface plane Série de sol : série Baya (A3) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Bidens oligoflora</i> , <i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Brachystegia spiciformis</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11°39'48,9" S Longitude : 27°24'50,8" EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 - 10	0 - 10	1	2	2	AS	2,5 Y	4	3	1	-	-	1	-	5
AB	10 - 20	10 - 20	2	2	2	AS	10 YR	4	6	2	2	2	3	SHA	5
Bcs1	20 - 40	30 - 40	3	1	2	AS	7,5 YR	5	8	3	2	2	4	SHA	5
Bcs2	40 - 88	56 - 70	3	1	2	A	5 YR	5	8	4	2	2	4	SHA	5
Ccs	88 - 118	99 - 113	3	1	2	A	10 YR	7	8	4	2	2	4	SHA	6

SHA : shale

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 2 Date : 20/02/2008			Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu-dit : Cité Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : surface plane Série de sol : série Baya (A3) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Crepidiorhopalon tenuis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Brachystegia spiciformis</i> , <i>Imperata cylindrica</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11°39'56,8" S Longitude : 27°24'50,2" EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 - 7	0 - 7	1	3	3	AS	2,5 Y	6	3	1	-	-	1	-	4
Bw	7 - 18	7 - 18	3	1	2	A	10 YR	5	8	2	2	2	2	AG	4
Bcs1	18 - 38	29 - 38	3	1	2	A	10 YR	6	8	3	1	2	2	SHA	4
Bcs2	38 - 120	38 - 50 58 - 68, 92 - 101	3	1	2	A	10 YR	5	8	4	1	2	4	SHA, QZ	4

SHA : shale ; AG : argile ; QZ : quartz

Profil de la toposéquence de la Gécamines																				
Référence : P7 Date : 05/03/2008 Carte géologique : oui pédologique : oui			Commune : Lubumbashi Lieu dit : cité Karavia Latitude : 11,66375° S Longitude : 27,41396° EO				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Plateau (surface plane) Série de sol : Série Baya (A3) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Brachystegia spiciformis</i> , <i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Bidens oligoflora</i> , <i>Setaria palidifusca</i>)													
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	1 - 3	2	1	3	5	AL	10 YR	2	3	1	-	-	1	-	4	1,2	2	4	1	5
AB	3 - 20	2	3	3	3	AS	10 YR	5	8	1	-	-	1	-	4	8	2	5	4	3
Bw	20 - 44	2	4	3	3	A	10 YR	6	8	3	2	6	2	CON	4	8	1	5	4	3
Bcs	44 - 88	2	3	3	3	A	10 YR	7	8	4	2	6	4	CON	4	8	1	5	3	4
Ccs	88 - 120	2	4	2	3	A	10 YR	7	8	5	2	6	4	CON	4	11	-	1	1	1

CON : concrétions de sesquioxides

Miniprofil du transect de la Gécamines																			
Référence : MP 2 Date : 26/02/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Basembe sur le plateau Karavia Latitude : 11,67491° S Longitude : 27,44117° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : à mi-hauteur du versant Série de sol : série Baya (A3) Occupation : Site urbain (compost) Végétation : Sol nu											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
1A	0-3	0-3	1	2	SL	7,5 YR	4	1	1	-	-	1	-	4	1,2	1	4	1	4
(C)	3-4,5	3-4,5	1	2	AS	10 YR	3	2	1	-	-	1	-	4	1,2	1	3	1	3
(C)A	4,5-6	4,5-6	1	2	AS	7,5 YR	2	2	1	-	-	1	-	5	2	1	3	1	3
2A	6-12	6-12	1	2	AS	10 YR	5	3	1	-	-	1	-	4	1,2	1	3	1	3
AB	12-28	12-28	2	2	A	10 YR	4	6	1	-	-	2	SE	4	8	2	3	1	2
Bcs	28-41	28-41	3	2	AS	7,5 YR	5	6	2	2	2	3	SE	4	12	3	3	-	-
Ccs	41-52	41-52	3	2	AS	7,5 YR	3	4	3	2	2	4	SE	4	11	-	1	-	-

SE : sesquioxyde

Miniprofil du transect de la Gécamines																			
Référence : MP 4 Date : 01/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Gécamines Latitude : 11,66881° S Longitude : 27,45641° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : au centre du versant Série de sol : série Baya (A3) Occupation : Site urbain (en dessous d'une ligne électrique) Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Imperata cylindrica</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-4	0-4	1	2	AL	7,5 YR	3	2	1	-	-	1	-	5	3	-	1	1	5
B	4-14	4-14	2	2	A	7,5 YR	5	8	1	-	-	1	-	4	2	1	3	1	4
(C)	14-18	14-18	1	2	AL	7,5 YR	3	2	1	-	-	1	-	4	2	1	3	1	4
Bw1	18-31	18-31	2	2	A	7,5 YR	4	6	1	-	-	1	-	4	2	1	3	1	3
Bw2	31-54	31-54	2	2	A	7,5 YR	5	6	1	-	-	1	-	4	2	1	3	-	-

Miniprofil du transect de la Gécamines																			
Référence : MP 9 Date : 13/03/2008		Commune : Annexe Lubumbashi Lieu dit : Plateau Karavia Latitude : 11,66367° S Longitude : 27,41405° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : série Baya (A3) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Bidens oligoflora</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Combretum melo</i> , <i>Julbernardia paniculata</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-2	0-2	1	2	AL	2,5 Y	2	1	1	-	-	1	-	7	2	1	5	1	4
AB	2-15	2-15	2	2	A	10 YR	4	1	1	-	-	1	-	7	8	3	4	3	5
Bw1	15-27	15-27	3	2	A	10 YR	5	4	1	-	-	1	-	7	8	1	3	2	3
Bcs	27-47	27-47	3	2	A	10 YR	4	6	2	2	3	2	CON	6	8	1	3	2	2

CON : concrétions de sesquioxydes

Miniprofil du transect de la Gécamines																			
Référence : MP 11 Date : 13/03/2008		Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu dit : Quartier Karavia Latitude : 11,67050° S Longitude : 27,42268° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Tiers supérieur d'une cuvette Série de sol : série Baya (A3) Occupation : Site urbain (toilette ouverte d'une prof de 3m) Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Strichnos sp</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-7	0-7	1	2	AL	5 YR	3	1	1	-	-	1	-	4	11	1	5	1	5
AB	7-15	7-15	2	2	A	7,5 YR	4	6	2	2	3	1	-	4	8,1	2	5	1	4
Bw	15-34	15-34	3	2	A	5 YR	5	8	2	2	3	1	-	4	8	2	4	3	3
Bc	34-93	34-55	3	2	AS	5 YR	4	8	3	2	2	3	SH	4	8,1	1	4	-	-

SHA : shale

Annexe 10 : Fiches récapitulatives des Alisols ferri épi-squelettiques

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 7 Date : 26/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : quartier Bosenbe				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : à mi-hauteur du versant Série de sol : série Musaongo (Ag-3) Occupation : Site urbain Végétation : Sol nu								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67491° S Longitude : 27,44117° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 – 12	0 – 12	1	2	2	AS	10 YR	4	6	1	-	-	1	-	4
AB	12 – 21	12 – 21	2	2	2	A	10 YR	7	8	2	2	3	1	-	4
Bcs1	21 – 37	30 – 37	2	1	2	A	10 YR	6	8	3	2	3	2	SH	4
Bcs2	37 – 47	42 – 47	3	2	2	AS	10 YR	5	8	4	2	2	4	SH	4
Bcs 3	47 – 56	47 – 56	3	2	2	AS	10 YR	5	8	4	2	2	4	SH	5

SHA : shale

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 9 Date : 01/03/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Gécamines				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : série Musaongo (Ag-3) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse haute (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Mimosaceae</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67408° S Longitude : 27,45427° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 – 15	0 – 15	1	1	2	AL	10 YR	5	8	1	-	-	1	-	4
Bw	15 – 61	46 – 61	2	1	2	AL	7,5YR	6	8	1	-	-	1	-	4
Bc	61 – 89	61 – 71, 71 – 80, 80 – 89	3	1	2	A	7,5 YR	6	8	1	-	-	4	QZ	4
C	89 – 102	89 – 102	3	1	2	A	7,5 YR	5	8	4	3	2	3	QZ	4

QZ : quartz

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 7 Date : 11/03/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Quartier Gécamines Latitude : 11,67360° S Longitude : 27,43785° EO				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Bas de versant Série de sol : série Musaongo (Ag-3) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Imperata cylindrica</i>)												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A (C)	0 – 5	0 – 5	1	2	AS	10 YR	3	4	1			1	-	5	11	1	5	2	5
A	5 – 18	5 – 18	2	2	AS	10 YR	5	3	2	2	2	2	CON	4	8,11	1	3	1	4
Bcs	18 – 30	18 – 30	3	2	A	10 YR	4	6	4	2	2	3	CON	4	11	1	2		

CON : concrétions de sesquioxides

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 10 Date : 13/03/2008		Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu dit : plateau Karavia Latitude : 11,66639° S Longitude : 27,41932° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : série Musaongo (Ag-3) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Julbernardia paniculata</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		Racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A(C)	0-5	0-5	1	2	AL	10 YR	2	1	1	-	-	1	-	4	8,2	1	4	1	5
A	5-12	5-12	2	2	A	10 YR	4	6	2	2	2	1	-	4	8	1	3	1	3
Bw	12-25	12-25	2	2	A	10 YR	5	8	2	2	2	1	-	4	8	1	3	1	2
Bcs	25-39	25-39	3	2	AS	10 YR	6	8	2	2	4	4	SE	4	8,11	2	4	-	-

SE : sesquioxyde

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 14 Date : 14/03/2008		Commune : Annexe Lubumbashi Lieu dit : plateau Karavia (derrière cercle hippique) Latitude : 11,66952° S Longitude : 27,43375° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : série Musaongo (Ag-3) Occupation : Site urbain (assainissement par fosses mal entretenue) Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Acacia kiirki</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Imperata cylindrica</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
(C)	0-4	0-4	3	2	AL	10 YR	5	4	3	2	3	1	-	4	11	1	5	1	5
A	4-15	4-15	3	2	AL	7,5 YR	5	8	2	1	2,3	1	-	4	8,11	2	5	1	3
Bcs1	15-31	15-31	2	2	A	7,5 YR	5	8	2	2	3	2	CON	4	8	2	4	1	2
Bcs2	31-55	31-55	2	2	A	7,5 YR	6	8	3	2	2	3	CON	4	8	2	4	-	-

CON : concrétions de sesquioxydes

Annexe 11 : Fiches récapitulatives des Gleysols

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 3 Date : 20/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu-dit : cité Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : profil en cuvette au centre de la forme Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : site urbain Végétation : Herbacée (<i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Imperata cylindrica</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11°40'20,6" S Longitude : 27°25'28,0" EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Ah	0 – 19	0 – 15	2	1	2	A	10 YR	2	2	1	-	-	1	-	4
AB	19 – 29	19 – 29	3	1	2	ALO	10 YR	2	2	2	2	1	1	-	4
Bg1	29 – 66	42 – 52	3	1	2	ALO	2,5 Y	4	1	2	2	1	1	-	5
Bg2	66 – 81	66 – 74	3	1	2	ALO	2,5 Y	5	1	3	1	1	1	-	5
Bg3	81 – 95	81 – 95	3	1	2	ALO	2,5 Y	6	1	4	1	1	1	-	5
Bg4	95 – 120	103 – 120	3	1	2	ALO	2,5 Y	7	1	4	1	1	1	-	6

Sondage du transect de la Gécamines															
Référence : GECA 6 Date : 26/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Affluent de la rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : au tiers inférieur d'un versant Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : Terrain humide Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Crepidiorhopalon tenuis</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67216° S Longitude : 27,43898° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Ah	0 – 7	0 – 7	2	2	1	AS	10 YR	2	3	2	2	1	1	-	5
AB	7 – 17	7 – 17	2	1	1	AS	10 YR	2	2	2	3	1	1	-	6
Bg1	17 – 27	17 – 27	3	1	1	A	7,5 Y	4	1	3	2	1	1	-	5
Bg2	27 – 51	27 – 51	3	1	1	ALO	7,5 Y	6	1	3	2	1	1	-	5
Bg3	51 – 62	51 – 62	1	1	1	ALO	7,5 Y	6	1	4	1	1	2	CON	5
Cg1	62 – 84	62 – 73	1	1	1	ALO	7,5 Y	6	2	4	1	2,1	3	CON	5
Cg2	84 – 109	95 – 102	1	1	1	ALO	7,5 Y	7	1	4	1	2,1	4	CON	5

CON : concrétions de sesquioxides

Profil de la toposéquence de la Gécamines																				
Référence : P5 Date : 04/03/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Jardin d'un étudiant cité Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : au fond d'une cuvette Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Crepidiorhopalon tenuis</i>)													
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67238° S Longitude : 27,42556° EO																	
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0 – 10	2	1	1	5	AL	10 YR	2	1	3	1	3	1	-	4	1,2	1	5	4	5
AB	10 – 19	2	2	2	4	AL	10 YR	2	2	4	2	3	1	-	4	2,8	1	5	4	4
Bg1	19 – 33	2	2	2	4	A	7,5 Y	2	1	4	2	3	1	-	4	8	2	5	2	3
Bg2	33 – 52	2	3	3	3	ALO	N	5	0	4	3	3	1	-	4	8	2	5	1	2
Bg3	52 – 107	2	4	3	3	ALO	5 Y	4	1	4	3	3	1	-	4	8	2	5	1	2
Cg	107 – 150	2	4	3	3	ALO	7,5 Y	5	1	5	3	3	1	-	4	8	2	4	1	2

Profil de la toposéquence de la Gécamines																				
Référence : P6 Date :05/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : en face du Cercle hippique					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : au fond d'une cuvette Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Crepidorhopalon tenuis</i> , <i>Cynodon dactylon</i>)													
Carte géologique : oui		Latitude : 11,67135° S					Occupation : Site urbain													
pédologique : oui		Longitude : 27,43903° EO					Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Crepidorhopalon tenuis</i> , <i>Cynodon dactylon</i>)													
Horizon	Profondeur	Humidité	Compaction	Plasticité	Friabilité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	Porosité		Racines	
							Hue	V	C	A	Dim	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
Ah	0-3	2	1	1	1	AL	2,5 Y	3	1	2	1	3	-	-	4	1,2	1,4	5	1,4	5
AB	3-16	2	4	2	2	ALO	N	2	0	4	1	3	-	-	4	8	1,4	5	4	3
Bg1	16-24	2	4	3	2	ALO	5 Y	4	1	4	2	3	-	-	4	8	1	5	4	2
Bg2	24-48	2	4	3	2	ALO	5 Y	5	1	4	2	3	-	-	4	8	1	4	-	1
Bg3	48-58	2	4	3	3	ALO	2,5 Y	7	1	5	3	3	-	-	4	8	1	4	-	1
Bcg	58-100	2	4	3	3	ALO	2,5 Y	7	1	5	3	3	4	CON	4	8	1	3	-	1

CON : concrétions de sesquioxides

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 3 Date : 27/02/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : Rivière se jetant dans la Karavia					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Profil en cuvette Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : Terrains humides (ancien sites utilisés pour l'argile) Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Crepidorhopalon tenuis</i>)												
		Latitude : 11,67342° S					Occupation : Terrains humides (ancien sites utilisés pour l'argile)												
		Longitude : 27,43373° EO					Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Crepidorhopalon tenuis</i>)												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-4	0-4	1	2	AL	5 Y	2	1	1	-	-	1	-	5	1,2	1	4	1	4
AB	4-20	4-20	2	2	A	5 Y	3	1	2	2	1	1	-	6	8	1	2	1	4
Bg1	20-30	20-30	3	2	ALO	5 Y	5	1	3	2	1	1	-	6	8	-	-	1	2
Bg2	30-48	30-48	3	2	ALO	5 Y	5	1	4	1	1	1	-	6	8	-	-	-	-

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 6 Date :11/03/2008		Commune : Lubumbashi Lieu dit : cité Gécamines					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Profil en cuvette sur une aire rectiligne Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : Terrains humides Végétation : Herbacée (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Cynodon dactylon</i>)												
		Latitude : 11,67224° S					Occupation : Terrains humides												
		Longitude : 27,43753° EO					Végétation : Herbacée (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Cynodon dactylon</i>)												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-6	0-6	1	2	AL	2,5 Y	2	1	1	-	-	1	-	5	1	5	1	1	5
AB	6-17	6-17	2	1	A	5 Y	2	1	3	1	1	1	-	5	8	4	2	3	3
Bg	17-26	17-26	3	1	ALO	10 Y	4	1	3	1	1	1	-	6	8	5	1	1	3

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 12 Date : 13/03/2008		Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu dit : cité Karavia Latitude : 11,67153° S Longitude : 27,42508° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Au fond d'une cuvette Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : Site urbain (le long d'une rivière) Végétation : Herbacée (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Setaria palidifusca</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Cynodon dactylon</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-14	0-14	2	2	A	2,5 YR	7	1	3	2	1	1	-	4	8	2	5	1	5
AB	14-20	14-20	2	2	A	2,5 YR	6	1	3	2	1	1	-	4	8	1	5	3	5
Bg1	20-28	20-28	3	2	ALO	5 YR	5	1	3	2	1	1	-	4	8	2	4	3	3
Bg2	28-71	28-41	3	2	ALO	5 YR	7	1	4	1	1,2	3	SE	5	8	1	2	1	2

SE : sesquioxyde

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 13 Date : 14/03/2008		Commune : Annexe de Lubumbashi Lieu dit : cité Karavia Latitude : 11,67204° S Longitude : 27,43240° EO						Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : tiers supérieur d'une cuvette Série de sol : série Mutwale (D5) Occupation : Terrains humides Végétation : Herbacée (<i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Crepidiorhpalon tenuis</i>)											
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-3	0-3	1	1	AL	10 YR	3	2	1	-	-	1	-	5	1	1	5	1	5
AB	3-9	3-9	1	1	A	10 YR	5	2	3	2	1	1	-	5	8	1	3	1	3
Bg	9-20	9-20	3	1	ALO	10 YR	4	1	4	2	1	3	CON	4	8	1	2	1	2

CON : concrétions de sesquioxydes

Annexe 12 : Fiches récapitulatives sur les Plinthosols

Miniprofil de la toposéquence de la Gécamines																			
Référence : MP 5 Date : 04/03/2008		Commune : Annexe Lubumbashi Lieu dit : Plateau Karavia Latitude : 11,67199° S Longitude : 27,41792° EO					Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : Surface plane Série de sol : Série Katuba (g) Occupation : Site urbain Végétation : Herbacée et ligneuse basse (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Julbernardia paniculata</i>)												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH	structure	porosité		racine	
						Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature			Dim	Ab	Dim	Ab
A	0-3	0-3	1	2	AL	7,5 YR	2	2	1	-	-	1	-	5	1,2	1	5	1	5
AC	3-5	3-5	2	2	AS	10 YR	6	2	1	-	-	3	LA	4	8	1	4	1	4
C	5-12	5-12	3	2	AS	10 YR	5	4	1	-	-	4	LA	4	11	2	3	-	-

LA : latérite

Annexe 13 : Corrélations en fonction des profondeurs pour les sols de plateau et de versant

Corrélations des horizons de surface

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	0,909 0,000								
Pb tot	0,919 0,000	0,808 0,005							
Cd tot	0,953 0,000	0,944 0,000	0,936 0,000						
Zn tot	-0,247 0,492	-0,319 0,369	-0,190 0,600	-0,313 0,379					
Al tot	-0,294 0,410	-0,333 0,348	-0,309 0,384	-0,334 0,345	0,777 0,008				
Fe tot	-0,340 0,337	-0,432 0,213	-0,340 0,336	-0,421 0,225	0,894 0,000	0,860 0,001			
pH Eau	0,367 0,297	0,694 0,026	0,273 0,445	0,551 0,099	-0,245 0,495	-0,184 0,610	-0,295 0,408		
pH KCl	0,483 0,157	0,744 0,014	0,307 0,389	0,576 0,081	-0,188 0,603	-0,247 0,491	-0,274 0,444	0,917 0,000	
A%	-0,866 0,134	-0,879 0,121	-0,844 0,156	-0,844 0,156	-0,088 0,912	-0,095 0,905	-0,015 0,985	-0,900 0,100	-0,998 0,002
C%	0,609 0,062	0,589 0,073	0,723 0,018	0,644 0,044	0,034 0,926	-0,043 0,905	-0,121 0,739	0,231 0,522	0,193 0,593
Cec	-0,155 0,691	0,001 0,999	0,036 0,927	0,131 0,737	-0,059 0,880	0,353 0,351	0,013 0,973	0,330 0,386	-0,001 0,998

Corrélations des horizons en profondeur

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	-0,127 0,745								
Pb tot	0,154 0,692	0,177 0,648							
Cd tot	-0,358 0,345	0,858 0,003	0,157 0,687						
Zn tot	-0,212 0,585	-0,286 0,455	-0,263 0,494	-0,327 0,391					
Al tot	-0,351 0,354	-0,167 0,667	-0,453 0,221	-0,308 0,421	0,404 0,281				
Fe tot	-0,373 0,323	0,348 0,358	-0,129 0,740	0,204 0,598	0,711 0,032	0,189 0,626			
pH Eau	-0,471 0,201	-0,011 0,978	-0,180 0,643	0,315 0,409	0,232 0,547	0,211 0,586	0,222 0,566		
pH KCl	-0,353 0,351	-0,096 0,806	-0,163 0,675	0,186 0,633	-0,160 0,681	0,064 0,870	-0,058 0,883	0,817 0,007	
A%	0,325 0,675	-0,395 0,605	-0,804 0,196	-0,588 0,412	0,211 0,789	0,978 0,022	-0,224 0,776	-0,005 0,995	-0,116 0,884
C%	-0,475 0,341	0,100 0,850	0,124 0,815	-0,108 0,839	0,558 0,250	0,583 0,225	0,750 0,086	0,120 0,821	-0,324 0,531
Cec	-0,223 0,565	-0,545 0,129	-0,289 0,451	-0,157 0,688	0,391 0,298	0,101 0,795	-0,180 0,643	0,388 0,302	0,084 0,831

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Annexe 14 : Corrélations pour chaque type de sol de plateau et de versant

Corrélations des Alisols Rhodiques

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	0,863 0,027								
Pb tot	0,968 0,002	0,753 0,084							
Cd tot	0,477 0,339	0,463 0,355	0,447 0,374						
Zn tot	0,905 0,013	0,894 0,016	0,868 0,025	0,198 0,706					
Al tot	-0,096 0,857	-0,023 0,966	-0,047 0,929	0,781 0,067	-0,289 0,578				
Fe tot	0,366 0,475	0,478 0,337	0,154 0,771	-0,154 0,770	0,400 0,432	-0,630 0,180			
pH Eau	-0,608 0,200	-0,704 0,118	-0,546 0,262	0,210 0,690	-0,774 0,071	0,545 0,263	-0,538 0,271		
pH KCl	-0,324 0,531	-0,641 0,170	-0,189 0,721	-0,346 0,502	-0,320 0,537	-0,192 0,716	-0,353 0,493	0,572 0,236	
A%	0,839 0,366	0,863 0,337	0,875 0,322	0,987 0,104	-0,985 0,110	0,840 0,365	-0,351 0,772	1,000 0,000	-0,352 0,771
C%	0,592 0,216	0,235 0,654	0,737 0,095	0,597 0,211	0,369 0,471	0,394 0,440	-0,438 0,385	0,112 0,833	0,249 0,635
CEC	0,836 0,038	0,758 0,081	0,722 0,105	0,216 0,682	0,820 0,046	-0,415 0,413	0,708 0,116	-0,527 0,282	-0,126 0,813

Corrélations des Alisols ferri endo-squelettiques

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	0,226 0,626								
Pb tot	0,821 0,024	0,206 0,657							
Cd tot	0,782 0,038	0,195 0,676	0,667 0,102						
Zn tot	0,833 0,020	0,374 0,409	0,843 0,017	0,890 0,007					
Al tot	-0,341 0,454	-0,032 0,945	-0,640 0,122	-0,673 0,098	-0,748 0,053				
Fe tot	-0,755 0,050	0,334 0,464	-0,448 0,313	-0,494 0,260	-0,350 0,441	-0,055 0,907			
pH Eau	0,605 0,279	-0,216 0,728	0,251 0,684	0,854 0,065	0,686 0,201	-0,563 0,323	-0,742 0,151		
pH KCl	0,500 0,391	-0,286 0,641	0,121 0,847	0,812 0,095	0,616 0,269	-0,515 0,375	-0,693 0,194	0,957 0,011	
A%	-0,830 0,082	0,284 0,643	-0,905 0,034	-0,814 0,093	-0,942 0,017	0,920 0,027	0,840 0,075	-0,531 0,358	-0,469 0,426
C%	0,850 0,032	0,219 0,676	0,999 0,000	0,995 0,000	0,921 0,009	-0,625 0,185	-0,446 0,376	0,316 0,684	-0,181 0,819
CEC	-0,093 0,843	0,929 0,002	-0,131 0,780	0,030 0,950	0,118 0,802	0,082 0,861	0,547 0,204	-0,241 0,696	-0,241 0,697

Correlations des Alisols ferri épi-squelettiques

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	0,993 0,075								
Pb tot	0,996 0,060	1,000 0,015							
Cd tot	0,967 0,163	0,990 0,088	0,987 0,103						
Zn tot	0,969 0,159	0,991 0,084	0,988 0,099	1,000 0,005					
Al tot	0,825 0,382	0,753 0,457	0,768 0,442	0,655 0,546	0,660 0,541				
Fe tot	0,924 0,250	0,872 0,325	0,884 0,310	0,796 0,414	0,801 0,409	0,979 0,132			
pH Eau	-0,890 0,302	-0,830 0,377	-0,843 0,362	-0,745 0,465	-0,750 0,460	-0,992 0,080	-0,997 0,051		
pH KCl	-0,877 0,319	-0,927 0,244	-0,918 0,259	-0,970 0,156	-0,968 0,160	-0,452 0,701	-0,626 0,570	0,561 0,621	
A%	0,862 0,339	0,916 0,264	0,906 0,279	0,962 0,175	0,960 0,180	0,425 0,721	0,602 0,589	-0,535 0,640	-1,000 0,019
CEC	0,930 0,240	0,880 0,315	0,891 0,300	0,806 0,403	0,810 0,399	0,975 0,142	1,000 0,010	-0,995 0,062	-0,638 0,559
CEC	A% 0,615 0,579								

Correlations des Gleysols

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	1,000 0,002								
Pb tot	0,818 0,390	0,819 0,389							
Cd tot	0,020 0,987	0,018 0,989	-0,559 0,623						
Zn tot	0,965 0,170	0,965 0,168	0,941 0,220	-0,244 0,843					
Al tot	0,957 0,188	0,957 0,187	0,950 0,202	-0,272 0,825	1,000 0,018				
Fe tot	0,855 0,347	0,856 0,345	0,998 0,043	-0,501 0,666	0,962 0,177	0,969 0,159			
pH Eau	0,300 0,806	0,297 0,808	-0,304 0,804	0,960 0,181	0,038 0,976	0,009 0,994	-0,238 0,847		
pH KCl	0,348 0,773	0,346 0,775	-0,254 0,836	0,944 0,214	0,089 0,943	0,060 0,962	-0,188 0,880	0,999 0,033	
A%	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 *	1,000 *
C%	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *
CEC	0,968 0,161	0,969 0,159	0,936 0,230	-0,230 0,852	1,000 0,009	0,999 0,028	0,957 0,186	0,052 0,967	0,104 0,934
C%	A% * *	C% *							
CEC	-1,000 *	1,000 *							

Annexe 15 : Fiches récapitulatives des Fluvisols Umbriques

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 1 Date : 27/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : au bas du versant Série de sol : Série de Lubumbashi (D6) Occupation : Terrains humides Végétation : Herbacée (<i>Typha</i> , <i>Phragmites tiphaniapa</i> , <i>Setaria palidifusca</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66934° S Longitude : 27,44493° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A1	0 – 6	0 – 8	1	2	1	AS	5 YR	4	6	1	-	-	3	CV	6
A2	6 – 33	6 – 33	2	2	1	AS	5 YR	5	8	1	-	-	1	-	6
Ah	33 – 76	50 – 76	1	1	1	A	10 YR	5	3	1	-	-	1	-	6
Bw1	76 – 97	76 – 97	1	1	1	AS	10 YR	6	4	1	-	-	1	-	5
Bw2	97 – 21	97 – 121	1	1	1	AS	10 YR	6	6	1	-	-	1	-	6

CV : colluvion

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 2 Date : 27/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : bas de versant Série de sol : Série de Lubumbashi (D6) Occupation : terrains humides Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Haumaniastrum Katangense</i> , <i>Phragmites tiphaniapa</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66895° S Longitude : 27,44760° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Ah	0 – 18	0 – 18	1	1	1	AS	7,5 YR	3	4	1	-	-	1	-	5
AB	18 – 45	18 – 34	1	1	1	A	5 YR	5	6	1	-	-	1	-	5
Bw1	45 – 78	45 – 66	1	1	1	A	5 YR	5	8	2	2	3	1	-	4
Bw2	78 – 119	95 – 119	2	1	1	A	5 YR	5	8	3	2	3	1	-	4

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 3 Date : 27/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : bas de versant Série de sol : Série de Lubumbashi (D6) Occupation : Terrains humides Végétation : Herbacée (<i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Rendlia altera</i> , <i>Imperata cylindrica</i> , <i>Phragmites tiphaniapa</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66761° S Longitude : 27,45092° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des échantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 – 18	0 – 18	1	1	1	AL	5 YR	5	4	1	-	-	1	-	5
AB	18 – 55	35 – 47	2	1	1	A	5 YR	5	6	1	-	-	1	-	5
Bw	55 – 116	55 – 70, 95 – 116	2	1	1	A	5 YR	5	8	3	2	3	3	CV	5

CV : colluvion

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 4 Date : 27/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : bas de versant Série de sol : Série de Lubumbashi (D6) Occupation : terrains humides (tout près de briqueterie) Végétation : Herbacée (<i>Setaria palidefusca</i> , <i>Rendlia altera</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i> , <i>Julbernardia paniculata</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66738° S Longitude : 27,45427° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Bw1	0 – 39	0 – 17	1	2	2	AS	5 YR	4	6	1	-	-	1	-	4
A	39 – 66	47 – 66	2	2	2	AL	7,5 YR	4	6	1	-	-	1	-	4
Bw2	66 – 97	78 – 97	2	1	2	A	7,5 YR	5	6	1	-	-	1	-	5
Bw3	97 – 120	97 – 120	2	1	2	A	7,5 YR	5	8	1	-	-	1	-	5

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 5 Date : 27/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : Rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : bas du versant Série de sol : Série de Lubumbashi (D6) Occupation : terrains humides Végétation : herbacée (<i>Setaria palidefusca</i> , <i>Atifa</i> , <i>Celosia</i> , <i>Altraxion</i> , <i>Haumaniastrum katangense</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66660° S Longitude : 27,45801° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A1	0 – 18	0 – 18	1	1	2	A	7,5 YR	4	6	1	-	-	1	-	6
Ah2	18 – 32	18 – 32	1	1	2	AS	7,5 YR	3	3	1	-	-	1	-	6
B1	32 – 50	32 – 50	1	1	2	AS	7,5 YR	3	4	1	-	-	1	-	5
B2	50 – 59	50 – 69	1	1	2	AS	7,5 YR	2	3	1	-	-	1	-	5
Bw3	69 – 122	93 – 108	1	1	2	AS	7,5 YR	5	6	1	-	-	1	-	5

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 6 Date : 27/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : bas de versant Série de sol : Série de Lubumbashi (D6) Occupation : Terrains humides (assainissement par fossé mal entretenu) Végétation : Herbacée (<i>Phragmites typhaniepa</i> , <i>Setaria palidefusca</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66869° S Longitude : 27,46056° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
B1	0 – 28	0 – 18	2	2	1	AS	5 YR	5	4	1	-	-	2	CV	4
Bw2	28 – 53	32 – 53	2	1	1	AS	7,5 YR	5	8	1	-	-	1	-	5
Bw3	53 – 70	63 – 70	2	1	1	AS	7,5 YR	3	2	1	-	-	1	-	6

CV : colluvion

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 7 Date : 27/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : profil au centre de la cuvette Série de sol : Série de Lubumbashi (D6) Occupation : Terrains humides (forte érosion) Végétation : Sol nu (beaucoup de déchets)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67116° S Longitude : 27,46366° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Bw1	0 – 28	0 – 15	2	2	2	AS	7,5 YR	4	6	1			4	CV	5
Bw2	28 – 42	28 – 42	1	1	2	AS	7,5 YR	3	4	1			2	CV	7
Bws1	42 – 61	42 – 61	3	2	2	AS	5 YR	4	8	3	2	2	4	CV	7
Bws2	61 – 79	61 – 79	3	1	1	AS	5 YR	4	6	2	3	2	4	CV	8
Bws3	79 – 92	79 – 92	3	1	1	AS	5 YR	2	2	1			4	CV	8

CV : colluvion

Annexe 16 : Fiches récapitulatives des Gleysols

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 8 Date : 29/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : affluent de la rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : profil à mi-hauteur de la cuvette Série de sol : Série Mutwale (D5) Occupation : Terrains humides Végétation : Herbacée (<i>Setaria palidifusca</i> , <i>Imperata cylindrica</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,66387° S Longitude : 27,43336° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Ah	0 – 18	0 – 18	2	1	1	A	10 Y	2	1	1	-	-	1	-	6
AB	18 – 29	18 – 29	1	1	1	ALO	10 Y	2	1	2	2	1	1	-	7
Bg1	29 – 65	39 – 51	3	1	1	ALO	10 Y	3	1	3	2	1	1	-	7
Bg2	65 - 110	65 – 75, 99 – 110	3	1	1	ALO	10 Y	4	1	4	1	1	1	-	6

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 9 Date : 29/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : affluent de la rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : profil à mi-hauteur de la cuvette Série de sol : Série Mutwale (D5) Occupation : Terrains humides (assainissement par des fossés mal entretenus) Végétation : Herbacée (<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67349° S Longitude : 27,43461° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
Ah	0 – 8	0 – 8	2	2	1	A	10 Y	2	1	2	2	1	1	-	6
AB	8 – 13	8 – 13	3	1	1	A	7,5 Y	3	1	2	2	1	1	-	5
Bg1	13 – 31	13 – 22	3	1	3	ALO	10 Y	3	1	3	2	1	1	-	5
Bg2	31 – 48	31 – 39	3	1	3	ALO	10 Y	5	1	3	2	1	1	-	5
Bg3	48 – 104	48 – 58, 93 – 104	3	1	3	ALO	10 Y	5	1	4	1	1	1	-	5

Sondage du transect le long de la rivière Karavia															
Référence : GECAS 10 Date : 29/02/2008			Commune : Lubumbashi Lieu dit : affluent de la rivière Karavia				Lithologie : Kundelungu supérieur Géomorphologie : près du bord d'un profil en cuvette Série de sol : Série Mutwale (D5) Occupation : Terrains humides (assainissement par des fossés mal entretenus) Végétation : Herbacée (<i>Haumaniastrum katangense</i> , <i>Crepidoropalon tennui</i> , <i>Bulbostylis pseudoperennis</i>)								
Carte géologique : oui Carte pédologique : oui			Latitude : 11,67365° S Longitude : 27,43576° EO												
Horizon	Profondeur	Profondeur des Echantillons	Résistance	Comportement	Humidité	Texture	Couleur			Tâches			Charge		pH
							Hue	V	C	A	Nt	Na	A	Nature	
A	0 – 3	0 – 3	2	2	2	A	5 Y	4	2	1	-	-	1	-	5
Bg	3 – 19	19 – 33	2	1	2	ALO	5 Y	4	1	2	2	1	1	-	4
Bg	19 – 68	48 – 68	3	1	2	ALO	7,5 Y	4	1	3	2	1	1	-	4
Bgs	68 - 103	87 – 103	3	1	2	ALO	10 Y	6	1	4	2	2	3	SE	5

Annexe 17 : Corrélation en fonction des profondeurs pour les sols de fond de vallée

Correlations des horizons de surface

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	A%	Al tot	Fe tot	pH Eau
Co tot	0,292 0,634								
Pb tot	0,998 0,000	0,347 0,568							
Cd tot	0,050 0,937	0,270 0,661	0,087 0,890						
Zn tot	-0,245 0,692	0,755 0,140	-0,188 0,762	0,095 0,880					
A%	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *				
Al tot	-0,204 0,742	0,095 0,879	-0,191 0,758	-0,526 0,362	0,589 0,296	-1,000 *			
Fe tot	0,010 0,988	0,836 0,077	0,061 0,923	-0,070 0,911	0,949 0,014	-1,000 *	0,612 0,273		
pH Eau	0,260 0,673	0,929 0,022	0,311 0,611	0,494 0,398	0,562 0,324	1,000 *	-0,263 0,670	0,600 0,285	
pH KCl	-0,066 0,917	0,576 0,309	-0,021 0,973	-0,117 0,851	0,896 0,040	1,000 *	0,841 0,074	0,905 0,034	0,270 0,660
C	0,381 0,527	-0,234 0,705	0,375 0,534	0,731 0,161	-0,572 0,314	1,000 *	-0,731 0,161	-0,628 0,257	0,026 0,967
CEC	-0,059 0,924	-0,189 0,761	-0,046 0,941	0,892 0,042	-0,239 0,699	1,000 *	-0,536 0,352	-0,441 0,457	0,054 0,931

Corrélations des horizons en profondeur

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	A%	Al tot	Fe tot	pH Eau
Co tot	0,983 0,003								
Pb tot	0,969 0,007	0,998 0,000							
Cd tot	0,971 0,006	0,921 0,026	0,893 0,042						
Zn tot	-0,199 0,749	-0,362 0,550	-0,422 0,479	0,030 0,962					
A%	-0,662 0,540	-0,652 0,548	-0,646 0,553	-0,765 0,445	-0,326 0,789				
Al tot	-0,394 0,511	-0,383 0,524	-0,366 0,545	-0,451 0,446	-0,044 0,944	0,302 0,805			
Fe tot	0,648 0,237	0,665 0,221	0,673 0,213	0,505 0,386	-0,477 0,417	-0,222 0,858	0,293 0,633		
pH Eau	-1,000 *	1,000 *	1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	* *	1,000 *	1,000 *	
pH KCl	1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 *	1,000 *	* *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *
C	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 *	* *	1,000 *	-1,000 *	* *
CEC	-0,666 0,220	-0,617 0,268	-0,591 0,294	-0,774 0,124	-0,290 0,636	1,000 0,010	0,264 0,668	-0,078 0,901	1,000 *

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

* NOTE * Not enough data in column.

Annexe 18 : Corrélations pour chaque type de sol de fond de vallée

Corrélations des Gleysols de la toposéquence sur les sédiments

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	A%	Al tot	Fe tot	pH Eau
Co tot	0,739 0,058								
Pb tot	0,999 0,000	0,741 0,057							
Cd tot	0,300 0,513	0,842 0,017	0,293 0,523						
Zn tot	-0,117 0,803	0,514 0,238	-0,101 0,830	0,724 0,066					
A%	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *				
Al tot	-0,344 0,450	-0,430 0,336	-0,322 0,482	-0,381 0,400	-0,083 0,859	1,000 *			
Fe tot	-0,444 0,318	-0,468 0,289	-0,407 0,365	-0,424 0,343	-0,045 0,924	1,000 *	0,842 0,018		
pH Eau	0,294 0,631	0,592 0,293	0,299 0,625	0,502 0,389	0,673 0,214	* *	-0,714 0,175	-0,575 0,310	
pH KCl	-0,154 0,804	-0,496 0,396	-0,150 0,810	-0,502 0,389	-0,625 0,260	* *	0,834 0,079	0,729 0,162	-0,954 0,012
C	0,429 0,471	0,941 0,017	0,451 0,446	0,845 0,071	0,773 0,126	* *	-0,772 0,126	0,339 0,577	0,666 0,334
CEC	-0,294 0,522	0,354 0,436	-0,271 0,557	0,594 0,159	0,873 0,010	-1,000 *	-0,147 0,754	0,116 0,805	0,637 0,248

Corrélations des Fluvisols de la toposéquence sur les sédiments

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	A%	Al tot	Fe tot	pH Eau
Co tot	0,868 0,002								
Pb tot	0,933 0,000	0,974 0,000							
Cd tot	0,975 0,000	0,861 0,003	0,903 0,001						
Zn tot	-0,080 0,837	-0,016 0,967	-0,061 0,876	-0,062 0,873					
A%	-0,447 0,553	-0,215 0,785	-0,262 0,738	-0,274 0,726	0,663 0,337				
Al tot	-0,271 0,480	-0,340 0,371	-0,387 0,303	-0,203 0,600	0,541 0,132	0,937 0,063			
Fe tot	0,778 0,014	0,870 0,002	0,829 0,006	0,819 0,007	0,101 0,797	-0,115 0,885	0,103 0,792		
pH Eau	0,929 0,007	0,733 0,098	0,773 0,072	0,922 0,009	-0,030 0,955	-1,000 *	-0,100 0,850	0,805 0,054	
pH KCl	0,702 0,120	0,522 0,288	0,618 0,191	0,699 0,122	0,319 0,537	1,000 *	0,550 0,258	0,866 0,026	0,575 0,233
C	-0,151 0,720	-0,524 0,183	-0,440 0,275	-0,096 0,820	-0,239 0,568	-0,139 0,911	-0,045 0,915	-0,598 0,117	0,603 0,282
CEC	-0,503 0,204	-0,572 0,138	-0,629 0,095	-0,393 0,336	0,323 0,435	0,897 0,103	0,876 0,004	-0,194 0,645	-0,221 0,721

Annexe 19 : Corrélations pour chaque type de sol non ou peu contaminé

Corrélations des Alisols Rhodiques

Co tot	Cu tot 0,863 0,027	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Pb tot	0,968 0,002	0,753 0,084							
Cd tot	0,477 0,339	0,463 0,355	0,447 0,374						
Zn tot	0,905 0,013	0,894 0,016	0,868 0,025	0,198 0,706					
Al tot	-0,096 0,857	-0,023 0,966	-0,047 0,929	0,781 0,067	-0,289 0,578				
Fe tot	0,366 0,475	0,478 0,337	0,154 0,771	-0,154 0,770	0,400 0,432	-0,630 0,180			
pH Eau	-0,608 0,200	-0,704 0,118	-0,546 0,262	0,210 0,690	-0,774 0,071	0,545 0,263	-0,538 0,271		
pH KCl	-0,324 0,531	-0,641 0,170	-0,189 0,721	-0,346 0,502	-0,320 0,537	-0,192 0,716	-0,353 0,493	0,572 0,236	
A%	0,839 0,366	0,863 0,337	0,875 0,322	0,987 0,104	-0,985 0,110	0,840 0,365	-0,351 0,772	1,000 0,000	-0,352 0,771
C%	0,592 0,216	0,235 0,654	0,737 0,095	0,597 0,211	0,369 0,471	0,394 0,440	-0,438 0,385	0,112 0,833	0,249 0,635
CEC	0,836 0,038	0,758 0,081	0,722 0,105	0,216 0,682	0,820 0,046	-0,415 0,413	0,708 0,116	-0,527 0,282	-0,126 0,813
C%	A% 0,872 0,326	C% 0,257 0,622							

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Corrélations des Alisols ferri endo-squelettiques

Co tot	Cu tot 0,226 0,626	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Pb tot	0,821 0,024	0,206 0,657							
Cd tot	0,782 0,038	0,195 0,676	0,667 0,102						
Zn tot	0,833 0,020	0,374 0,409	0,843 0,017	0,890 0,007					
Al tot	-0,341 0,454	-0,032 0,945	-0,640 0,122	-0,673 0,098	-0,748 0,053				
Fe tot	-0,755 0,050	0,334 0,464	-0,448 0,313	-0,494 0,260	-0,350 0,441	-0,055 0,907			
pH Eau	0,605 0,279	-0,216 0,728	0,251 0,684	0,854 0,065	0,686 0,201	-0,563 0,323	-0,742 0,151		
pH KCl	0,500 0,391	-0,286 0,641	0,121 0,847	0,812 0,095	0,616 0,269	-0,515 0,375	-0,693 0,194	0,957 0,011	
A%	-0,830 0,082	0,284 0,643	-0,905 0,034	-0,814 0,093	-0,942 0,017	0,920 0,027	0,840 0,075	-0,531 0,358	-0,469 0,426
C%	0,850 0,032	0,219 0,676	0,999 0,000	0,995 0,000	0,921 0,009	-0,625 0,185	-0,446 0,376	0,316 0,684	-0,181 0,819
CEC	-0,093 0,843	0,929 0,002	-0,131 0,780	0,030 0,950	0,118 0,802	0,082 0,861	0,547 0,204	-0,241 0,696	-0,241 0,697

Correlations des Alisols ferri épi-squelettiques

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	0,993 0,075								
Pb tot	0,996 0,060	1,000 0,015							
Cd tot	0,967 0,163	0,990 0,088	0,987 0,103						
Zn tot	0,969 0,159	0,991 0,084	0,988 0,099	1,000 0,005					
Al tot	0,825 0,382	0,753 0,457	0,768 0,442	0,655 0,546	0,660 0,541				
Fe tot	0,924 0,250	0,872 0,325	0,884 0,310	0,796 0,414	0,801 0,409	0,979 0,132			
pH Eau	-0,890 0,302	-0,830 0,377	-0,843 0,362	-0,745 0,465	-0,750 0,460	-0,992 0,080	-0,997 0,051		
pH KCl	-0,877 0,319	-0,927 0,244	-0,918 0,259	-0,970 0,156	-0,968 0,160	-0,452 0,701	-0,626 0,570	0,561 0,621	
A%	0,862 0,339	0,916 0,264	0,906 0,279	0,962 0,175	0,960 0,180	0,425 0,721	0,602 0,589	-0,535 0,640	-1,000 0,019
CEC	0,930 0,240	0,880 0,315	0,891 0,300	0,806 0,403	0,810 0,399	0,975 0,142	1,000 0,010	-0,995 0,062	-0,638 0,559
CEC	A% 0,615 0,579								

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

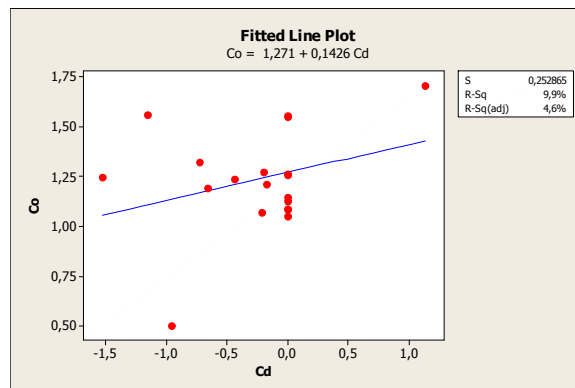
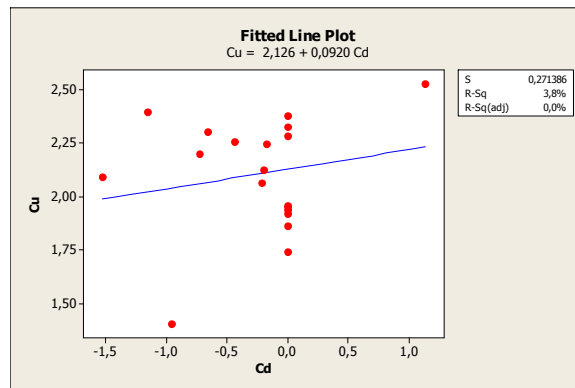
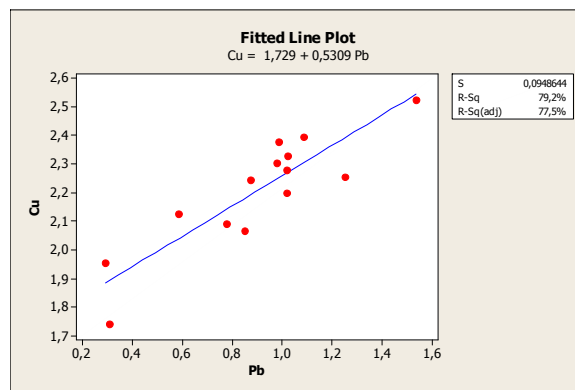
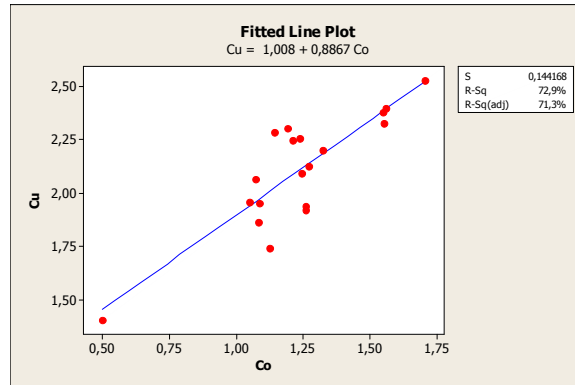
Correlations des Gleysols

	Cu tot	Co tot	Pb tot	Cd tot	Zn tot	Al tot	Fe tot	pH Eau	pH KCl
Co tot	1,000 0,002								
Pb tot	0,818 0,390	0,819 0,389							
Cd tot	0,020 0,987	0,018 0,989	-0,559 0,623						
Zn tot	0,965 0,170	0,965 0,168	0,941 0,220	-0,244 0,843					
Al tot	0,957 0,188	0,957 0,187	0,950 0,202	-0,272 0,825	1,000 0,018				
Fe tot	0,855 0,347	0,856 0,345	0,998 0,043	-0,501 0,666	0,962 0,177	0,969 0,159			
pH Eau	0,300 0,806	0,297 0,808	-0,304 0,804	0,960 0,181	0,038 0,976	0,009 0,994	-0,238 0,847		
pH KCl	0,348 0,773	0,346 0,775	-0,254 0,836	0,944 0,214	0,089 0,943	0,060 0,962	-0,188 0,880	0,999 0,033	
A%	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 *	1,000 *
C%	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *	1,000 *
CEC	0,968 0,161	0,969 0,159	0,936 0,230	-0,230 0,852	1,000 0,009	0,999 0,028	0,957 0,186	0,052 0,967	0,104 0,934

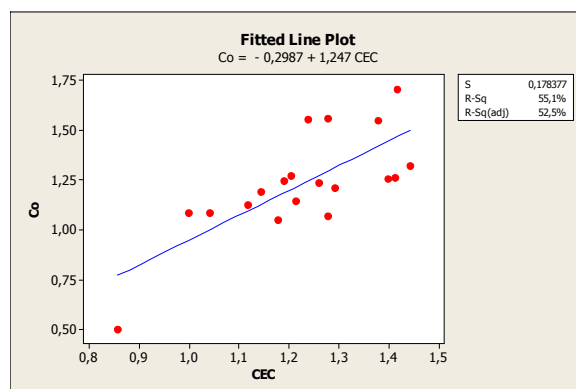
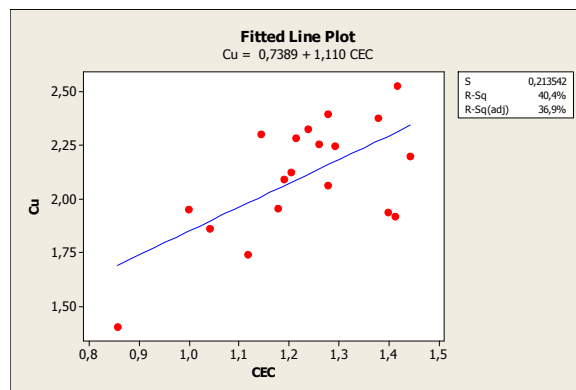
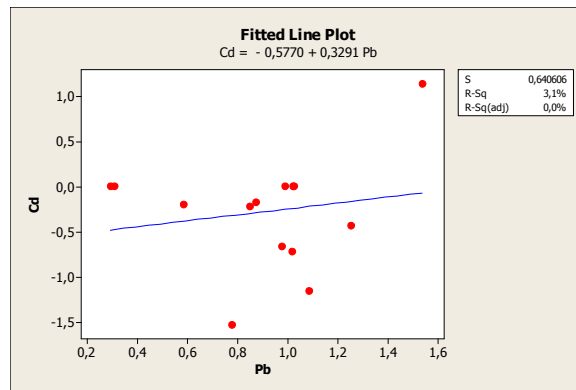
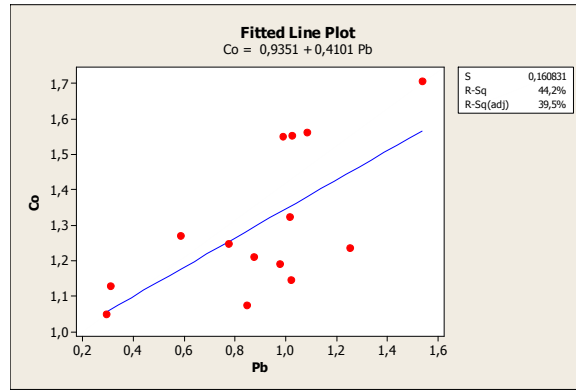
Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

* NOTE * Not enough data in column.

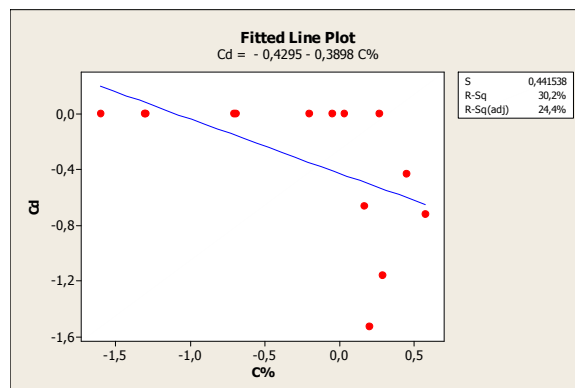
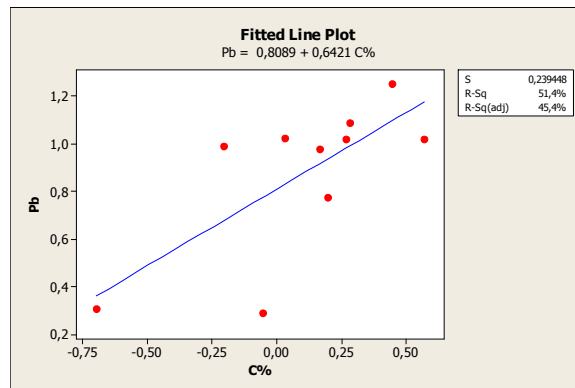
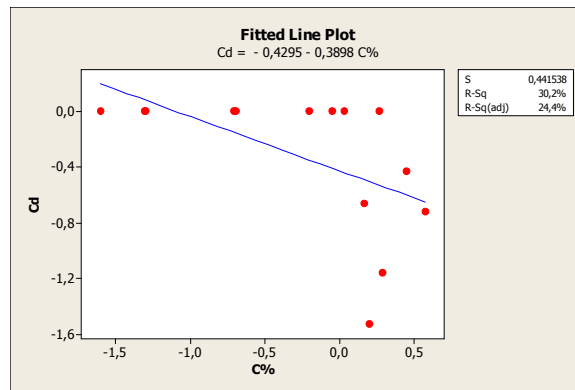
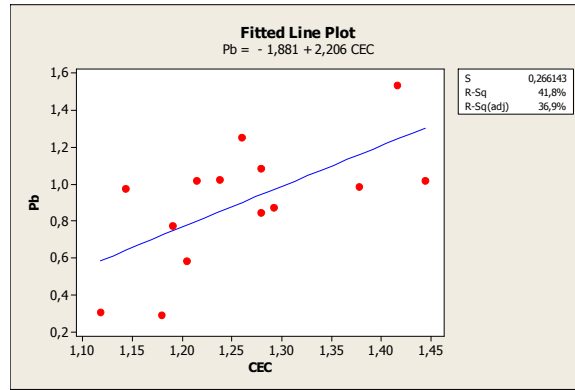
Annexe 20 : Régression entre les différents éléments analysés pour les sites « naturels »



Sites non ou peu contaminés



Sites non ou peu contaminés



Annexe 21 : Nuages de point et relations entre éléments des sites contaminés

