

## Impact des émissions atmosphériques (SO<sub>2</sub>) rejetées par la cheminée de l'usine pyro-métallurgique de la Gécamines sur les sols à Lubumbashi: Cas du quartier Penga-Penga (Lubumbashi, Haut-Katanga / RD Congo)

### [ Impact of atmospheric emissions (SO<sub>2</sub>) from the chimney of the pyrometallurgical plant Gécamines on the soil in Lubumbashi: Case of quarter Penga-Penga (Lubumbashi, Haut-Katanga / DR Congo) ]

*Serge Kashimbo Kalala*

Chef des travaux à l'Unité de Gestion des ressources naturelles, Faculté des sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, RD Congo

---

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Metal contamination of soils, following local atmospheric deposition (industrial and urban) and to different inputs (compost, manure ...) or former explains in particular the presence in surface horizons, current levels ETM such as Cd, Cu, Zn and Pb. However, despite the obvious effect of accumulation, transfer of metal to the depth is also noted, usually deducted from total contents comparisons metals in different soil horizons. Among the cited metallic elements, some are essential trace elements such as zinc (Zn) and copper (Cu), but become toxic at high concentrations. Others such as lead (Pb) and cadmium (Cd) are toxic when trace. Their accumulation and transfer in the soil on the site of Penga Penga-therefore a risk to human health through contamination of the food chain but also for the environment as a whole.

**KEYWORDS:** Gécamines Plant, Pyrometallurgy, Chimney, Fumes, Emissions, Atmospheric, Soil, TME.

**RÉSUMÉ:** La contamination métallique des sols, suite aux retombées atmosphériques locales (industrielles et urbaines) et à des apports divers (composts, engrais...) anciens ou actuels, explique notamment la présence dans les horizons de surface, les teneurs actuelles en ETM tels que Cd, Cu, Zn et Pb. Cependant, malgré un effet d'accumulation évident, le transfert de métaux vers la profondeur est également noté, le plus souvent déduit à partir de comparaisons des teneurs totales en métaux dans les différents horizons d'un sol. Parmi les éléments métalliques cités, certains sont des oligo-éléments essentiels comme le zinc (Zn) et le cuivre (Cu), mais deviennent toxiques à fortes concentrations. D'autres comme le plomb (Pb) ou le cadmium (Cd) sont toxiques dès l'état de trace. Leur accumulation et leur transfert dans le sol, sur le site de Penga-Penga constituent donc un risque pour la santé humaine via la contamination de la chaîne alimentaire, mais aussi pour le milieu naturel dans son ensemble.

**MOTS-CLEFS:** Usine Gécamines, Pyrometallurgie, Cheminée, Fumées, émissions, atmosphérique, sol, ETM.

## 1 INTRODUCTION

La cheminée de la Gécamines mesurant 152 m de haut, située au centre de Lubumbashi, a produit des émissions contenant des poussières, des métaux et des hydrocarbures aromatiques polycycliques [1]. Cette fumée est retombée sous forme de dépôts éoliens sur les sols situés, pour la grande partie dans le quartier Gécamines et sa suite, quartier Penga-Penga, Plateau Karavia etc. Une partie de la ville a été fortement contaminée par ces dépôts. Ces quartiers fortement

contaminés se situent dans le cône de pollution sous l'action des vents dominants soufflant du Sud Est vers le Sud Ouest [2] (Figure 1).



**Figure 1 : cheminée des usines en pleine activité sur le site de la Gécamines**

La cheminée des fonderies électriques de cuivre émet dans l'atmosphère des grandes quantités de  $\text{SO}_2$  (issu de l'oxydation des sulfures) ainsi que des poussières métallifères chargées en cuivre et en autres métaux lourds. Celui-ci s'élimine ensuite par gravité, dépôt à sec, précipitation et lessivage et s'accumule principalement dans les horizons de surface des sols environnants [3,4]

Dans le district du Haut Katanga, on a recensé une dizaine de types de perturbations engendrées par l'exploitation minière dans l'hinterland minier du Katanga notamment les sites métallurgiques précoloniaux, les tranchées de prospection, les mines à ciel ouvert, les déblais des stériles, les ballast des voies ferrées, les bassins de décantation, les accotements des routes chargés avec des minerais, les sites de lavages des roches excavés, les émissions des poussières et de gaz acidifiants par les usines de grillage des minerais [5]. Concernant ce dernier aspect, les cheminées des fonderies électriques de cuivre émettent dans l'atmosphère des grandes quantités de  $\text{SO}_2$  (issu de l'oxydation des sulfures) ainsi que des poussières métallifères chargées en cuivre et en autres métaux lourds. Celui-ci s'élimine ensuite par gravité, dépôt à sec, précipitation et lessivage et s'accumule principalement dans les horizons de surface des sols environnants [3,4]

Dans la région de Lubumbashi, il a été démontré que les émissions de  $\text{SO}_2$  par la cheminée du four de l'usine d'extraction et de transformation du cuivre de la Gécamines étaient responsables de pluies acides [6] néfastes pour les êtres vivants et les végétaux en particulier et ont contribué à l'accumulation des éléments traces métalliques dans les sols. De plus, il a été constaté que le secteur situé sous les vents alizés du Sud-Est présente des sols enrichis en cuivre et autres métaux lourds à cause des retombées des poussières métallifères émanant de l'usine depuis plus d'un demi-siècle. Les retombées de composés acidifiants et de poussières métalliques ont entraîné le remplacement de la forêt claire originelle par une steppe courte au sein de laquelle on retrouve beaucoup d'espèces de la flore cupricole [7] et de grandes surfaces de sol dénudé sont également observées.

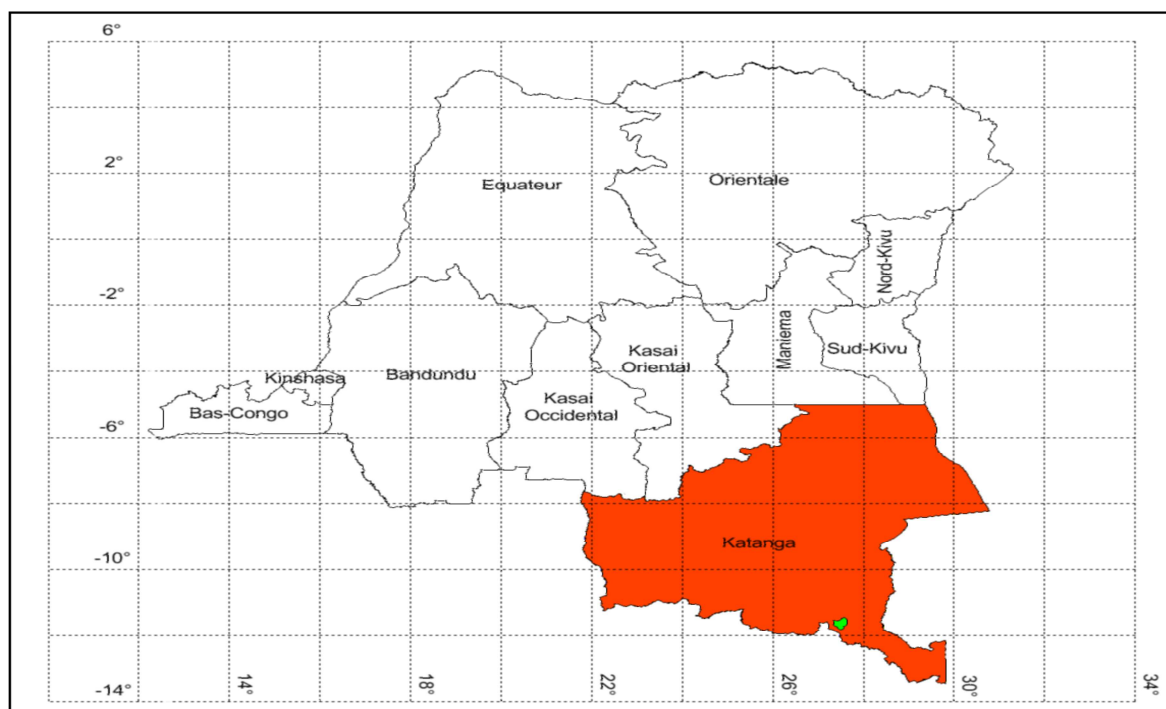
L'objectif de la présente étude est de déterminer les niveaux de contamination des sols par les éléments traces métalliques (ETM) en occurrence le cuivre ainsi que la dynamique de redistribution de ce polluant potentiel dans les paysages, ceci pour expliquer le comportement des contaminants, les mécanismes ainsi que les propriétés de leurs dispersions afin de proposer des solutions adéquates pour la réhabilitation des sites.

## **2 CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE**

### **2.1 SITUATION GÉOGRAPHIQUE**

La ville de Lubumbashi est située dans la province du Katanga entre les parallèles  $-11^{\circ}30'$  et  $-11^{\circ}50'$  et les méridiens  $27^{\circ}17'$  et  $27^{\circ}40'$ . Elle est située dans une vaste dépression limitée au Nord-est par l'anticlinal de l'Etoile (1275m d'altitude) et

au Sud-ouest par l'anticlinal de Kisanga (1346m d'altitude). Lubumbashi est réputée pour ses 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, due aux rejets de poussière de cuivre et autres métaux (cobalt, zinc, cadmium) venant des exploitations minières de la ville [8].



*Figure 2: Carte montrant la localisation du secteur d'étude*

## 2.2 MÉTHODOLOGIE DE TERRAIN

Sur base de la carte pédologique (1/60000), il a été établi la diversité des sols retrouvés au sein de la zone d'étude ainsi que les toposéquences à effectuer sur le terrain. La première étant la toposéquence partant de la cheminée de la Gécamines jusqu'au plateau Karavia, c'est cette toposéquence qui fait l'objet d'enquête dans cette étude en général et en particulier la première unité physiographique le plateau au quartier Penga-Penga. Le relief est composé du plateau de la Gécamines, d'un versant, d'un bas-fond terminé par la rivière Karavia. Cette toposéquence fait environ 10 km. La deuxième suit le tracé de la rivière Karavia ainsi que celui de son affluent. Des échantillons de sols ont été prélevés sur le plateau (sondage, profil, mini profil).

## 2.3 MATÉRIEL

Le matériel pris en compte dans cette étude est constitué essentiellement de différentes séries de sol classées selon la classification de la FAO [9]. Il s'agit de sols Zonaux, Azonaux et Intra zonaux qu'on retrouve dans l'aire d'étude. Trois types de sol zonaux sont repris. La série Kaponda (A<sub>2</sub>) 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. La série Baya (A<sub>3</sub>) qui est un sol brun-jaune, bien drainé et la série Musaonga (Ag<sub>3</sub>) qui est aussi un sol brun-jaune avec la 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.

## 2.4 MÉTHODE DE LABORATOIRE

Chaque échantillon récolté sur le terrain a été séché à l'air et émotté en vue d'un tamisage à 2 mm. Chaque échantillon et son refus ont fait l'objet de pesée sur une balance à deux décimales en vue de l'estimation de la charge grossière [10]. Tous

les échantillons ont été conditionnés dans des boîtes hermétiques préservant ainsi leur atmosphère d'un taux d'humidité trop élevé.

## 2.5 ANALYSES RÉALISÉES

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

- pH eau et pH KCl ; Carbone organique total ; Acidité d'échange pour les échantillons ayant un pH eau < 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.

Les échantillons ainsi sélectionnés ont subi les analyses supplémentaires suivantes :

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

**Tableau 1 : Caractéristiques des séries des sols observées sur l'aire d'étude (Plateau Penga-Penga)**

Série de sol	Origine	Situation topographique	Type de sol	Drainage
<b>Sols zonaux</b>				
<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	

## 3 RÉSULTATS

### LES SOLS DE LA SÉRIE KAPONDA

Ces sols sont présents sur le plateau de la Gécamines, ils ont soit un horizon contaminé (C) soit un sol érodé qui dévoile directement l'horizon B. Certaines observations ont un horizon A comme premier horizon mais il faut rappeler que cet horizon est parfois mélangé à l'horizon contaminé. Le pH de ces sols est très acide avec une moyenne égale à 5 et 4,6 respectivement pour le pH eau et le pHKCl. La moyenne du rapport C/N est de 14. La texture de ces sols est argileuse. 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 particulière 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 2).

Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques des sols de la série Kaponda

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Élément échangeable (még/100g ou cmol/kg)						
	pH Eau	pH KCl	▲ pH	Ac. Éch.	C g/100g	N	C/N	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V %
<b>Horizon de Surface</b>																	
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
<b>Horizon en Profondeur</b>																	
Effectif	5	5	5	4	3	2	2	2	2	2	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

Tableau 3: Teneurs totales moyennes des éléments dans les sols de la série Kaponda

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/kg					
<b>Horizon de surface</b>												
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
<b>Horizon en profondeur</b>												
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

Les sols de la série Kaponda sont fortement contaminés par les éléments traces métalliques (ETM). La teneur en Co est quatre fois plus importante que la moyenne obtenue pour des sols « naturels ». La teneur en Cu a une moyenne de 10339 ppm au niveau de l'horizon de surface, ce qui indique une forte contamination par des dépôts atmosphériques. Cela suppose que le Cu est fortement lié à la phase solide du sol car même les sols érodés de la série montrent des teneurs élevées par rapport aux sols non ou peu contaminés. Les teneurs en Pb, en Cd et en Zn sont supérieures à la norme AFNOR [11] respectivement de 100 ppm, 2 ppm et 300 ppm. Les teneurs totales en Fe et en Al sont très élevées avec respectivement 3,7 et 3,5 g/100g, elles augmentent avec la profondeur. Ceci rencontre l'hypothèse indiquant le niveau de dégradation avancé des sols tropicaux riches en Fe et Al [12].

#### LES SOLS DE LA SÉRIE BAYA

Les sols de la série Baya sont les types de sol les plus abondants sur cette aire. 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%. Ils ont un pH moyen plus élevée que ceux de la série Kaponda (5,6 et 4,9 pour le pH eau et pHKCl). La moyenne du rapport C/N est supérieure 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 még/100g, 0,60 még/100g et 0,21 még/100g. Ces teneurs moyennes sont bien plus élevées que pour les précédentes. La capacité d'échange cationique est supérieure à 20 cmol<sup>+</sup>/kg pour l'horizon de surface et 19 cmol<sup>+</sup>/kg pour l'horizon en profondeur. (Tableau 4)

Tableau 4: Paramètres physico-chimiques des sols de la série Baya

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Éléments échangeables (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH <sub>Eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	ΔpH	A.C. Éch.	C g/100g	N	C/N	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V%
<b>Horizon de Surface</b>																	
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
<b>Horizon en Profondeur</b>																	
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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 5: Teneurs totales moyennes des éléments dans les sols de la série Baya

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/kg					
<b>Horizon de surface</b>												
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
<b>Horizon en profondeur</b>												
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

Les teneurs en éléments traces métalliques présentées au tableau 4 ci-dessus sont très élevées mais moins importantes que dans les sols de la série Kaponda. Néanmoins, les moyennes obtenues dépassent largement les normes AFNOR [11] et confirment la contamination du site à grande échelle étant donné que ces sols se trouvent éloignés de l'origine de la contamination. Les coefficients de variations du Cu et du Pb sont plus faibles que pour les précédents. Les autres coefficients de variation des éléments analysés ont le même ordre de grandeur. Les teneurs en Fe et Al sont inférieures à celles des sols de la série Kaponda.

#### SÉRIE MUSAONGA

La profondeur d'apparition de la charge caillouteuse est plus faible que les sols de la série Baya, 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 texture de ces sols est limono-argileuse. Le pH eau et le pH<sub>KCl</sub> sont respectivement de 4,9 et de 4,4. Ce sol est donc plus acide que ceux de la série Baya 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 précédents, elle est de 20 cmol<sup>+</sup>/kg. Ces sols sont légèrement plus riches en Ca et en Mg que ceux de la série Baya. Les coefficients de variation sont élevés pour la majorité des paramètres analysés à l'exception du pH.

Tableau 6: Paramètres physico-chimiques des sols de la série Musaonga

Stat	pH				Carbone Total			Granulométrie			Élément échangeable (méq/100g ou cmol/kg)						
	pH <sub>Eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	▲ pH	Ac. Éch.	C g/100g	N	C/N	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V %
<b>Horizon de Surface</b>																	
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
<b>Horizon en Profondeur</b>																	
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

Tableau 7: Teneurs totales moyennes des éléments dans les sols de la série Musaonga

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/kg					
<b>Horizon de surface</b>												
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
<b>Horizon en profondeur</b>												
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

Les moyennes en Cu, Co sont plus faibles dans ces types de sols que pour les deux précédents. La teneur moyenne en Cd est inférieure que celles trouvées dans les deux séries de sols précédentes alors que le Zn a une teneur supérieure comparée aux sols de la série Baya et correspond à la moitié de celle de ceux de la série Kaponda. La teneur totale en Co ne dépasse pas la norme AFNOR [11] (300 ppm) pour ce type de sol, elle est de 93 ppm. Les coefficients de variation restent élevés pour le Cu et le Pb tandis que les autres éléments présentent un coefficient de variation inférieur à 100%. Ces types de sols présentent les teneurs en Fe et en

Al les plus élevées après les sols de la série Kaponda (Tableau 7).

## 4 DISCUSSION

### PRÉSENTATION GRAPHIQUE DES CORRÉLATIONS ENTRE ETM DES SOLS DU PLATEAU PENGA-PENGA (FIGURE 4)

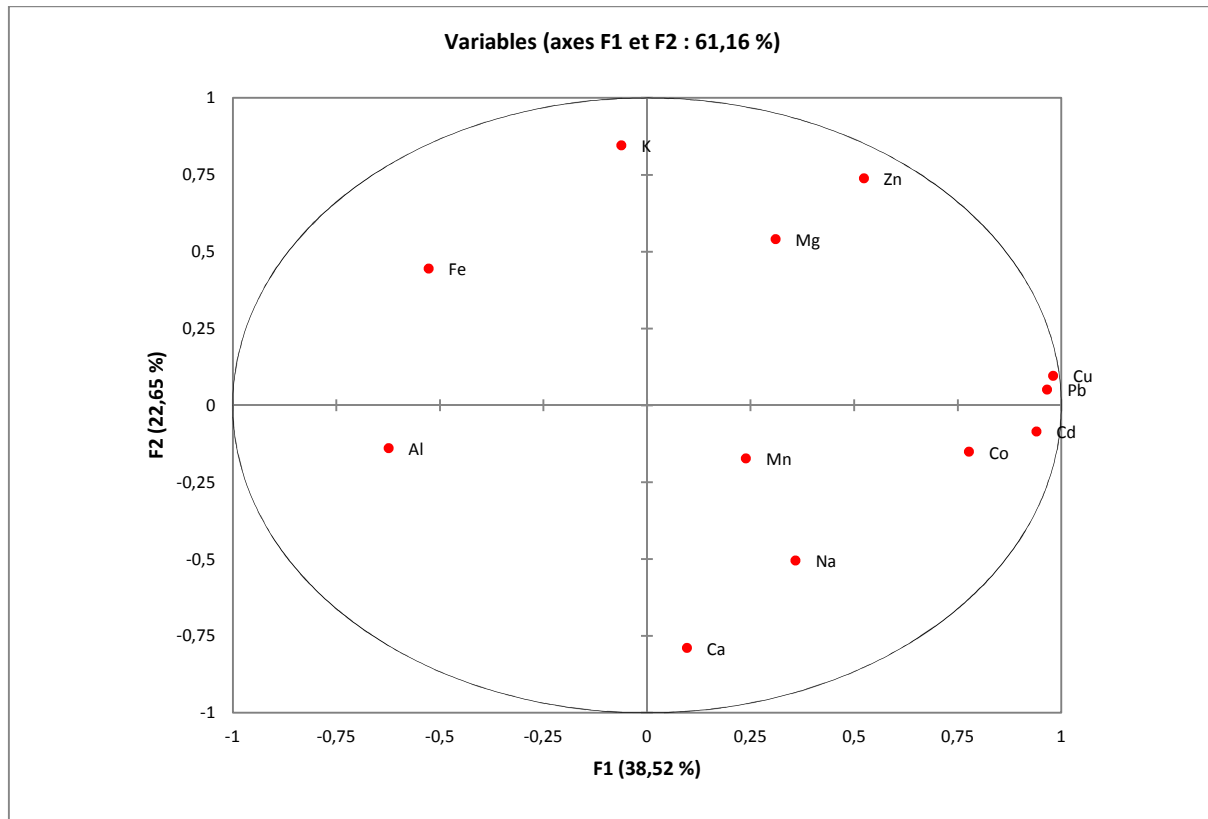


Figure 4: Graphique des corrélations entre ETM

D'une manière générale, le Cu, le Co, le Pb et le Cd ont une corrélation très hautement significative entre eux [13,14]. 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 [15]. 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<sub>KCl</sub> de respectivement 0,515 et 0,552. 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 [16], 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.

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 sols de la série Kaponda et ceux de la série Musaonga ont le plus grand nombre d'éléments traces corrélés (6 corrélations) entre eux suivi des sols de la série Baya.

Le pH<sub>KCl</sub> très acide des sols de la série Kaponda est très fortement corrélé aux teneurs totales en Cu, en Co et en Cd [17]. La CEC est liée aux différents éléments en fonction de la série de sol étudié, un sol de la série Kaponda présentera une corrélation entre le zinc et la CEC par contre les sols de la série Musaonga ont une CEC liée à trois éléments (Cu, Cd, Pb) [18]. L'ensemble des séries de sols montrent un lien entre les quatre premiers éléments traces métalliques analysés (Cu, Co, Pb, Cd). Cependant, certaines différences apparaissent en fonction de la série de sols. Les sols de la série Kaponda et ceux de la série Musaonga ont le plus grand nombre d'éléments traces corrélés (6 corrélations) entre eux suivis des sols de la série Baya.



Les teneurs en Cu « normales » de beaucoup de pays du monde et selon le type de sols sont rarement supérieures à 200 ppm, avec des moyennes comprises entre 6 et 80 ppm [19].

Lounamaa [20] a observé quant à lui des teneurs allant de 50 à 300 ppm en Finlande sur des sols normaux. Dans le cas du site de la Gécamines, les résultats d'analyses montrent de teneurs en cuivre comprises entre 3000- 27.000 ppm au niveau des horizons de surface, ce qui indique de très grandes différences significatives entre les teneurs en Cu obtenues sur les sites naturels. La présence de teneurs particulièrement élevées (10.339 ppm, 9430 ppm, 4943 ppm, 26.644 ppm, 3488 ppm, 7977 ppm) dans les différentes séries de sols pour une moyenne générale des teneurs en cuivre de 10.470 ppm indiquent assez clairement la présence d'une contamination sur les sols de la Gécamines [21]. Ces teneurs sont assez proches de celles indiquées par Kabata-Pendias et Pendias (2001) dans le cas d'une contamination en Cu suite aux activités minières au Canada [22]. Des résultats d'analyses effectuées par Duvignaud et Denaeyer-De Smet (1963) [20] ont montré qu'on pouvait atteindre des teneurs de l'ordre de 9000 à 60000 ppm sur des sols colluviaux et des déblais de carrière à la mine de l'Etoile (Nord-est de Lubumbashi) [23]. On peut donc penser à une contamination d'origine anthropique liée aux émissions provenant de la cheminée de l'usine pyrométallurgique de la Gécamines. Les teneurs élevées en éléments traces métalliques sont observées au niveau des horizons de surface, et cela dans toutes les séries de sols. Ces teneurs en ETM diminuent avec la profondeur, cela rencontre l'assertion de Baize (1998) [24] selon laquelle des teneurs nettement plus fortes dans l'horizon de surface que dans les horizons sous-jacents ne peuvent guère s'expliquer que par des processus naturels, à l'exception du cas des sols forestiers caractérisés par un intense recyclage biologique dans les litières [25].

Le pH est le principal facteur régissant la mobilité des éléments traces dans le sol. Sa variation (naturelle ou anthropique) semble être le facteur dont l'action sur la mobilité des métaux est la plus déterminante [26]. Son abaissement favorise la mobilité des ETM, notamment par mise en solution de sels métalliques ou destruction de la phase de rétention [27]. Inversement, l'augmentation du pH provoque l'immobilisation par formation de composés insolubles ou accroissement de la capacité d'échange canonique [28]. Si l'on s'intéresse aux relations ETM-pH propres à chaque horizon, tous types de sols, on constate des corrélations significatives négatives (Cu et Pb dans l'horizon (C), comme positives (Cd, Zn et Co dans l'horizon (C), Cu et Pb dans les horizons B et An) sur le site de la Gécamines.

## 5 CONCLUSION

Les teneurs mesurées au quartier Penga-Penga correspondent aux 100 premiers centimètres du sol, donc aux horizons ayant été le réceptacle de toutes les contaminations agricoles diffuses, éventuellement des retombées atmosphériques (éléments aérotransportés à grande distance), sans oublier de parler du bruit de fond. Il est donc possible avec cette base, de remonter valablement au fond pédogéochimique naturel. Les résultats obtenus permettent de penser aux actions humaines et écarter la possibilité d'anomalies naturelles. Deux groupes d'éléments se distinguent sur le site de la Gécamines : le Cu, le Co, le Pb et le Cd très fortement corrélés entre eux et le Zn 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 Zn 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 site contaminé confirment le caractère polymétallique des contaminations. A noter que les relations entre ETM et paramètres pédologiques ne sont pas les mêmes entre les sites contaminés et non contaminés.

## REFERENCES

- [1] [Http://www.forrestgroup.com/fr/stl/stl.html](http://www.forrestgroup.com/fr/stl/stl.html), consulté le 6 juillet 2008 ;
- [2] Leteinturier B., Malaisse F., 1999b. De la réhabilitation des sites pollués par l'exploitation minière du cuivre en Afrique centro-australe. Bull. Séance. Acad. r. Sci. Outre-mer 45 (1999). P 535-554 ;
- [3] IPSC. 1998. Environmental health criteria 200, copper. pp. 269-270;
- [4] AYRES RU, AYRES LW, RADE I. 2002. The life cycle of copper, its Co-products and By-products. Mining minerals and sustainable development. pp 26-32;
- [5] LETEINTURIER B., BAKER AJM, MALAISSE F. 1999. Early stages of natural revegetation of metalliferous mine workings in south central Africa: a preliminary survey, Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 1999 **3** (1), 28-41;
- [6] MBENZA M, ALONI K & MUTEBA M. 1989 : quelques considérations sur la pollution de l'air à Lubumbashi (Shaba, Zaire). Géo-eco-trop, 13, 1-4, 113-125;
- [7] 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. PlantSystematics and Evolution. 142. p 207-221;

- [8] Petit P., Bukome E., Dibwe D.M. et Kalaba M., 2003. Ménages de Lubumbashi entre précarité et recomposition, l'Harmattan. p 81 à 150 ;
- [9] FAO. 1998. World reference base for soil resources. World Soils Resources Report 84. Food and Agricultural Organization of United Nations, Rome;
- [10] Ngongo M.L., Van Ranst E., Baert G., Kasongo E.L., Verdoodt A., Mujinya B.B. & Mukalay J.M., 2009. Guide des Sols en R.D.Congo, Tome I. Étude et Gestion. UGent, HoGent, UNILU. Lubumbashi, 262 p ;
- [11] AFNOR, 1996. Qualité des sols. Recueil de normes françaises. 3<sup>ème</sup> édition. Paris-La défense. 534 p.
- [12] Sys C., 1956, Carte des sols et de la végétation du Congo-Belge et du Rwanda-Urundi, région d'Elisabethville, n° 9, A. Sol, feuille 1, Publication INEAC, Bruxelles ;
- [13] Alloway B.J., (1995a). *Heavy metal in soils*. B.J. (ed), 2e, Blackie Academic and professional, Glasgow.
- [14] Baker D.E., (1990). Copper in Alloway B.J., (ed), *Heavy metals in soils*. Blackie & Sons, London, Uk, 151,176.
- [15] Andres. L., (2008). Etude de l'impact des contaminations métalliques sur les propriétés des sols autour de Lubumbashi. TFE FSAGx, 75p;
- [16] Baize.D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. INRA. 395 p;
- [17] Colinet .G., (2003). Eléments traces métalliques dans les sols. Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge. Thèse de doctorat FSAGx, 412p. + Annexes;
- [18] PIP E, 1991 : Cadmium, copper and lead in soil land garden produce near a metal smelter at Flin Flon, Manitoba. Bull. Environ. Contam. Toxicol. (1991) 46: 190-196 ;
- [19] Kabata-Pendias A. et Pendias H., 2001. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton, CRC Press Inc. 3<sup>ème</sup> Ed. 315 p ;
- [20] DUVIGNEAUD & DENAEYER-DE SMET, 1963 : Cuivre et végétation au Katanga. Bull. Soc. Roy. Bot. Belg. 96. 93-231;
- [21] Kashimbo Kalala S., 2009. Contribution à la caractérisation des teneurs naturelle et de contamination en éléments traces métalliques des sols et sédiments autour de Lubumbashi. Mémoire d'études approfondies FSAUNILU, 88p;
- [22] Sterckeman, T., Douay, F., Proix, N. & Fourrier, H. (2002) Contamination des sols vers la profondeur à Noyelles-Godault et Aubry. In: Un point sur....les éléments traces métalliques dans les sols approches fonctionnelles et spatiales. INRA. Editions. Paris 565p ;
- [23] OKITAUDJI R. L. 2002. Model de formation des gisements de cuivre-cobalt du Shaba en République Démocratique du Congo, Bull. ac. Lor. Sc., 40, 4.
- [24] Baize. D. BAI., 1998. Les éléments traces métalliques dans le sol ; approche fonctionnelle et spatiale. INRA. 129 p.
- [25] 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.
- [26] Calvet. R., (2003). Le sol, propriétés et fonctions. Phénomènes physiques et chimiques, application Agronomiques et environnementale. Dunod, Tome 1, 446 p.
- [27] Cambier .P. and Carlchaka R., (1999). Influence of reducing conditions on the mobility of bivalent trace metals in soils. In Selim H.M. (ed), *fate and transport of heavy metals in Vadose zone*. Lewis publishers, Boca Raton, 159-175.
- [28] Yu J.Y. et Heo B. Dilution and removal of dissolved metals from acid mine drainage along Imgok Creek, Korea. *Appl. Geochem.* 16, 1041-1053 (2001).