

Impact de l'érosion sur le transport des éléments traces métalliques (ETM) et la qualité des sédiments le long de la rivière Karavia : Cas du plateau de Penga-Penga, Lubumbashi, Haut-Katanga / RD Congo

[Impact of erosion on the transport of trace metals (SEM) and sediments quality along the river Karavia : Case of Penga Penga Tray, Lubumbashi, Haut Katanga / RD Congo]

Serge Kashimbo Kalala

Chef des travaux à l'Unité de Gestion des ressources naturelles, Faculté des sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, B.P: 1825, 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: Since the beginning of the century, the environment (air, land and water) has been subjected to increasing pressure from industrial and human activities whose effects were quickly felt. In the aquatic environment, much of anthropogenic or natural compounds are adsorbed on particulate matter and accumulate in sediment. Sediment can affect the bioavailability of contaminants and therefore toxicity. A transect was established along the river Karavia, and (composite) samples of sediments were collected in surface and in depth about four retained stations for laboratory analysis. The results indicate a high concentration of trace metals (SEM), especially copper (3488 ppm 2307 ppm surface against deep) in sediments. The level of copper content exceeds excessively standards AFNOR, WHO and Canadian recommendations for the protection of aquatic life and indicate severe pollution of the substrate. The transfer of pollutants through the profile, particularly the copper is notable. This is justified: First, the ETM from copper production through the factory Gecamines has accumulated in the surface horizons and reached a very high level of concentration, causing the disappearance of vegetation and emergence of large bare surfaces. Increased erosion explains the transfer of the ETM-Penga Penga tray down or bottom-Karavia pass the river. Second, the chemical parameters (pH, CEC) and soil (particle size) explain the transfer of ETM through the profile. The ultimate goal of this study component "sediment" is to assess the impact of these pollutants, sediment in particular, the most realistic way possible on the environment.

KEYWORDS: ETM, Transfer, Penga-Penga tray, Lowlands, Contents, Sediment, Toxicity, Environment.

RESUME: Depuis le début du siècle, l'environnement (atmosphérique, terrestre et aquatique) a été soumis à la pression croissante des activités industrielles et humaines dont les effets se sont fait rapidement sentir.

Dans le milieu aquatique, une grande partie des composés d'origine anthropique ou naturelle s'adsorbent sur les particules en suspension, puis s'accumulent au niveau des sédiments. Les sédiments peuvent modifier la biodisponibilité des contaminants et par conséquent leur toxicité. Un transect a été établi le long de la rivière Karavia, et des échantillons (composites) des sédiments ont été prélevés en surface comme en profondeur sur quatre stations retenues, pour analyse au laboratoire. Les résultats obtenus indiquent une forte concentration des éléments traces métalliques (ETM), particulièrement le cuivre (3488 ppm en surface contre 2307 ppm en profondeur) dans les sédiments. Le niveau des teneurs en cuivre dépasse excessivement les normes de l'AFNOR, de l'OMS ainsi les recommandations canadiennes pour la protection de la vie aquatique et indiquent une pollution sévère du substrat. Le transfert des polluants à travers le profil, en particulier le cuivre est notable. Ceci est justifié : Primo, les ETM issus de l'activité de production de cuivre par l'usine de la Gecamines se sont accumulés dans les horizons de surface et ont atteint un niveau de concentration très élevé, occasionnant la disparition de la végétation et l'apparition de vastes surfaces nues. L'intensification des phénomènes d'érosion explique les transferts des

ETM du plateau de Penga-Penga vers le bas-fond ou passe la rivière Karavia. Secundo, les paramètres chimiques (pH, CEC) et pédologiques (granulométrie) expliquent le transfert des ETM à travers le profil. Le but final de cette étude sur la composante « sédiments » est d'évaluer l'impact de ces polluants, sédimentaires en particulier, de la façon la plus réaliste possible sur le plan environnemental.

MOTS-CLEFS: ETM, Transferts, Plateau Penga-Penga, Bas-fond, Teneurs, sédiments, Toxicité, Environnement.

1 INTRODUCTION

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 pendant plus d'un demi-siècle [1]. Chaque étape du traitement des minerais de cuivre rejette des métaux lourds et des oxydes dans l'atmosphère [2]. En ce qui concerne l'usine de la Gécamines à Lubumbashi, la partie des émissions liée à l'agglomération et au grillage, qui émet la majorité du dioxyde de soufre, sort par la cheminée centrale de 152 m de haut [3]. Le reste est directement libéré à chaque étape de traitement par de plus petites cheminées [4].

Les poussières retombent donc majoritairement autour de l'usine. Les retombées de métaux lourds s'observent principalement dans un rayon de deux kilomètres autour de l'usine (partie densément peuplée) et dans la direction des vents dominants [5] [6]. Ces substances contaminent donc l'air ambiant, le sol, la faune (y compris la population humaine), la flore et le milieu aquatique. Des pluies acides [7] sont également engendrées par cette activité, par réaction entre l'eau de pluie et les oxydes de soufre émis par l'usine [8].

La composition des dépôts sur le sol est en effet analogue à celle des poussières émises par l'usine de la Gécamines, d'après les analyses de MOULAERT (1992) [9] alors que l'usine était encore en fonction. La teneur en cuivre d'échantillons de sols (entre 2 et 0,5 mm de la surface) collectés par MOULAERT en 1992 était jusqu'à 400 fois supérieure (à quatre kilomètres de la cheminée des Gécamines dans la direction du vent) à celle de la forêt climax du Katanga, soit 309 $\mu\text{g/g}$, comme le dit [9]. De plus, KASHIMBO (2010) [10] a mesuré les teneurs en cuivre, zinc, cobalt, cadmium et plomb par type de sols à diverses profondeurs pour comparaison entre celles de sites naturels locaux et celles du site de la Gécamines. Les teneurs sont significativement plus élevées sur le site de la Gécamines. Les sédiments déposés en bas de versant (colluvions) sur ce site, et aux abords des rivières en aval sont également contaminés [11]. Suite à la dégradation de la végétation, les racines des plantes ne retiennent plus le sol, ce qui favorise l'érosion éolienne et par agents de transport en masse. La partie superficielle du sol, qui contient les dépôts de métaux lourds issus de la cheminée de l'usine de Lubumbashi, est alors déplacée vers les points bas, les cours d'eau (rivières Karavia, Lubumbashi) et dans la direction du vent [12].

La rivière Karavia située à cheval entre le plateau Penga-Penga et Karavia, a reçu une part importante des colluvions à la suite des phénomènes importants d'érosion en saison des pluies. L'érosion a été beaucoup plus marquée sur le plateau de Penga-Penga, vu que celui-ci présente de vastes surfaces nues, emprunte de la pollution polymétallique des sols causée par les rejets dans l'atmosphère de grandes quantités des fumées, (riches en SO_2 et particules métalliques) par la cheminée de l'usine Gécamines ayant fonctionnée pendant près d'un demi-siècle [13]. Ces particules métalliques se sont accumulées dans les horizons de surface et transférées dans les sédiments du bord de la rivière Karavia [14]. Elles sont à l'origine de sérieux problèmes de santé publique actuellement dans la région du Katanga ou l'exploitation minière et le traitement métallurgique ont pris de l'ascension [15].

L'objectif de la présente étude consiste à déterminer le niveau des teneurs en éléments traces métalliques dans les sédiments, le long de la rivière Karavia afin de comprendre les mécanismes impliqués dans leurs transferts à travers le profil d'une part et d'autre part de mettre en évidence les risques de relargage de ces derniers par les sédiments vers le milieu aquatique (Eau) afin de résoudre les risques de leurs présences excessives dans la chaîne trophique (sédiment, eau, végétaux, êtres aquatiques, animaux, homme).

2 MATÉRIELS ET MÉTHODE

2.1 LOCALISATION DU MILIEU D'ÉTUDE

Compris entre 11°27' de latitude Sud et 27°28' de longitude Est, la ville de Lubumbashi est entièrement située dans le Sud de la République Démocratique du Congo, sa superficie est de 747 Km² []. 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) [16].

LE SITE DE LA GECAMINES: LE PLATEAU PENGAPENGA

Le site de Penga-Penga est situé dans le cône de pollution de la cheminée de la Gécamines, à proximité du Cimetière de la Gécamines. La végétation de cette zone, située dans l'axe des vents dominants, a été totalement dévastée par l'accumulation progressive des dépôts atmosphériques des particules polluantes rejetées par la cheminée. Ce quartier est situé à moins de 3 km, au Nord-Ouest, de l'Usine de la Gécamines.

2.2 MÉTHODOLOGIE DE TERRAIN

La toposéquence de la Gécamines recoupe quatre unités : le plateau Gécamines, le versant, la rivière Karavia et le plateau Karavia. 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, 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. Dans cette étude, seule la rivière Karavia a été prise en compte, ce sont les échantillons des sédiments qui ont fait l'objet d'analyse de laboratoire.

Les pentes sont peu marquées, < 2 % pour le plateau et entre 2 et 5 % pour le versant. La rivière Karavia mesure environ 10 à 20 mètres de large en saison des pluies. Les sols du plateau de la Gécamines sont généralement nus et donc subissent plus fortement l'érosion.

La toposéquence 2 est celle prise en compte dans cette étude. Elle vise à évaluer les transferts des ETM à travers le pédopaysage jusqu'aux 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 *Crepidiorhpalon tenuis*, *Haumaniastrum katangense*, *Setaria palidifusca*, *Imperata cylindrica*.

2.3 METHODOLOGIE POUR L'ESTIMATION DES TENEURS EN ETM DANS LES SEDIMENTS

COMPARAISON EN SEQUENCE

Dans cette étude, des échantillons des sédiments ont été prélevés au niveau d'une unité physiographique (bas-fond), pour quantifier la teneur des particules dangereuses intégrées dans les matériaux décapés par l'eau et transportés à travers le pédopaysage jusqu'au bas-fond. Pour mieux interpréter les données relatives aux ETM dans une unité physiographique sur une toposéquence, il convient de comparer les teneurs de l'horizon de surface par rapport à celles de l'horizon de profondeur du bas-fond ou passe la rivière Karavia. Celle-ci a reçu des matériaux de colluvionnement des plateaux de Penga-Penga et de Karavia. L'horizon à tester est comparé à l'horizon correspondant du même type de sol, il s'agit d'une comparaison en séquence qui permettra de comprendre l'effet de l'eau et de la pente sur la redistribution des ETM dans le pédopaysage par érosion et par ruissellement.

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

2.5 MATÉRIELS DE TERRAIN

Le matériel utilisé pour l'observation et l'échantillonnage sur le terrain comprend : tarière, fiches de sondage et de profils pour relever les observations, charte Munsell pour la couleur, kit pH, clinomètre. Les coordonnées GPS sont prélevées en chaque point de sondage.

2.6 ANALYSES À RÉALISER

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

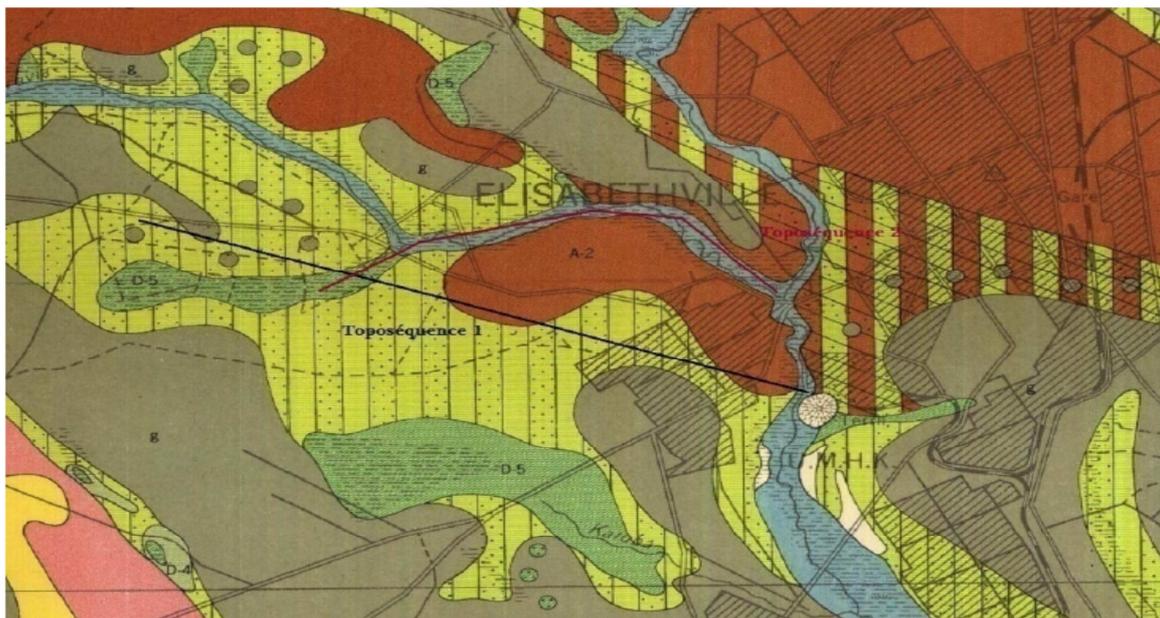


Figure 1 : Localisation de deux toposéquences sur la carte pédologique (1/60000) (Sys, 1954-1956)

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 RÉSULTATS

3.1.1 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES ET PEDOLOGIQUES DANS LES SEDIMENTS (D₆)

Tableau 1: Résultats d'analyse sur les paramètres physico-chimiques et pédologiques des sédiments

Stat	pH			Carbone Total			Granulométrie			Eléments échangeables (méq/100g ou Cmol/Kg)						
	pH Eau	pH KCl	▲ pH	C g/100g	N	C/N	A%	L%	S%	Ca	Na	K	Mg	S	CEC	V%
Horizon de Surface																
Effectif	6	6	6	6	5	5	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3
Moyenne	5,8	5,7	0,1	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	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

Les observations ont été effectuées sur le tiers inférieur de la cuvette de la rivière Karavia. Cette morphologie est légèrement plane, sa pente est inférieure à 5%. Plus, on s'approche de la cheminée, plus les dépôts de colluvion s'accumulent sur le site. Les apports des colluvions vers la rivière Karavia sont importants dans cette partie au regard de la gravité de la pente, le long du versant. Ces types de substrat possèdent un pH plus élevé. La moyenne du pH eau et du pH KCl sont respectivement de 5,8 et 5,7 en surface et 6,3 et 5,0 en profondeur. Le taux moyen de C/N est égal à 15, indiquant une décomposition moyennement lente de la matière organique [17]. Leur texture est sablo-argileuse en surface et argilo-limoneuse en profondeur mais le coefficient de variation montre une haute variabilité au sein de ces sédiments. La concentration des éléments échangeables est très faible sauf pour le potassium 0,13 méq/100g en surface et 0,17 méq/100g en profondeur. La capacité d'échange cationique et le taux de saturation sont également très faibles (Tableau 1).

Deux horizons ont fait l'objet d'étude sur les sédiments de la rivière Karavia, l'horizon de surface (0-30 cm) et celui de profondeur (60-70cm). En tenant compte du pH au niveau de ces deux horizons, on constate que l'horizon de surface présente une moyenne de pH Eau acide 5,8, alors que celui de profondeur a une moyenne de pH légèrement acide 6,3. Cette différence de pH est un paramètre déterminant dans la mobilité des ETM à travers le profil [18]. Au regard de la granulométrie, l'horizon de surface a une prédominance sableuse 50% avec un taux faible d'argile 23% tandis que celui de profondeur présente une tendance inverse. Les résultats ainsi observés pourraient expliquer le transfert des ETM à travers les couches du sol jusqu'à l'horizon de profondeur [19], pour lequel la réaction du sol présente une valeur de 6,3 correspondant à un pH légèrement acide et un taux d'argile élevé (37%). Ce qui constitue un piégeage d'ETM en profondeur, avec un gros risque de leurs relargage vers le milieu aquatique [20].

La valeur de la CEC indique pour l'horizon de surface, comme celui de profondeur que le substrat n'est pas de bonne qualité surtout en matière de production agricole [21]. Cela pourrait être dû à l'accumulation dans les sédiments des éléments toxiques pendant une longue période [22]. Ces éléments possèdent les mêmes mécanismes d'entrée dans le sol et les plantes comme les éléments bénéfiques. Ils ont donc été transférés en abondance vers le bas-fond ou passe la rivière Karavia.

3.1.2 NIVEAU DE CONCENTRATION DES ELEMENTS TRACES METALLIQUES DANS LES SEDIMENTS

Tableau 2: Teneurs totales moyennes des ETM dans les sédiments le long de la rivière Karavia

Totaux	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Pb	Cd	Zn
	mg/100g				g/100g		mg/Kg					
Horizon de Surface												
Effectif	3											
Moyenne	141	199	207	69	6,0	4,4	199	3488	290	236	6	295
Ecart 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											
Moyenne	113	232	299	66	6,7	5,4	199	2307	288	173	6	231
Ecart 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

Les teneurs moyennes en éléments traces métalliques sont du même ordre de grandeur que les autres mais l'on n'observe pas une grande variabilité de la concentration d'ETM selon qu'on est en surface ou en profondeur. Le cobalt et le cadmium ont respectivement une teneur moyenne de 290 mg/kg et 6 mg/kg. Ces teneurs se trouvent excessivement supérieures aux normes fixées par la Recommandation Canadienne pour la protection de la vie aquatique [23]. Le transfert d'ETM du substrat vers le milieu aquatique est possible et dépend du pH, qui conditionne la solubilité de l'élément ou sa précipitation sous forme d'un complexe [24]. Les teneurs en fer et en aluminium dans les sédiments sont les plus importantes sur cette zone. Il en est de même des sols du plateau et du versant. S'agissant du cuivre dans les sédiments, on enregistre dans l'horizon de surface une teneur très élevée 3488 ppm, elle diminue avec la profondeur 2307 ppm, mais reste excessivement supérieure à la recommandation Canadienne de protection de la vie aquatique, qui fixe à 35 ppm, la valeur limite du cuivre dans les sédiments. L'abondance du cuivre en surface est justifiée par le fait premièrement, que l'usine de Lubumbashi a extrait principalement le cuivre, donc les retombées atmosphériques ont enrichis les sols en Cuivre et autres éléments chimiques sur le plateau de Penga-Penga [25]. Deuxièmement, les phénomènes d'érosion et de ruissellement, étant dominants en saison des pluies, ajouté la nature de la pente sur le versant, ces conditions réunies occasionnent le transfert des matériaux et particules toxiques à travers le pédopaysage jusqu'au niveau du bas fond ou passe la rivière Karavia. La pollution avérée des sédiments entraîne des conséquences incalculables sur la ressource eau, les êtres aquatiques, les plantes aquatiques, bref l'homme au sommet de la chaîne trophique [26]. Les autres éléments, le Pb, le Cd ainsi que le Zn ont des teneurs très élevées par rapport à cette recommandation Canadienne, ces teneurs diminuent avec la profondeur mais l'on note un transfert important de ceux-ci vers la profondeur suite à la texture en surface (Sable) ainsi qu'à la variation du pH (5.8 à 6.3).

3.2 DISCUSSION

L'interprétation des teneurs totales en ETM nécessite d'abord la connaissance des autres données pédologiques de caractérisation à savoir : les données analytiques et les données morphologiques [27]. Les résultats d'analyses en composantes principales (ACP), permettent d'établir les relations qui existent entre les éléments traces métalliques et les différentes propriétés physico-chimiques du substrat étudié. Il faut noter que certaines de ces propriétés n'expliquent guère les variations naturelles du contenu en ETM que l'on peut observer d'un horizon à l'autre au sein d'un même solum pendant que d'autres sont des références impératives pour interpréter celles-ci [28]. Il s'agit des teneurs en fer, argile, calcaire de l'échantillon et du gradient de pH. Ce sont ces paramètres qui peuvent aider à prédire et interpréter le contenu en ETM dans un horizon donné.

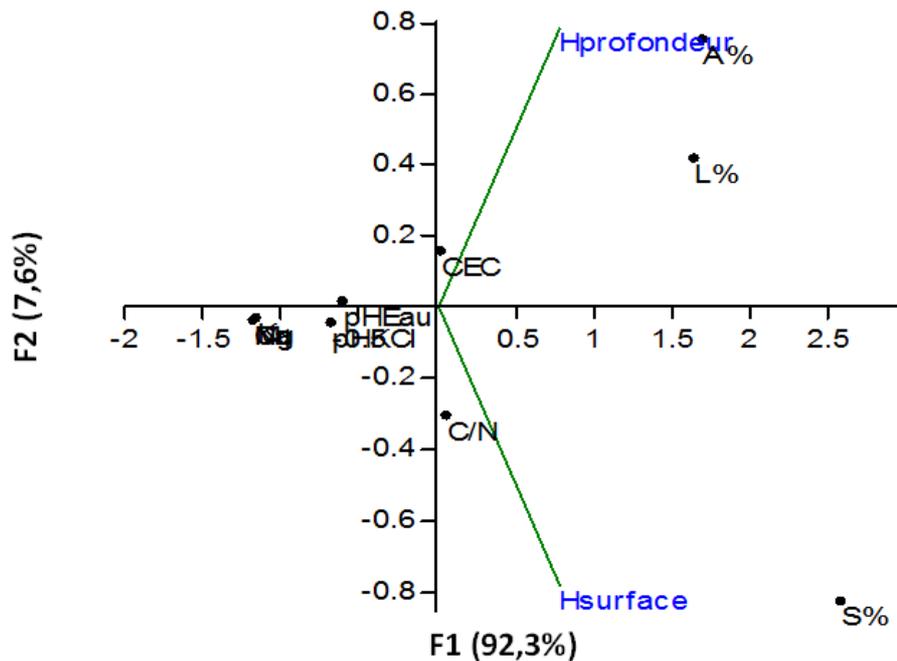


Figure 2 : Graphique des corrélations entre les paramètres chimiques et pédologiques

En se référant à la figure 2, montrant les corrélations existant entre les paramètres chimiques (pH Eau, pHKCl, CEC) et pédologiques (Granulométrie) dans les horizons de surface et de profondeur, il ressort clairement une répartition des horizons en fonction de la granulométrie, la matière organique ainsi que la capacité d'échange cationique. L'horizon de surface étant le réceptacle de toutes les contaminations [(chimique due aux procédés de traitement métallurgique, agricoles diffuses, éventuellement des retombées atmosphériques (éléments aérotransportés à grande distance), transport des polluants par ruissellement en fonction de la pente)] [29] présente un taux élevé de sable 50%, contre 23% d'argile. Selon le même graphique, le rapport C/N est de 16,5, ce qui indique la présence en surface de la matière organique issue de différentes espèces présentes dans le bas fond, le long de la rivière Karavia. Par contre, en profondeur, la tendance est inverse. Il s'observe un taux élevé d'argile 37%, accompagné d'une CEC importante, pouvant expliquer l'immobilisation (le piégeage) des éléments dangereux temporairement avant leur relargage dans le milieu aquatique (Eau). Cette observation va dans le même sens que celle faite par Baize (1997) [30] selon laquelle des teneurs nettement plus fortes dans l'horizon de surface que dans les horizons sous-jacents ne peuvent guère s'expliquer par des processus naturels, à l'exception du cas des sols forestiers caractérisés par un intense recyclage biologique dans les litières. Baize ajoute ensuite que les gradients d'argile, croissant avec la profondeur présentent une corrélation positive avec le cuivre, le plomb, le cobalt et le zinc mais une corrélation négative avec le cadmium et le manganèse. Ils sont accompagnés généralement d'un gradient parallèle en fer. S'agissant du niveau de concentration en ETM, il ressort clairement que le Cu présente la teneur la plus élevée, dépassant 34 fois plus que la valeur normale fixée par l'AFNOR [31] et 100 fois plus que la recommandation Canadienne pour la protection de la vie aquatique. Le cuivre étant un oligoélément, indispensable à l'homme, aux êtres aquatiques ainsi qu'aux végétaux [32] ne doit pas excéder une certaine teneur. Dans le cas présent, il cesse d'être bénéfique pour la vie aquatique, les végétaux. Il devient un élément toxique et entraîne des conséquences néfastes sur le substrat (sédiment), l'eau ainsi que les plantes et les êtres aquatiques.

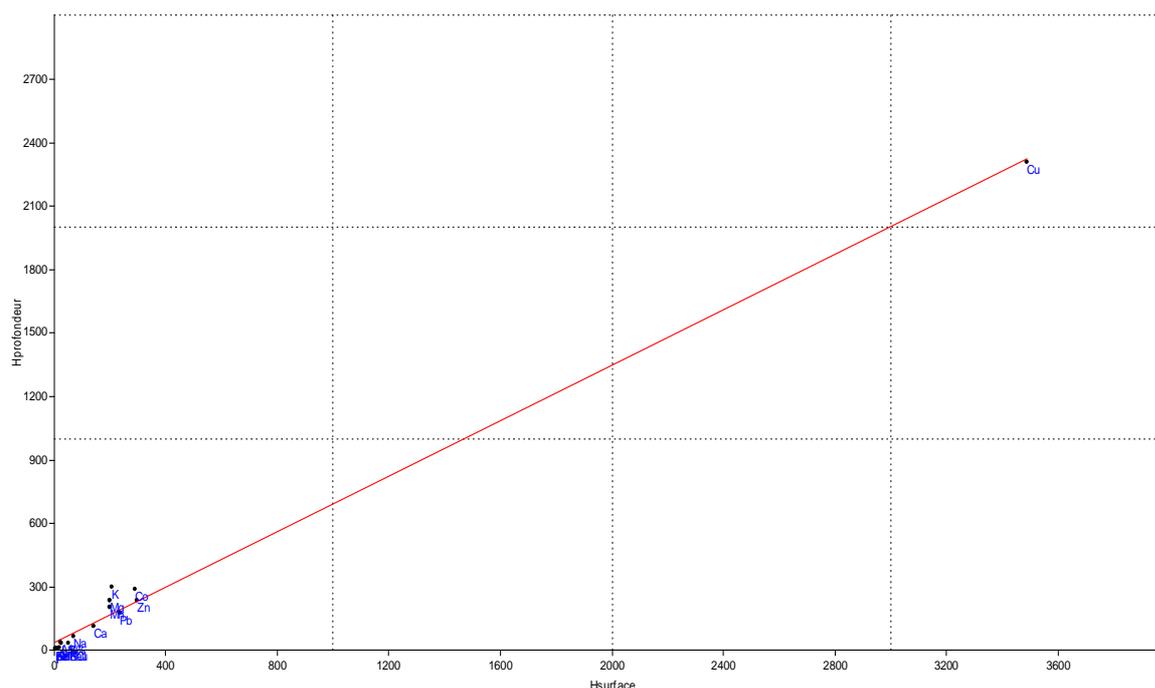


Figure 3 : Concentration du Cu dans les sédiments par rapport aux autres ETM

La situation présentée à la figure 3, trouve des explications dans les hypothèses ci-dessous :

- ❖ Le cuivre se trouve fortement concentré en surface comme les autres éléments, il diminue avec la profondeur. Ceci s'explique par le fait que la cheminée de la fonderie électrique de cuivre de Lubumbashi émet dans l'atmosphère des grandes quantités des fumées riches en SO_2 (issu de l'oxydation des sulfures) ainsi que des poussières métallifères chargées en cuivre et autres métaux lourds. Ceux-ci s'éliminent ensuite par gravité, dépôt à sec, précipitation et lessivage et s'accumulent principalement dans les horizons de surface des sols environnants [33] ;
- ❖ Les différents éléments traces métalliques en particulier le cuivre se sont concentrés et accumulés dans l'horizon de surface des sols du plateau de Penga-Penga, causant ainsi la disparition de la végétation existante et l'apparition des espèces typiquement métalophytes [34]. D'où l'apparition de vastes surfaces nues ;
- ❖ Les vastes surfaces nues observées sur le plateau de Penga-Penga sont sources des problèmes suivant les saisons : en saison des pluies, ces surfaces nues sont exposées aux phénomènes intenses d'érosion. Etant donné que les ETM sont concentrés en surface, l'érosion décape ainsi l'horizon A, riche en ETM et par ruissellement, ceux-ci sont transportés vers le bas-fond vu que la topographie présente une pente importante [35]. Ceci est la cause fondamentale qui fait l'objet de recherche, dans cette présente étude. C'est ainsi qu'on retrouve des teneurs élevées, dans le substrat de bas-fond (les sédiments) en surface. On note un transfert important des ETM de l'horizon de surface à l'horizon de profondeur, ceci est dû à la présence d'une texture sableuse en surface et un pH acide qui explique la mobilité des ETM. En saison sèche, les mouvements des vents dominants occasionnent l'envol des poussières (tourbillons) transportant les particules métalliques susceptibles d'enrichir l'atmosphère et les sédiments en ETM par gravité.

MATRICE DES CORRELATIONS ENTRE ETM ET PARAMETRES CHIMIQUES, PEDOLOGIQUES (PARAMETRES EXPLICATIFS)

	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	0,632 0,009							
Cd tot	0,472 0,065	0,509 0,044	0,465 0,069						
Zn tot	-0,048 0,859	0,2 0,458	-0,079 0,772	0,152 0,573					
A%	-0,161 0,76	-0,288 0,58	-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	0,54 0,086	0,251 0,456	0,426 0,72	-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 0,77	0,047 0,904
C.E.C	-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							
C	-0,529 0,143								
C.E.C	-0,389 0,266	0,807 0,002							

Figure 4 : Matrice des corrélations entre ETM et les paramètres (chimiques et pédologiques)

L'analyse de la matrice des corrélations indique l'existence de plusieurs corrélations entre éléments. Ici, l'on s'intéressera aux corrélations qui expliquent les relations de causalité entre les ETM et les paramètres (chimiques et pédologiques) pris en compte. Une corrélation positive, hautement significative entre le plomb et le cuivre est enregistrée [0,969]. Il existe d'autres corrélations entre les Co-Cu, Co-Pb, Cd-Co, cela a été observé par plusieurs auteurs [3auteurs] ayant travaillé sur l'arc cuprifère Katanga (sols, Eau). Ces corrélations sont positives mais légèrement significatives. Le cobalt reste l'élément le plus lié dans les sédiments, il est influencé par le pH Eau et le fer [0,692] et [0,641] respectivement. Le cadmium présente une corrélation positive, significative avec la matière organique (carbone). L'on note l'existence dans les sédiments de plus de corrélation entre éléments que dans les sols hydromorphes de bas-fond (Gleysols). Le cuivre, le cobalt, le plomb et le cadmium présentent entre eux, une corrélation positive, significative atteignant [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 sédiments présentent des relations spécifiques entre certains éléments tels que le zinc et la CEC qui ont une relation positive [0,813] et le carbone qui est significativement lié au cobalt [0,941].

Les résultats obtenus sur les sédiments montrent toutefois que les transferts d'ETM des plateaux aux vallées sont relativement importants, ce qui justifie la forte teneur en cuivre dans les sédiments. Ceux-ci se font principalement sous forme particulaire, en surface puisque les sols de plateaux sont homogènes le long de la pente.

4 CONCLUSION

L'étude de détermination du niveau des teneurs en ETM dans les sédiments avait pour objectif principal, de comprendre les mécanismes impliqués dans les transferts des particules dangereuses d'une part à travers le pédopaysage (du plateau en

passant par le versant vers le bas-fond), et d'autre part à travers les horizons du sol (séquence). Les transferts des ETM à travers le pédopaysage est les résultats d'importants phénomènes d'érosion observés sur le plateau de Penga-Penga aux vastes surfaces nues. Les transferts des matériaux sont importants sur le plateau de Penga-Penga que sur celui de Karavia. Ces matériaux se sont accumulés dans les substrats de bas-fond (sédiment) atteignant des niveaux de concentration excessivement élevés pour ce qui est du cuivre, cobalt, plomb, cadmium. Ces ETM oligoéléments indispensables aux végétaux, êtres aquatiques aux animaux ainsi qu'aux hommes excepté le cadmium, dépassent largement les limites fixées par l'AFNOR, l'OMS et les recommandations canadiennes pour la protection de la vie aquatique. S'agissant de la comparaison des ETM en séquence, on a noté aussi les transferts importants à travers le profil, cela a été favorisé par l'implication des paramètres chimiques et pédologiques (pH, acide en surface et très légèrement en profondeur ; sable en surface d'où facilitation des transferts vers les horizons inférieurs, argile en profondeur d'où immobilisation et piégeage des ETM). Le temps de résidence de ces ETM dans cet horizon de profondeur est court et est dicté par les dynamiques de leurs formes chimiques, les changements des conditions physico-chimiques, pédologiques (du substrat) et hydrologiques. L'entrée de ces ETM dans le milieu aquatique est à l'origine de plusieurs dysfonctionnements de la ressource Eau en particulier, et de l'Environnement en général vu que l'eau est un élément indispensable dans les processus chimiques, physiques et biologiques de tous les êtres (humains, aquatiques, végétaux, substrats,...)

Après l'analyse de laboratoire, le traitement des données, deux recommandations peuvent être mises en œuvre, afin de vulgariser à la population les techniques nécessaires de gestion de substrat pollué pour limiter les transferts des substances dangereuses vers le milieu aquatique. Il s'agit de :

- D'installer une végétation abondante sur les vastes surfaces nues et surtout le versant, par l'usage de la matière organique, la chaux pour activer la croissance végétale sur ce substrat pollué. Ceci en vue de créer une barrière naturelle susceptible de bloquer les particules dangereuses du sol vers le milieu aquatique ;
- D'éviter tant soit peu, de pratiquer les cultures maraichères sur ce type de substrat, aux risques de contaminer le consommateur (population Lushoise).

REFERENCES

- [1] [Http://www.forrestgroup.com/fr/stl/stl.html](http://www.forrestgroup.com/fr/stl/stl.html), consulté le 6 juillet 2008
- [2] MOULAERT, N., Emissions de l'industrie métallurgique à Lubumbashi (Shaba - Zaïre) et conséquences sur l'environnement, Travail de fin d'études inédit, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, 1992.
- [3] BRION, R., MOREAU, J.L., De la mine à mars. La genèse d'Umicore, Lanoo, Tielt, 2006.
- [4] GHISLAIN, Y., GECOMIN. Traitement métallurgique, in Les expatriés de Lubumbashi, [en ligne], <http://lubum2.free.fr/umhk/gecomin/traitement.htm>, page consultée le 10Fevrier 2015.
- [5] MBENZA M, ALONI K & MUTEBA M. 1989 : quelques considérations sur la pollution de l'air à Lubumbashi (Shaba, Zaïre). *Géo-eco-trop*, 13, 1-4, 113-125;
- [6] 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 ;
- [7] MUNYEMBA, F., BAMBA, I., DJIBU, J.-P., AMISI, M., VEROUSTRAETE, F., NGONGO, L., BOGAERT, J., Occupation des sols dans le cône de pollution Lubumbashi, in *Annales de la faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Lubumbashi*, vol. I, n°2, 2008, pp. 19-
- [8] LETEINTURIER, B., Evaluation du potentiel phytocénotique des gisements cuprifères d'Afrique centro-australe en vue de la phytoremédiation des sites pollués par l'activité minière, thèse de doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, 2002.
- [9] MOULAERT, N., Emissions de l'industrie métallurgique à Lubumbashi (Shaba - Zaïre) et conséquences sur l'environnement, Travail de fin d'études inédit, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, 1992.
- [10] KASHIMBO, S., Contribution à la caractérisation des teneurs naturelle et de contamination en éléments traces métalliques des sols et sédiments autour de Lubumbashi, Mémoire inédit, Faculté des Sciences Agronomiques, UNILU, Lubumbashi, 2010.
- [11] Ankley GT, Katko A, Arthur JW. 1990. Identification of ammonia as an important sediment-associated toxicant in the Lower Fox River and Green Bay, Wisconsin. *Environ Toxicol Chem* 9:313-322.
- [12] ASSANI A.A. et MUTEBA M. (1994) - Aspect de la pollution de la rivière Lubumbashi par la Fonderie Minière de la Gécamines, *Bulletin de la Société Belge d'Etudes Géographiques*, 2, Pp. 211-223.

- [13] 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 ;
- [14] Andres. L., (2008). Etude de l'impact des contaminations métalliques sur les propriétés des sols autour de Lubumbashi. TFE FSAGx, 75p.
- [15] Thierry De Putter, Sophie Decrée, Célestin Banza Lubaba Nkulu, Benoit Nemery, Pierre Meerts, Michel-Pierre Faucon, Mylor Ngoy Shutcha. Geology, source of exposure, environmental and health effects of cobalt and associated trace elements in Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo). International Symposium on Mineralogy, Environment and Health, 17-18 septembre 2009, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, France, pp63-64 ;
- [16] Akwerali Sombo J., et al 2013. Plan d'aménagement et de gestion des ressources en eau dans la ville de Lubumbashi. UNILU/Facultés des sciences. Rapport, 56p.
- [17] Bonneau M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF. Nancy, 367p.
- [18] Halen H., 1993. Distribution et cinétique de mobilisation du cadmium dans le sol. Thèse. Louvain La Neuve. 151p. + Annexes.
- [19] LEGROS J.P., et PEDRO G., 1985. The causes of particles-size distribution in soil profiles derived from crystalline rocks, France. *Geoderma*, 36, 15-25.
- [20] Ankley GT, Schubauer-Berigan MK, Dierkes JR. 1991. Predicting the toxicity of bulk sediments to aquatic organisms with aqueous test fractions: pore water vs. Elutriate. *Environ Toxicol Chem* 10:1359-1366.
- [21] GENON J.G et DUFEY J.E., 1991. Contribution des argiles et de la matière organique à la capacité d'échange cationique de sols du Sud-est de la Belgique. *Rev. Agric.*, vol. 44, n°2, 277-284.
- [22] Ankley GT, Thomas NA, Di Toro DM, Hansen DJ, Mahony JD, Berry WJ, Swartz RC, Hoke RA, Garrison AW, Allen HE, Zarba CS. 1994. Assessing potential bioavailability of metals in sediments: A proposed approach *Environ Management* 8:331-337.
- [23] CCME EPC-98E (Canadian Council of Ministers of the Environment), 1999. Canadian Sediment Quality Guidelines for the protection of Aquatic Life. <<http://www.ccme.ca/>>.
- [24] Campbell PGC, Tessier A. 1994. Geochemistry and bioavailability of trace metals in sediments. In *Aquatic ecotoxicology: fundamental concepts and methodologies*. Vol. 1. Eds Boudou A. and Ribeyre F. CRC Press, Boca Raton, Fla. Pp. 125-148.
- [25] MUKOBO, R.-P., Evaluation et cartographie des contaminations des sols autour du site de la Gécamines, mémoire de D.E.A. inédit, Faculté des Sciences Agronomiques, UNILU, Lubumbashi, 2007.
- [26] Chapman PM, Wang F, Janssen C, Persoone G, Allen HE. 1998. Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: binding and release, bioavailability, risk assessment, and remediation. *Can J fish Aquat Sci* 55:2212-2243.
- [27] Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA, Paris, 410p.
- [28] JAMAGNE M., 1973. Contribution à l'étude pédogénétiques des formations lœssiques du nord de la France. Thèse. Gembloux. 445p.
- [29] Baker D.E., (1990). Copper in Alloway B.J., (ed), *Heavy metals in soils*. Blackie & Sons, London, UK, 151,176.
- [30] Baize D., 1997. Interpréter les teneurs totales en micro-polluants minéraux : fonds géochimiques locaux et contaminations modérées. 3eme rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. COMIFER-GEMAS. Blois. 181-192.
- [31] AFNOR, 1996. *Qualité des sols*. Recueil de normes françaises. 3^{ème} édition. Paris. La défense. 534 p.
- [32] JUSTE C., 1994. Matières organiques et comportements des éléments traces dans le sol. In *matières organiques et Agriculture*. Actes des 4^{es} journées de l'analyse de terre. GEMAS. J. Decroux et J.C. Ignazi, coord. 115-123.
- [33] IPSC. 1998. Environmental health criteria 200, copper. pp. 269-270;
- [34] MALAISSE F., Colonval-Elenkov E. & Brooks RR. 1983. The impact of copper and cobalt orebodies upon the evolution of some plant species from upper Shaba, Zaire. *Plant systematics and evolution*, 142, 207-221.
- [35] Kaya.D, 2007. Contribution à l'étude des facteurs de distribution spatiale des teneurs en éléments traces métalliques dans les sols et les sédiments dans le quartier Gécamines, DEA UNILU 50 p.