

Contribution à la réalisation d'une carte des contaminants liés aux espaces verts à Lubumbashi (République Démocratique du Congo)

Auteur : Wers, Romain

Promoteur(s) : Colinet, Gilles

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5531>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des bioingénieurs

**CONTRIBUTION A LA REALISATION D'UNE
CARTE DES CONTAMINATIONS DES
ECOSYSTEMES LIES AUX ESPACES VERTS A
LUBUMBASHI
(REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO)**

ROMAIN WERS

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : GILLES COLINET

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de **l'Université de Liège et de l'Université catholique de Louvain**. * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège et/ou de l'UCL.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : WERS Romain
rwers@student.uliege.be



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des bioingénieurs

**CONTRIBUTION A LA REALISATION D'UNE
CARTE DES CONTAMINATIONS DES
ECOSYSTEMES LIES AUX ESPACES VERTS A
LUBUMBASHI (REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE
DU CONGO)**

ROMAIN WERS

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : GILLES COLINET

Remerciements

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans l'aide, la contribution et le soutien de nombreuses personnes. Par ce mot, j'aimerais les remercier.

Tout d'abord, je remercie Monsieur Gilles Colinet, mon promoteur, pour m'avoir permis de me lancer dans ce travail, pour son suivi, ses conseils et son aide tout au long de cette année. Un tout grand merci également pour les analyses de laboratoire qu'il a menées pour moi vu le temps limité dont je disposais.

Je remercie également le personnel de l'UNILU à Lubumbashi pour sa gentillesse, sa disponibilité et son accueil. En particulier, mes remerciements s'adressent au professeur Mylor Ngoy Shutcha pour l'accueil à l'UNILU et l'organisation de mon séjour à Lubumbashi.

Bien sûr, un grand remerciement va à Monsieur Serge Langunu, doctorant à l'UNILU et participant au projet, qui m'a fait découvrir Lubumbashi, qui m'a grandement aidé dans mon travail et qui est devenu plus qu'un collègue.

Mes remerciements vont maintenant à ma famille pour leurs encouragements, leur soutien, leur écoute et de m'avoir permis de me lancer dans ce projet.

Je remercie mes camarades africains et québécois de ce master complémentaire, qui ont fait de cette année particulière un souvenir et une expérience inoubliables.

Une petite pensée est également adressée à Maman Nelly et Papa Mpyoyo qui m'ont accueilli dans la résidence de l'université.

Enfin, le voyage réalisé dans le cadre du présent travail a été rendu possible grâce au soutien financier de l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur (ARES) de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique, dans le cadre de sa politique de Coopération au développement.

Résumé

La ville de Lubumbashi fait face depuis quelques années à un problème environnemental grandissant. L'industrie minière, établie au sein de la ville depuis plus d'un siècle, empêche la croissance de la végétation et contamine l'environnement (eau, sol et plantes) via ses rejets métalliques. En effet, les eaux de ruissellement chargées et les fumées industrielles provoquent une accumulation d'éléments traces métalliques (Cu, Co, Pb, Zn, Cd) depuis des décennies, notamment dans les sols de la ville. Un cône de pollution, dû aux rejets de la cheminée de la Gécamines et orienté selon la direction des vents dominants de la région, a d'ailleurs été mis en évidence il y a une dizaine d'années. La contamination pourrait représenter une menace pour la santé publique vu que les produits de l'agriculture maraichère accumulent les métaux contenus dans le sol. Jusqu'à présent, cette pollution industrielle n'avait été mise en évidence que via des analyses ponctuelles de sol. Afin de confirmer le travail de synthèse et de cartographie de Shutcha et al. (Inédit), cette étude a établi une carte des teneurs en cuivre des sols de Lubumbashi. Pour ce faire, quarante-sept échantillons ont été récoltés en des endroits encore non-prospectés. Plusieurs analyses ont été menées afin de caractériser les sols (pH, COT, XRF, AA-EDTA, éléments totaux). La carte est construite avec les teneurs en cuivre obtenues par AA-EDTA et résulte d'une compilation des points d'études antérieures. Mis à part de petites différences, les deux cartes sont très similaires. La nouvelle carte présente un cône de pollution s'étendant plus encore vers le nord-ouest et une plus vaste zone contaminée par les mines de l'Etoile et de Ruashi à l'est de la ville. Pour le futur, ces cartes constituent une base pour le travail de remédiation de la pollution des sols de Lubumbashi.

Abstract

Lubumbashi is facing a growing environmental issue for a few years. Mining industry which is established in town for more than a century prevents vegetation from growing and contaminates the environment (water, soil and plants) via metallic wastes. Indeed, polluted run-off water and industrial fumes have been causing a metallic trace elements accumulation (Cu, Co, Pb, Zn, Cd) in soils for decades. A pollution cone related to Gecamines' smokestack wastes and oriented according to regional dominant winds direction has been identified ten years ago. The contamination could represent a public health threat as market gardening products gather soil metals. So far, this industrial pollution had only been revealed by punctual soil analyses. In order to confirm the synthesis and mapping results from Shutcha et al. (unpublished), this study established a copper content map from Lubumbashi soils. In order to do this, forty-seven samples were collected in unexplored areas. Several analyses were carried out to characterize soils (pH, TOC, XRF, AA-EDTA, total elements). The map uses copper contents from AA-EDTA analysis and consists in a former studies samples compilation. Except some small differences, both maps look very alike. The new one shows a pollution cone spreading more than expected towards north-west. A bigger contaminated area than in the former map is observed east of the city. This contamination is related to Etoile and Ruashi mines waste. In the future, these maps are a basis for the soils pollution remediation work in Lubumbashi.

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	6
Abstract	6
Table des matières	7
Table des illustrations.....	9
Liste des tableaux	10
1. Introduction	11
1.1 Problématique.....	11
1.2 Objectifs	11
1.3 Historique minier.....	12
2. Contexte géographique.....	15
3. Contexte géologique.....	17
3.1 Géologie de la région de Lubumbashi.....	17
3.2 Pédologie.....	18
3.3 Les éléments traces du sol – focus sur les métaux analysés dans ce travail.....	20
3.3.1. Le cuivre.....	21
3.3.2 Le cobalt.....	22
3.3.3 Le zinc	22
3.3.4 Le plomb.....	22
3.3.5 Le cadmium.....	22
4. Systèmes sol – plante cupro-cobaltifères	23
4.1 Mobilité des éléments en traces, biodisponibilité et phytodisponibilité.....	23
4.2 Végétation	23
5. Analyse chimique des roches et du sol de l’arc cuprifère katangais	25
5.1 Lithologie et composition des roches cuprifères	25
5.2 Composition des sols.....	26
5.2.1 Collines de l’arc cuprifère	26
5.2.2 Sols naturels	27
5.2.3 Sols contaminés.....	28
6. Synthèse des précédentes cartographies	31
7. Zones d’échantillonnage.....	33
7.1 Lubumbashi	35
7.2 Kamalondo	36

7.3 Kenya	37
7.4 Katuba	38
7.5 Kampemba.....	39
7.6 Ruashi.....	40
7.7 Annexe	41
8. Techniques d'analyses et résultats.....	43
8.1 pH.....	43
8.2 Carbone organique total (COT).....	43
8.3 XRF	43
8.4 Eléments extractibles à l'EDTA.....	45
8.5 Eléments totaux	47
9. Résultats et discussion.....	49
10. Conclusion.....	55
11. Bibliographie.....	56

Table des illustrations

Figure 1: végétation éparse dans le quartier Gécamines, reflet de la contamination sévère en métaux (Ramazani, 2009)	11
Figure 2: teruil de Lubumbashi (Levi, 2015)	13
Figure 3: carte de Lubumbashi avec localisation des communes (modifié d'après Andres, 2008, d'après le cadastre de la ville, 1960)	15
Figure 4: précipitations annuelles moyennes à Lubumbashi (climate-data, 2018)	16
Figure 5: collines de la région de Lubumbashi (Faucon et al., 2015)	16
Figure 6: stratigraphie du Katanga (Kaya Muyumba et al. 2015, d'après Dewaele et al., 2006 et Kampunzu et al., 2009)	17
Figure 7: carte géologique du Katanga méridional (Kaya Muyumba et al., 2015, d'après Robert, 1956)	18
Figure 8: carte pédologique de Lubumbashi mise au point par l'INEAC (Sys et Schmitz, 1959)	20
Figure 9: origines des éléments traces métalliques dans le sol (Baize, 1997).....	21
Figure 10: stratigraphie, lithologie et composition chimique des sous-groupes RAT et Mines (Kaya Muyumba et al., 2015, modifié d'après Kampunzu et al., 2009).....	26
Figure 11: propriétés physico-chimiques de l'horizon de surface des sols des collines de l'arc cuprifère katangais (Kaya Muyumba et al., 2015).....	27
Figure 12: localisation du teruil de Lubumbashi avec l'usine au nord de ce dernier. Remarquons la zone dévégétalisée au nord-ouest du teruil (d'après Google Earth, 2018).....	29
Figure 13: localisations des données sur la composition des sols de Lubumbashi (Shutchka et al., inédit)	32
Figure 14: carte des teneurs en Cu disponible (gauche) et des probabilités de dépassement de la limite de teneur pédogéochimique (400 mg/kg) établie par John (2009) (gauche) (Shutchka et al., inédit)	32
Figure 15: organisation administrative de Lubumbashi et sites échantillonnés	33
Figure 16: sites d'échantillonnage de Lubumbashi.....	36
Figure 17: site L2, avec le teruil en arrière-plan (gauche) et site P1, dont la végétation nettement moins développée reflète la pollution (bas à droite) et la proximité immédiate du teruil (droite en haut)	36
Figure 18: sites d'échantillonnage de Kamalondo	37
Figure 19: ancienne ligne de chemin de fer menant au teruil, à proximité du site KM2 (gauche) et site KM4, avec potager (droite)	37
Figure 20: sites d'échantillonnages de Kenya (gauche) et site KE4 (droite)	38
Figure 21: sites d'échantillonnage de Katuba	38
Figure 22: vue sur le teruil depuis le quartier Katuba (gauche) et site KT1 (droite)	39
Figure 23: sites d'échantillonnage de Kampemba	39
Figure 24: site KP1 (gauche) et cas de pollution de la commune de Kampemba (droite)	40
Figure 25: sites d'échantillonnage de Ruashi.....	40
Figure 26: site R2 (gauche) et barrages à tailings de la mine de Ruashi (droite dans le fond).....	41
Figure 27: sites d'échantillonnage de la commune annexe.....	41
Figure 28: site PK3, avec espèces cupricoles (gauche) et végétation éparse du plateau (droite).....	42
Figure 29: sites N3 (gauche) et N2 (droite).....	42
Figure 30: semi-variogramme des teneurs en cuivre modélisées	49
Figure 31: régression linéaire de la modélisation des teneurs en cuivre	50
Figure 32: teneurs en Cu disponible des sols de Lubumbashi.....	51
Figure 33: probabilité de dépassement de la limite des 400 mg/kg de Cu	52
Figure 34: teneurs en Co disponible des sols de Lubumbashi.....	52

Liste des tableaux

Tableau 1: paramètres physico-chimique des sols naturels de Lubumbashi (modifié d'après Shutcha et al., inédit).....	28
Tableau 2: localisation des échantillons	35
Tableau 3: pH, contenu en carbone et analyse XRF des échantillons	45
Tableau 4: dosage des métaux à l'acétate-ammonium + EDTA.....	46
Tableau 5: teneurs totales en métaux traces	48

1. Introduction

1.1 Problématique

L'expansion économique de la ville de Lubumbashi est basée sur l'exploitation minière de son sous-sol, riche en cuivre et cobalt. De nombreuses sociétés minières exploitent la région depuis des décennies, au premier rang desquelles la Gécamines (Générale des carrières et des mines exploitables). Une conséquence néfaste de cette industrie est apparue il y a quelques années : les rejets des mines se révèlent avoir des effets négatifs sur l'environnement. Parallèlement à ce problème, l'explosion démographique actuelle de Lubumbashi applique une pression supplémentaire sur l'environnement. Le lien entre ces deux facteurs de stress réside dans l'autosuffisance alimentaire de la population lushoïse. La contamination des sols par les eaux de ruissellement chargées et les fumées industrielles minières inhibe la croissance de la végétation (figure 1) en favorisant des plantes métalloytes et provoquant le transfert des métaux vers les produits de l'agriculture, principalement maraîchère.



Figure 1: végétation éparse dans le quartier Gécamines, reflet de la contamination sévère en métaux (Ramazani, 2009)

En particulier, la cheminée de la Gécamines est responsable d'un cône de pollution suite au relâchement de fumées de traitement des minerais pendant des décennies. Remédier au plus vite à cette contamination au cuivre et au cobalt apparaît indispensable pour le développement durable de la ville et une santé de qualité de la population.

1.2 Objectifs

Ce travail s'inscrit dans le cadre général du projet « Amélioration des conditions de vie des habitants de Lubumbashi par le renforcement de l'agriculture urbaine et l'optimisation des services écosystémiques » et est financé par l'ARES. Il est réalisé en partenariat avec l'UNILU (Université de Lubumbashi). L'objectif de ce travail est de fournir une base au projet PRD en établissant une carte des contaminations du sol de la ville. Une première carte a

déjà été réalisée, avec des échantillons principalement prélevés à proximité de la cheminée de la Gécamines. Ce travail vise à préciser les zones contaminées en augmentant les nombres de sites d'échantillonnage et en couvrant d'autres quartiers de Lubumbashi. Pour ce faire, les objectifs spécifiques suivants sont poursuivis :

- Identification des zones à échantillonner ;
- Caractérisation chimique des sols échantillonnés et de leur contamination ;
- Cartographie de la contamination à l'échelle de la ville. L'exploration, la description des zones échantillonnées et la cartographie se feront selon les méthodes classiques de prospection (prélèvement de surface, exploitation d'images satellitaires, utilisation de logiciels SIG).

La localisation et la description des sites d'intérêt et l'échantillonnage ont été menés à bien grâce à un stage de terrain de trois semaines en RDC. La caractérisation des échantillons a été réalisée via différentes techniques (pH, COT, XRF portable, éléments totaux et AA-EDTA) en Belgique à l'Université de Liège. Une collaboration avec Serge LANGUNU (Faculté d'Agronomie/UNILU) s'est déroulée au niveau de la prospection afin d'optimiser la précision de la cartographie.

1.3 Historique minier

Lubumbashi ne porte pas son surnom de « capitale du cuivre » pour rien. Au 16^e siècle déjà, le cuivre y était exploité par les populations locales sur les reliefs affleurant (Leteinturier et Malaisse, 1999). Des croisettes (petites pièces de cuivre) faisant office de monnaie témoignent de cette activité.

La prospection minière a débuté avec la colonisation belge dans les années 1870 et l'exploitation a commencé vers 1900 (Vennetier et Nzuzi, 1991). Six ans plus tard, l'Union Minière du Haut-Katanga (UMHK) fut fondée pour organiser ce secteur qui s'annonçait très prometteur. A Lubumbashi (anciennement Elisabethville), une usine de traitement du minerai de cuivre fut ouverte en 1911 pour répondre à la production de la Mine de l'Etoile, seule mine exploitée à l'époque (Vennetier et Nzuzi, 1991). C'est à ce moment que la ville a commencé à se développer, principalement à l'est de l'usine. Dans les années 1950, le Congo était le 4^e producteur mondial de cuivre avec une production avoisinant les 300 000 tonnes/an (Brion et Moreau, 2006). Après raffinage à Lubumbashi, les lingots obtenus étaient envoyés en Belgique où la Société Générale Métallurgique de Hoboken extrayait le cuivre, l'or et l'argent (Brion et Moreau, 2006).

C'est après l'indépendance, en 1966, que l'UMHK devient la Gécamines, nationalisée congolaise. Elle s'occupe de l'allocation, de la prospection et des concessions de minerais en RDC. A cette époque, la compagnie est le pilier économique du Zaïre (ex-RDC) (PNUD, 2004). Au cours du temps, des parts de la société ont été rachetées par diverses entreprises étrangères à cause d'une mauvaise santé financière globale. La corruption, la mauvaise gestion de la compagnie, la fermeture des voies de sortie des produits miniers vers le sud, l'explosion des prix du pétrole, les guerres du Shaba (ex-Katanga) et la catastrophe de Kamoto sont notamment responsables de cette situation économique (Maton et al., 2001). La

fonderie de la Gécamines de Lubumbashi produit une matte (composé sulfuré semi-métallique) contenant 70% de cuivre et riche en cadmium et autres métaux (Comtois et al., 2003). Le terril de Lubumbashi (figure 2) est composé de scories de rejet et est le reflet de l'exploitation minière intense qu'a connu la région. La STL (Société pour le Traitement du Terril de Lubumbashi) a été fondée pour y récupérer les métaux résiduels (Cu, Co, Zn, Ge) extractibles via d'autres techniques. La fonderie de la Gécamines est à l'arrêt depuis une quinzaine d'années suite à la faillite de la société (Kasamwa, 2002). Les principales usines actives sont la STL, Ruashi Mining (Afrique du Sud et Gécamines), South China Mining (Chine) et TFM (Tenke-Fungurume Mining – Chine et Gécamines).



Figure 2: terril de Lubumbashi (Levi, 2015)

La fameuse cheminée de la fonderie de la Gécamines mesure 152 m de haut (figure 2). Mise en service en 1911, elle a produit des fumées contenant des métaux et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (Forrest Group, 2018). Les poussières sont retombées sous formes de dépôts éoliens et ont contaminé particulièrement le quartier « Penga-Penga » renommé « Quartier Gécamines » (figure 1). Il est devenu un plateau érodé où la végétation a été détruite. Les vents dominants (nord-ouest) sont responsables de l'accumulation des dépôts éoliens dans cette zone.

2. Contexte géographique

Lubumbashi se situe au sud-est de la République Démocratique du Congo au sein de la province du Haut-Katanga (figure 3). Comme discuté précédemment, sa population, estimée à 2 millions d'habitants en 2009, est en pleine croissance. Elle atteindrait aujourd'hui les 3 millions d'individus. Il s'agit de la deuxième plus grande ville du pays après Kinshasa : elle s'étend sur près de 750 km² (CAID, 2016).

Son climat est de type subtropical humide avec une saison des pluies comprise entre mi-novembre et début mars et une saison sèche de mai à septembre (Leblanc et Malaisse, 1978). Octobre et avril sont des mois de transition. La pluviométrie annuelle moyenne est de 1230 mm, avec un maximum à 1770 mm et un minimum à 716 mm (figure 4) (Leblanc et Malaisse, 1978). Au niveau des températures, la moyenne annuelle est de 20°C avec un minimum de 4°C en juillet et un maximum de 33°C en novembre (figure 4) (Leblanc et Malaisse, 1978). Lubumbashi s'élève à 1230 m au-dessus du niveau de la mer, sur un plateau (Leblanc et Malaisse, 1978). Quatre principaux cours d'eau irriguent la région de Lubumbashi : la Luiswishi, le Lubumbashi, la Ruashi et la Muniama. Ils sont des affluents de la Kafubu se formant à la frontière zambienne (Leblanc et Malaisse, 1978).

Comme point intéressant de géomorphologie, nous retiendrons que les minéralisations et la lithologie sont responsables des nombreuses collines que l'on peut observer dans et autour de la ville, zones d'affleurement des roches cuprifères (figure 5) (Sys, 1960). C'est le processus d'érosion différentielle qui a façonné ces reliefs à partir de l'arc plissé. Un gradient de teneurs en cuivre est observé sur ces collines : les concentrations augmentent du piémont au sommet. Toujours résultat de l'érosion différentielle, les minéralisations, présentes sur les sommets sous forme d'écaillés quartzitiques, sont plus résistantes que les schistes des alentours.

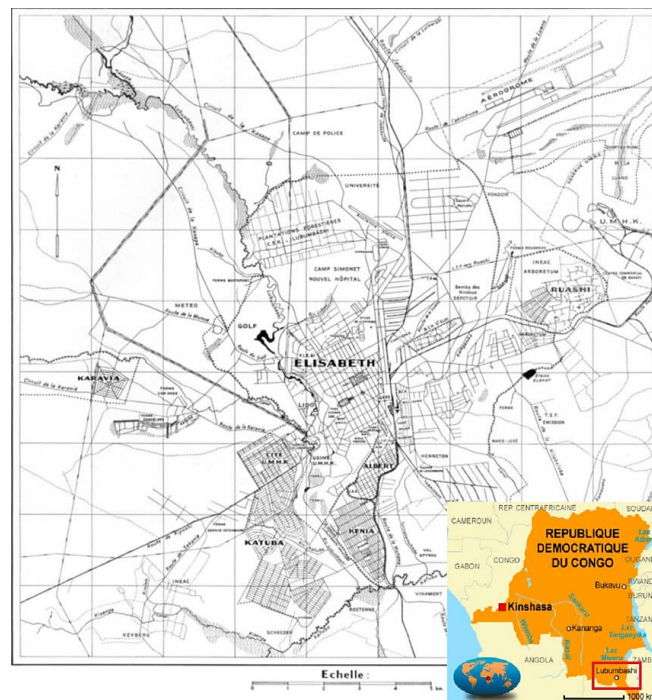


Figure 3: carte de Lubumbashi avec localisation des communes (modifié d'après Andres, 2008, d'après le cadastre de la ville, 1960)

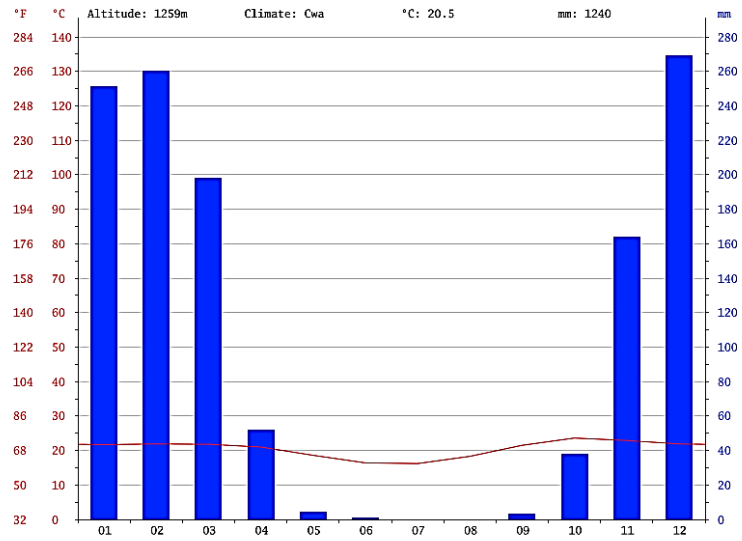


Figure 4: précipitations annuelles moyennes à Lubumbashi (climate-data, 2018)



Figure 5: collines de la région de Lubumbashi (Faucon et al., 2015)

3. Contexte géologique

3.1 Géologie de la région de Lubumbashi

Le super-groupe du Katanga constitue le soubassement rocheux de la région. Ces roches, datant de 550 à 900 Ma (Précambrien), correspondent à des sédiments déposés dans un vaste bassin sédimentaire coïncé entre le craton du Congo au nord et le craton du Kalahari au sud. Le Katanguien est composé de roches sédimentaires et évaporitiques dépassant les 5000 m d'épaisseur totale. Les groupes de Roan, de Nguba et de Kundelungu divisent le Katanguien (figure 6) (Dewaele et al., 2006). Ces formations sont soit fortement plissées et se situent dans les zones synclinales ou les dépressions, soit (sub-) horizontales et correspondent aux zones de résistances de la plateforme continentale face aux contraintes orogéniques lufiliennes (Cailteux et al., 1995). Le faciès horizontal est plus fréquemment rencontré que le faciès plissé.

KAROO ET KALAHARI				
	Groupe	Sous-groupe	Lithologie	
Protérozoïque	SUPER-GROUPE DU KATANGA	Kundelungu	Biano (Ku-3)	Shales et arkoses
			Ngule (Ku-2)	Shales dolomitiques, shales sableux, grès
			Gombela (Ku-1)	Shales dolomitiques, shales sableux, calcaires roses, tillite
		Nguba (Ng)	Bunkeya (Ng- 2)	Shales dolomitiques ou siltstones
			Muombe (Ng-1)	Shales dolomitiques ou sableux, dolomies ou calcaires, tillite
		Roan (R)	Mwashya (R-4)	Shales dolomitiques, dolomies, jaspe et roches pyroclastiques
			Dipeta (R-3)	Dolomies interstratifiées, grès argileux et grès dolomitiques
			Mines (R-2)	Dolomies, shales et siltstones dolomitiques
			RAT (R-1)	Grès argilo-dolomitiques, grès et pélites
				± 880 Ma
SOCLE KIBARIEN ET/OU PRE-KIBARIEN				

Figure 6: stratigraphie du Katanga (Kaya Muyumba et al. 2015, d'après Dewaele et al., 2006 et Kampunzu et al., 2009)

Quatre sous-groupes subdivisent le Roan (883-735 Ma): les Roches Argilo-Talqueuses (RAT), composées principalement de grès, le sous-groupe des Mines (dolomies et shales), le sous-groupe de Dipeta (dolomies et grès) et le Mwashya, constitué de shales dolomitiques et de roches évaporitiques (figure 6) (Dewaele et al., 2006). C'est dans les trois premiers sous-groupes que les minéralisations sont trouvées. Le Nguba inférieur correspond à une tillite conglomératique appelée « Grand Conglomérat » et représente une transition vers le groupe de Kundelungu. Ce dernier est composé de 3 sous-groupes (figure 6) : le Gombela (tillite conglomératique ou « Petit Conglomérat »), le Ngule (shales et grès) et le sous-groupe de Biano (shales et arkoses) (Dewaele et al., 2006). Ces dépôts de tillites témoignent d'une période continentale glaciaire. A Lubumbashi, le Paléozoïque, le Mésozoïque et le Cénozoïque n'ont pas été enregistrés à cause de cycles d'érosion successifs, résultant en une pénéplation du Précambrien. Le Quaternaire est présent et résulte du démantèlement de la pénéplaine (Sys, 1960).

L'orogénèse lufilienne, ayant eu lieu de 592 à 512 Ma, a plissé et faillé les séquences katanguiennes, menant à la formation d'un arc plissé. C'est dans ces failles que les minéralisations précipiteront, donnant l'arc cuprifère katangais (figure 7). Ce dernier contraste de la pénéplaine environnante par la surrection de collines. La minéralisation en cuivre et cobalt n'est pas encore totalement comprise. Un développement en plusieurs phases

expliquerait le caractère cupro-cobaltifère des roches du sous-groupe des Mines (Kaya Muyumba et al., 2015):

- Minéralisation syngénétique (inclusion de fragments minéralisés et non-minéralisé du continent dans la sédimentation) ultérieurement transformée en sulfures lors de l'induration des sédiments des formations du Roan ;
- Dissolution des métaux et reprécipitation de sulfures dans les fractures lors du métamorphisme orogénique ;
- Formation d'oxydes, hydroxydes, silicates et carbonates de Cu et Co par altération des sulfures à faible profondeur (< 100 m).

Les principaux minéraux primaires sont la chalcopryrite (CuFeS_2), la bornite (Cu_5FeS_4), la carrolite $[\text{Cu}(\text{Co}, \text{Ni})_2\text{S}_4]$, la chalcocite (Cu_2S) et la covellite (CuS). Ils sont remplacés dans la zone d'altération supergène par la malachite $[\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2]$, l'azurite $[\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2]$, le cuivre natif Cu, l'hétérogénite (CoOOH), la cuprite (Cu_2O) et le chrysocolle $[(\text{Cu}, \text{Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4.n\text{H}_2\text{O}]$ (Schuh et al., 2012).

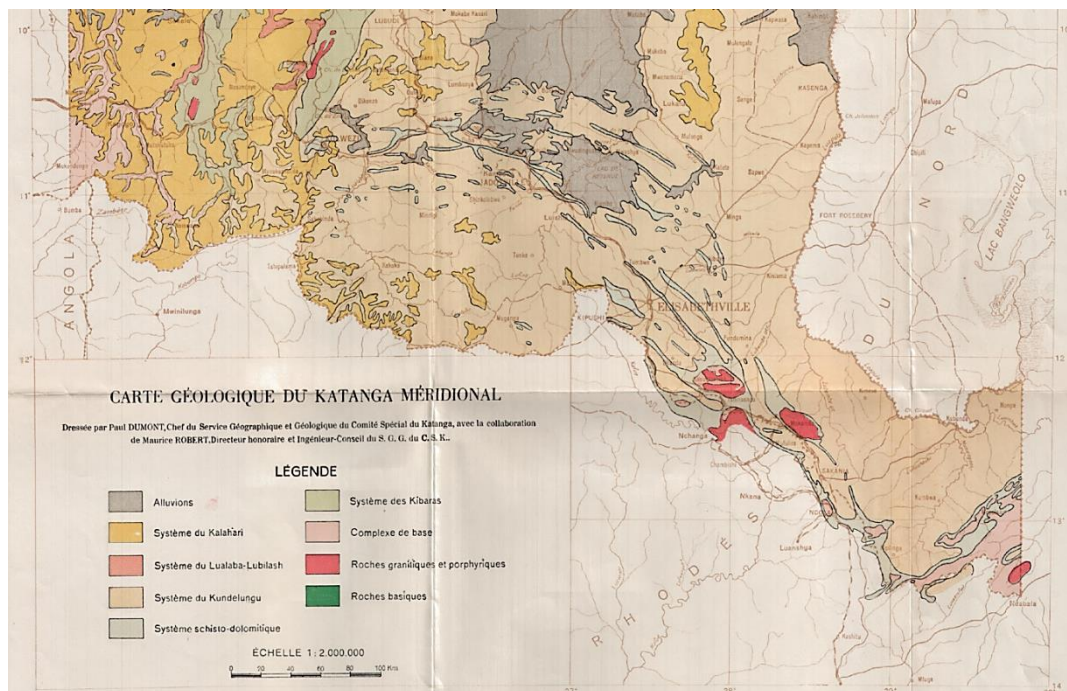


Figure 7: carte géologique du Katanga méridional (Kaya Muyumba et al., 2015, d'après Robert, 1956)

3.2 Pédologie

Trois types de sols distincts se répartissent sur la ville de Lubumbashi d'après la Base de Référence Mondiale pour les ressources en Sols (WRB) de la FAO (1998) : les alisols, les fuvisols et les gleysols.

Les alisols sont riche en argiles, acides et présentent généralement une toxicité aluminique. Une couche dense de kaolinite et l'absence de couche superficielle lessivée caractérise ces sols (WRB, 1998). Il s'agit de sols zonaux (propriétés influencées par les conditions climatiques). Ils rassemblent plusieurs catégories de sols identifiés par Sys et Schmitz (1959) à Lubumbashi. Sur la carte de l'INEAC (Institut National pour l'Etude du Congo

belge), il s'agit des classes A, Ag, B, C et Cg (figure 8). Ces classes font référence au type de matériel parental de ces sols qui n'est pas en place (allochtone). Le groupe A dérive des roches du sous-groupe de Mwashya (figure 6), le groupe B provient du Grand Conglomérat et du sous-groupe des Mines (figure 6) et les sols du groupe C se sont développés à partir d'un matériel provenant du Grand Conglomérat, des grès du sous-groupe de Mwashya et des roches siliceuses du sous-groupe des Mines (figure 6) (Sys et Schmitz, 1959). Ces sols sont rouges jaunâtres à jaunes brunâtres et présentent une structure en blocs. Ils occupent la majeure partie de la pénéplaine (plateaux). Il s'agit de sols profonds imperméables typiques des climats tropicaux. Ces matériaux parentaux ont une épaisseur supérieure à 1.2 m sauf pour les classes Ag et Cg, compris entre 0.2 et 1.2m d'épaisseur (Sys et Schmitz, 1959).

Les gleysols ont été repérés sur le bas des versants et les vallées. Il s'agit de sols gris argileux saturés en eau souterraine (hydromorphes) parsemés de tâches rouges, jaunes ou brunes. Ces taches résultent d'une oxydation du fer (dans les fractures) contenu dans ces sols initialement réducteurs. La couleur grise ou bleuté du sol est indicatrice de ce caractère et correspond souvent à un environnement marécageux. Ils présentent aussi une structure en blocs et sont profonds (Sys et Schmitz, 1959). Ils correspondent aux classes D, Dg, E, Eg et F sur la carte de l'INEAC (figure 8). Le groupe D est lié à un dépôt récent argileux ou argilo-sableux contenant plus de 50% de grains fins, le groupe E est hérité d'un dépôt récent argilo-sableux ou sablo-argileux contenant moins de 50% de grains fins et le groupe F a pour origine des sédiments calcaires non-identifiés (Sys et Schmitz, 1959). Ces sols proviennent donc d'un matériau alluvionnaire.

Les fluvisols se limitent aux vallées et sont des sols jeunes, liés à un matériau parent alluvionnaire. De couleur noire, ils sont argileux et ont un horizon de surface humifère. Leur pH est élevé et ils sont rapidement saturés en eau (Sys et Schmitz, 1959). Ils sont identifiés de la même manière que les gleysols sur la carte de l'INEAC (figure 8). Plus précisément, la classe D6 ne représente que des fluvisols.

Des plinthosols peuvent être présents dans certaines zones. Il s'agit de sols liés à des cuirasses latéritiques en voie de démantèlement. On les trouve sur des surfaces horizontales ou reliefs modérés (Sys et Schmitz, 1959). Il s'agit de la classe g de la carte de l'INEAC (figure 8).

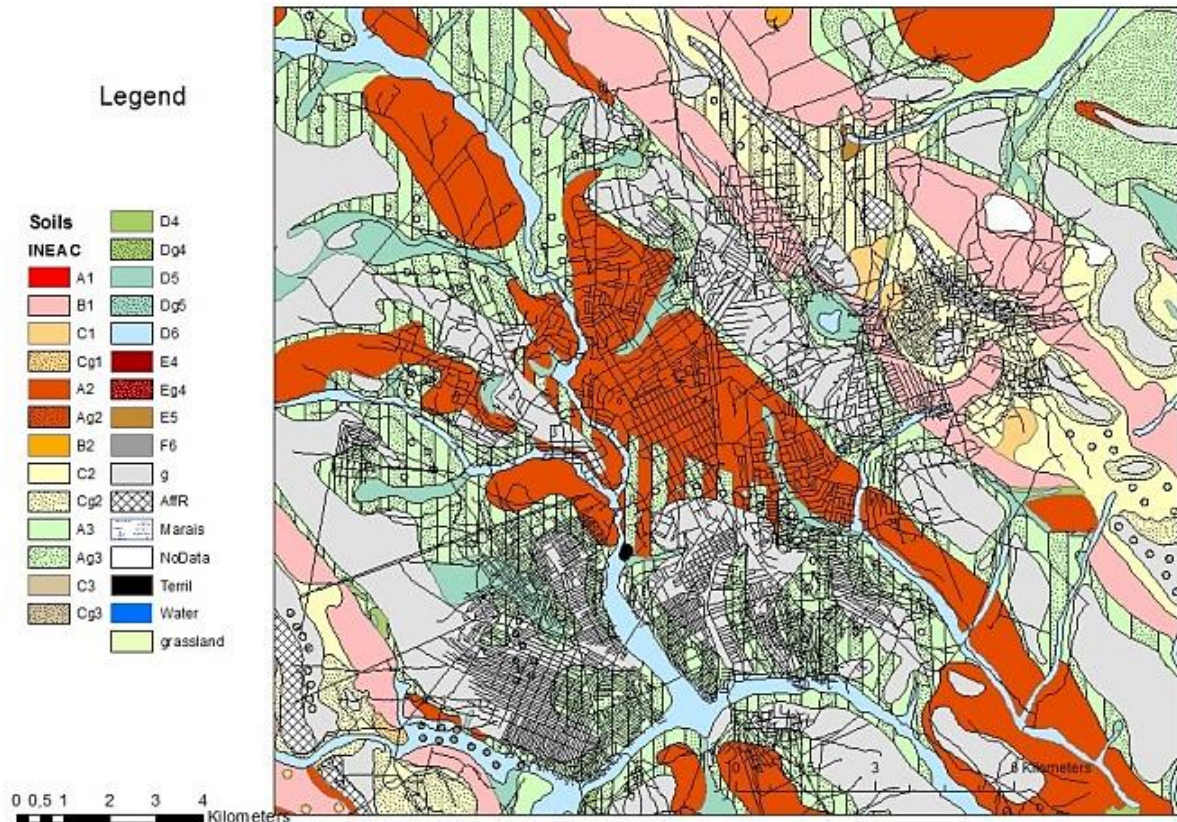


Figure 8: carte pédologique de Lubumbashi mise au point par l'INEAC (Sys et Schmitz, 1959)

3.3 Les éléments traces du sol – focus sur les métaux analysés dans ce travail

Cette partie permet d'introduire la contamination des sols de Lubumbashi et de faire le lien avec les systèmes sol-plante. De manière générale, certains éléments chimiques, les métaux par exemple, ne sont présents qu'en traces dans les sols (exprimés en ppm). Il arrive que des sols développés sur des roches à minéralisations métallifères héritent de grandes quantités de Cu, Co, Ni, Pb, Zn,... en fonction de la roche mère et des conditions climatiques et topographiques. Les teneurs varient entre les roches et les sols les surplombant en fonction de l'illuviation et de l'éluviation (figure 9) (Haubert et Pinta, 1971). Les éléments traces peuvent être présents de manière naturelle ou anthropique dans les sols.

Comme introduit ci-dessus, une majeure partie des éléments traces provient de la roche mère. Comme le présente la figure 9, les teneurs sont constamment redistribuées via la pédogenèse. Cette dernière est fonction du climat, de l'âge du sol, de la topographie, de la nature de la roche mère, du type d'environnement et des organismes du sol (Bourelhier et Berthelin, 1998). Cet apport correspond au fond pédogéochimique qui 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). Dans le même ordre d'idée, l'origine biogéochimique correspond à la libération d'éléments traces dans le sol à la mort des plantes, éléments précédemment absorbés par les racines (Baize, 1997). Il s'agit donc d'un cycle (figure 9). Une autre source naturelle est l'apport aérien : des particules fines (volcanisme,

aérosols marins) circulent dans l'atmosphère et se déposent sur les sols lors de pluies ou par gravité (Baize, 1997).

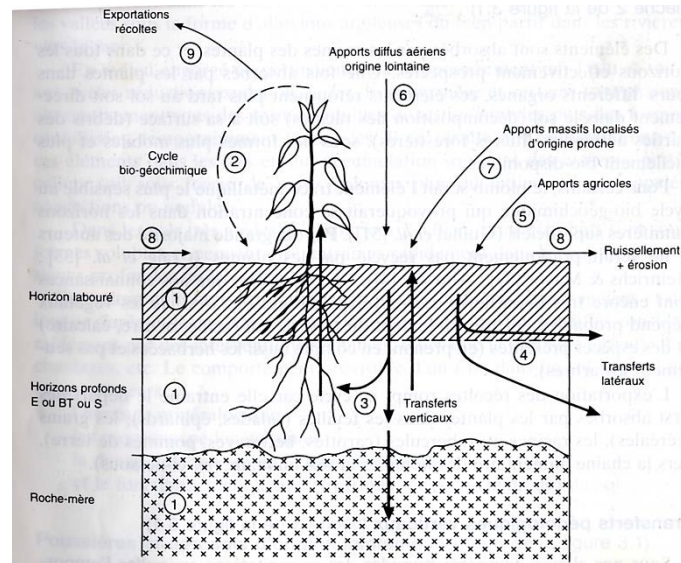


Figure 9: origines des éléments traces métalliques dans le sol (Baize, 1997)

Des transferts verticaux sont observés pour certains éléments. Le cuivre et le cobalt sont retenus dans les horizons de surface et s'y accumulent. Cela résulte d'une origine atmosphérique, d'une adsorption sur la matière organique de surface ou d'un prélèvement cyclique par la végétation (Alloway, 1990). L'érosion provoque un transfert horizontal des éléments traces des horizons de surface (Chassin et al., 1996). La bioturbation réalisée par l'activité des termites, plus anecdotique, entraîne des particules solides en profondeur (Kaya Muyumba et al., 2015).

L'origine anthropique peut avoir plusieurs composantes (Bourelrier et Berthelin, 1998 ; Quevy et al., 1990): apports atmosphériques (chauffage, production d'énergie, industries, gaz d'échappements), sites industriels et dépôts de déchets (manipulation et rejets métalliques), mines (érosion), agriculture (fertilisants, pesticides, fumiers).

3.3.1. Le cuivre

Le cuivre, tout comme le fer, a une affinité pour les sulfures. On les retrouve souvent dans les roches sous forme de chalcopryrite. Bien que les roches magmatiques possèdent les teneurs les plus élevées observées, le cuivre peut atteindre de fortes concentrations dans les shales et argiles. Au niveau anthropique, les rejets miniers sont les plus grosses sources, entraînant fréquemment une toxicité locale. Les fongicides utilisés en agriculture, la métallurgie du zinc et du plomb et les composts rejettent aussi du cuivre (Baize, 1997 ; Haubert et Pinta, 1971). On retrouve ces activités au Katanga. Comme expliqué précédemment, les teneurs en cuivre des sols varient en fonction de la composition des roches mères, du climat menant à différents types de sol, du pourcentage de matière organique du sol, d'argile et du pH. Le cuivre se retrouve en plus grandes quantités dans des sols basiques à neutres riches en matière organique. La norme AFNOR U 44041 pour les sols fixe une limite générale à 100 mg/kg. Cela dépend cependant très fort du contexte : des sols liés à des minerais de cuivre auront des teneurs bien plus importantes sans pour autant avoir une origine anthropique. Cela permet

donc de placer un repère de pollution dans des conditions standards (Baize, 1997). De même, la teneur moyenne des plantes varie entre 5 et 25 mg/kg mais varie fortement en fonction des espèces (Baize, 1997).

3.3.2 Le cobalt

Le cobalt se retrouve en grandes quantités dans les roches magmatiques (ultra-) basiques. Les roches sédimentaires ne contiennent en moyenne que 0.1-20 mg/kg de Co (Juste et al., 1995). Les sols ont des teneurs plus variables pouvant aller jusqu'à 300mg/kg. Les teneurs vont varier selon les mêmes paramètres que pour le cuivre. Le cobalt est très lié à la quantité de matière organique dans le sens où il est fixé à l'humus (Baize, 1997). Les argiles adsorbent aussi facilement le Co. Selon Sillanpää (1979), des sols mal drainés permettraient une meilleure extraction du cobalt par les plantes.

3.3.3 Le zinc

Encore une fois, ce sont dans les roches magmatiques et métamorphiques qu'on retrouve les plus grandes quantités de zinc. En particulier, les roches volcaniques basiques (basaltes, gabbros) contiennent de 70 à 130 mg/kg de Zn. Des roches sédimentaires telles que les loess ou les calcaires n'atteignent que des teneurs de 20 à 40 mg/kg (Haubert et Pinta, 1971). Au niveau des sols, les concentrations en zinc peuvent varier très fort : de traces à 900 mg/kg, avec une moyenne entre 50 et 100 mg/kg (Haubert et Pinta, 1971). Cet élément présente une affinité pour le soufre et forme fréquemment des gîtes minéralisés sous forme de sulfures, en association avec le fer, le plomb et le cuivre. En plus de l'activité minière prépondérante, le zinc peut avoir comme origine anthropique le trafic routier (Haubert et Pinta, 1971). Le zinc a une biodisponibilité élevée car très soluble, relativement aux autres métaux du sol (Juste et al., 1995). Tout comme le cobalt, il est adsorbé sur la matière organique et augmente donc en concentration parallèlement à celle-ci. Les plantes ont des teneurs moyennes en zinc variant de 20 à 100 mg/kg (Baize, 1997). La norme AFNOR U 44 041 fixe une limite à 300 mg/kg.

3.3.4 Le plomb

Cet élément est bien moins abondant que le zinc : maximum 20 mg/kg dans les roches volcaniques acides (granites, rhyolites) (Haubert et Pinta, 1971). Les sols ont des teneurs moyennes légèrement plus élevées (15-25 mg/kg). L'origine anthropique du plomb réside dans la combustion de l'essence au plomb, l'activité minière et certains pesticides (Haubert et Pinta, 1971). Présentant une très grande affinité avec la matière organique, le plomb est très peu mobile dans le sol et reste souvent confiné à l'horizon de surface (Juste et al., 1995). Un pH faible augmente la biodisponibilité du Pb en favorisant la désorption (Juste et al., 1995). 100 mg/kg de plomb est la limite de l'AFNOR U 44 041. Celle-ci est bien trop élevée pour détecter des anomalies.

3.3.5 Le cadmium

Ce sont les roches sédimentaires qui contiennent en moyenne les plus grandes quantités de cadmium. Les origines anthropiques du cadmium sont les engrais agricoles, le raffinage du zinc, du fer, de l'acier et du plomb, le trafic routier, etc. Comme le plomb, un pH bas augmente sa biodisponibilité (Alloway, 1990). La norme AFNOR fixée à 2 mg/kg peut détecter certaines anomalies.

4. Systèmes sol – plante cupro-cobaltifères

4.1 Mobilité des éléments en traces, biodisponibilité et phytodisponibilité

Au niveau des sols, on peut retrouver les éléments traces métalliques sous six formes (Baize, 1997) :

- Minéraux primaires (hérités) et secondaires (altération);
- Contenus dans des débris végétaux et animaux ;
- Adsorbés sur la surface d'échange des minéraux argileux et de la matière organique ;
- Dissous dans l'eau du sol ou présents sous forme de particules dans la solution ;
- Contenus dans des macromolécules organiques du sol.

Les éléments traces métalliques peuvent passer d'un compartiment à un autre en fonction de la chimie du sol (pH, oxydo-réduction), de sa teneur en eau, du degré d'aération,... Cette aptitude à se déplacer dans le sol et à changer de forme est appelée *mobilité* de l'élément (Baize, 1997). Cette mobilité peut varier au cours du temps en fonction des dissolutions/précipitations, sorptions/désorptions que subissent les éléments.

La biodisponibilité d'un élément est sa capacité à être prélevé par un être vivant à partir d'un compartiment du sol (Baize, 1997). Il s'agit de l'offre du sol qu'une espèce végétale peut facilement absorber. Pris dans l'autre sens, ce concept est appelé phytodisponibilité. Il s'agit de la quantité d'un élément qu'une plante peut absorber lors de sa croissance (Bourrelier et Berthelin, 1998). Ce processus implique la disponibilité de l'élément considéré dans la solution du sol et son transport via les racines. Cependant, toutes les plantes ne se comportent pas de la même façon face aux éléments traces métalliques et certaines peuvent absorber de plus grandes quantités que d'autres (Muyumba et al., 2015). A noter que la teneur totale d'un élément dans le sol est mesurée par extraction chimique de l'élément à l'acide fort ou fusion alcaline tandis que les teneurs disponibles sont obtenues via extraits liquides ou des résines dans le but de simuler l'absorption par un organisme (Celardin, 2002). Selon Bruemmer et al. (1986), des sols acides augmentent la quantité biodisponible de Cu et de Co. En effet, un pH bas favorise la solubilité des composés métalliques (excepté le molybdène), augmentant la quantité d'ions métaux en solution et les rend ainsi absorbables par les plantes (Giroux et al., 2008).

La phytotoxicité, i.e. la concentration d'un élément dans le sol à partir de laquelle la plante va subir des effets néfastes (Bourrelier et Berthelin, 1998), empêche la mesure de concentrations des éléments traces dans les plantes d'être représentative de la phytodisponibilité (Muyumba et al., 2015). Ces concepts sont importants à prendre en compte lorsque l'on s'intéresse à la contamination de la chaîne alimentaire par la composition des sols.

4.2 Végétation

70 % du territoire katangais est couvert par le miombo, une forêt claire dominée par le genre *Brachystegia* (Leteinturier et al., 1999). Une savane steppique est aussi présente sur les plateaux, dans les vallées et sur les affleurements de minerais métalliques (Baker et al., 1983).

Une végétation particulière s'est développée dans le sud-est de la République Démocratique du Congo grâce à l'abondance des éléments traces métalliques. Le Katanga possède une flore métalphyte (540 espèces), composée de graminées et d'espèces annuelles, dont 35 sont endémiques à la province. Ces dernières, principalement liée à la présence de cuivre et cobalt, se limitent souvent à un gisement particulier ou à quelques collines (Leteinturier et Malaisse, 1999). Cette flore cupro-cobalticole est très complexe vu le nombre de sous-espèces, ce qui en fait la plus diversifiée du monde (Brooks et al., 1992). On y trouve d'ailleurs des plantes hyperaccumulatrices de cuivre et/ou cobalt (Leteinturier et al., 1999). Au sein de cette flore particulière, Duvigneaud et Denayer-de Smet (1963) distinguent plusieurs types d'espèces :

- Métallo-résistantes (résistent à des teneurs élevées en Cu, présentes sur sols normaux et métallifères) ;
- Métallophiles (présentent une affinité pour un élément trace métallique) ;
- Métallophytes (espèces spécifiques ne poussant presque que sur les gisements).

Il apparait donc que c'est la composition du sol et, par extension, le type de roche mère qui va déterminer la flore locale (Duvigneaud, 1958). Une parfaite illustration de ce constat est la zonation de groupes de végétation distincts avec le gradient de cuivre (et de cobalt) du sommet des collines (plusieurs dizaines de milliers de mg/kg de Cu et plusieurs centaines de mg/kg de Co) aux plaines (plusieurs centaines de mg/kg de Cu et quelques dizaines de mg/kg de Co) (Duvigneaud, 1958). L'érosion hydrique des minerais est responsable de cette auréole de contamination. Huit groupes végétaux ont été identifiés de haut en bas (Duvigneaud et Denayer-de Smet, 1963 ; Leteinturier et al., 1999) :

- Savane boisée à *Xerophyta equisetoides* et pelouse aux sommets ;
- Steppe enrochée sur roches peu ou pas minéralisées ;
- Steppe à *Loudetia simplex* et *Monocymbium ceresiforme* sur les versants ;
- Savane arbustive à *Uapaca robynsii* en bas de versant peu contaminé.

La végétation dans le quartier Gécamines et aux alentours de la cheminée ne comprend que des espèces métallo-résistantes, métallophiles ou métalloytes, indicatrices de fortes teneurs en Cu et Co dans notre cas. L'espèce hyperaccumulatrice en Cu et Co *Haumaniastrum katangense* y est présente (Leteinturier et Malaisse, 1999). Ces sols sont considérés stériles pour une flore ordinaire.

5. Analyse chimique des roches et du sol de l'arc cuprifère katangais

5.1 Lithologie et composition des roches cuprifères

Décrivons maintenant plus précisément les formations cupro-cobaltifères de la région. C'est majoritairement le sous-groupe des Mines qui contient ces minéralisations. La figure 10, extraite de Kampunzu et al. (2009) et modifiée par Kaya Muyumba et al. (2015), présente les sous-groupes RAT et Mines. Les roches du sous-groupe RAT (> 235 m d'épaisseur) sont massives à grains fins (silts), riches en chlorite, dolomite et hématite, d'où leur couleur rose. Nous passons ensuite aux formations du sous-groupe des Mines. Après un premier membre de la formation de Kamoto similaire aux Roches Argilo-Talqueuses (RAT Grise), les trois autres membres de cette formation (D-Strat, RSF et RSC) sont des dolomies intercalées de matériaux terrigènes fins. La formation de Kamoto est épaisse d'environ 45 m. La formation suivante, appelée Shales Dolomitiques, mesure près de 220 m d'épaisseur. Ses deux premiers membres (SD1a et SD1b) sont une alternance de dolomie et de roches argileuses. Le troisième membre (SD2) est caractéristique et alterne des shales noirs avec des dolomies. Enfin, la dernière partie du sous-groupe, la formation de Kambove (130 m), est une dolomie tantôt massive tantôt interstratifiée avec une roche argileuse riche en talc, carbonates, dolomite et chlorite. Le Cu et le Co se trouvent dans la cinquantaine de mètres allant de la RAT Grise au Shale de Base (SD1a). Le gisement est divisé en trois parties : le gisement inférieur (RAT Grise, D-Strat et RSF), la zone de transition (RSC) et le gisement supérieur (SD1a et une partie de SD1b) (Kaya Muyumba et al., 2015). La figure 10 renseigne également sur la composition chimique de ces roches. Kampunzu et al (2009) ont comparé ces valeurs avec les compositions moyennes de la croûte terrestre (Taylor et al., 1985). Comme on peut s'y attendre dans le cas de dolomies, les teneurs en Ca et Mg sont élevées tandis que Fe, Al et K sont faiblement présents. Les concentrations varient notablement d'une formation à une autre. Le caractère interstratifié de la plupart de celles-ci explique les différences en fonction des échantillons prélevés dans l'une ou l'autre lithologie. On remarque que le potassium est plus élevé dans les shales, ce qui est dû à la présence d'illite et de muscovite dans leur composition. L'entière des formations de Kamoto et des Shales Dolomitiques sont riches en Cu (6.4 à 30.5 %). Le Co est particulièrement abondant dans les membres RAT Grise et SD1b (19.5 et 7.9 %). Le Ni est globalement élevé (jusqu'à 0.8 %) grâce à la présence de minéraux nickélifères comme la carrolite.

Sous-groupe	RAT (R-1)	Mines (R-2)							
Formation	R(1 à 3)	Kamoto (R2-1)				Shales dolomitiques (R2-2)			Kambove (R-2.3)
Membre	RAT Rouge	RAT Grise	D-Strat	RSF	RSC	SD1a (SDB)	SD1b (SDS)	SD2 (CMN)	
Lithologie	Siltstones massifs, chlorito-dolomitiques, hématitiques de couleur rose-lila, devenant plus sableux et irréguliers en profondeur	Siltstones massifs, chloritico-dolomitiques et gris	Dolomies plus ou moins silteuses et chloriteuses	Dolomies sili-cifiées finement stratifiées à stromatolites laminaires, interstratifiées avec des siltstones ou des shales dolomitiques	Dolomies massives, à stromatolites interstratifiées avec des siltstones dolomitiques	Shales dolomitiques	Dolomite silteuse et chloritique, dolomite grossière et shales dolomitiques à nodules et concrétions	Alternances de bancs de shales noirs, riches en carbone et faiblement dolomitiques et de bancs fortement dolomitiques à stromatolites	Dolomies variées : massives blanches à roses, finement interstratifiées avec des siltstones chlorito-dolomitiques, talqueuses, carbonatées
Épaisseur	> 235 m	10 m	1 m	8-10 m	20-25 m	10 m	80-85 m	130 m	190 m
Composition chimique									
N	20	19	12	14	21	27	14	38	Références
Majeurs (%)									UCC* PAAS ¹
SiO ₂	30-60	17-63	25-58	31-86	15-89	0-60	3-56	6-60	66 63
Al ₂ O ₃	6,5-16,1	2,89-16,6	0,5-14,4	0,6-5,0	0,3-7,0	0,2-16,4	0,6-16,9	0,7-16,5	15,2 18,9
FeO	0,03-3,3	0,16-2,14	0,18-2,17	0,03-8,0	0,1-3,8	0,1-3,0	0,1-2,2	0,3-6,2	5 7,22
MnO	0,0-0,28	0,01-0,33	0,01-0,14	0,01-0,17	0,01-0,24	0,01-1,04	0,01-0,78	0,01-0,23	0,08 0,11
MgO	12,0-20,8	7,8-28,4	6,7-28,7	3,3-25,6	1,8-18,0	1,1-21,9	7,5-20,6	1,1-20,2	2,2 2,2
CaO	0,2-15,7	0,03-17,8	0,06-18,4	0,1-19,8	0,2-27,3	0,1-30,9	0,05-30,2	0,04-28,3	4,2 1,3
Na ₂ O	< 0,5	< 0,1	< 0,2	< 0,5	0,1	< 0,5	0,1	0,1-0,6	3,9 1,2
K ₂ O	0,1-0,3	0,01-0,6	0,04-2,6	0,01-1,4	0,01-0,7	0,1-4,2	0,1-1,3	0,1-5,2	3,4 3,7
P ₂ O ₅	0,05-0,19	0,10-2,0	0,05-0,34	0,07-2,29	0,05-2,29	0,05-2,29	0,05-0,36	0,05-0,50	- 0,16
Éléments traces (mg.kg⁻¹)									
Cu	44-1.216	340-305000	2600-64000	5200-120000	382-210000	4330-170000	2000-58000	36-153000	25 50
Ni	13-533	5-5440	5-1790	5-8188	20-901	5-493	5-2625	5-901	20 55
Cr	38-128	5-63	5-88	5-34	5-61	5-103	5-88	5-136	35 110
Co	78-659	101-195400	82-12200	32-35000	574-32000	41-48000	25-79000	10-4556	10 23
Zn	5-72	8-334	5-85	5-83	5-373	11-273	5-60	5-142	71 85
Pb	2-147	3,8-30	2,4-19	1,8-26	4,7-40	2,2-24	4,9-10	0,7-30	- -

Figure 10: stratigraphie, lithologie et composition chimique des sous-groupes RAT et Mines (Kaya Muyumba et al., 2015, modifié d'après Kampunzu et al., 2009)

5.2 Composition des sols

5.2.1 Collines de l'arc cuprifère

Comme dit précédemment, ces collines sont les zones d'affleurement des minerais de cuivre (fig.5). Nous nous basons sur la synthèse bibliographique de Kaya Muyumba et al. (2015). La comparaison avec les teneurs moyennes de l'écorce terrestre est faite grâce à la figure 10. De manière générale, ces sols sont appauvris en Al et Fe et fortement enrichis en Cu et Co par rapport à la moyenne de l'écorce terrestre (figure 11). Le Mn est présent dans les mêmes proportions. L'amplitude de la variation pour Mn et Al est similaire à celle observée pour les roches des membres RAT alors que le Fe est plus élevé et se rapproche des shales des membres supérieurs (figure 10). Cette accumulation pourrait être due à la pédogenèse (Kaya Muyumba et al., 2015). La seconde partie de la figure 11 présente les quantités biodisponibles cette fois. Les différentes études présentent des ordres de grandeurs similaires. Colinet et al. (2007) ont travaillé sur un grand nombre de sites, dont des gisements Cd-Pb-Zn, d'où leurs résultats différents. Les éléments majeurs (Ca, Mg, K, P) ont des biodisponibilités variant de 1 à plusieurs centaines mg/kg de sol. Cela reflète les différences au niveau de la richesse trophique. Les sols des pentes des collines sont bien moins riches que les sommets. Les teneurs biodisponibles en Cu et Co sont proportionnelles à leurs quantités importantes dans ces sols. Le Cu varie de plusieurs dizaines de mg/kg à plusieurs dizaines de milliers. Le Co, relativement moins abondant, peut être absorbé par les organismes de 1 à plus de 1200 mg/kg.

	pH eau	C (%)	N (g.kg ⁻¹)	C:N	Teneurs totales (mg.kg ⁻¹)*				
					Cu	Co	Al ₂ O ₃	FeO	MnO
Saad et al., 2012 (N = 62, 0-10 cm)	5,0-6,6	1,0-7,9	0,02-0,42	16-44	300-70 400	40-16 000	23 000-12 500	10 000-55 000	100-2 100
Séleck et al., 2013 (N = 172, 0-15 cm)	4,6-7,8	1,0-10,1	0,07-0,59	13-22	-	-	-	-	-
Ilunga wa Ilunga et al., 2013 (N = 48, 0-40 cm)	4,6-6,5	0,5-9,0	0,04-0,61	8-18	-	-	-	-	-
Faucon et al., 2011*** (N = 210, 0-10 cm)	4,6-6,9	0,6-9,1	-	-	-	-	-	-	-
Colinet et al., 2007 (N = 75, 0-10 cm)	4,6-8,7	0,1-37	-	-	500-126 000	100-22 000	-	-	-
Teneurs biodisponibles AA-EDTA (mg.kg ⁻¹)**									
	Cu	Co	Ca	Mg	K	P	Cd	Pb	Zn
Saad et al., 2012 (N = 62, 0-10 cm)	23-8 200	2,2-365	8-794	15-260	11-180	-	0,01-1,0	0,4-60	0,6-35
Séleck et al., 2013 (N = 172, 0-15 cm)	29-10 136	2-927	10-2 680	11-1 175	6-210	2-499	-	-	0,3-7,8
Ilunga wa Ilunga et al., 2013 (N = 48, 0-40 cm)	57-24 665	0,4-93	6-552	26-356	17-264	9-676	0,01-0,29	0,4-7,3	0,2-9,9
Faucon et al., 2011*** (N = 210, 0-10 cm)	382-18 144	2-429	30-1 110	12-189	10-163	5-772	-	-	3-108
Colinet et al., 2007 (N = 75, 0-10 cm)	140-31 286	11-1 268	-	-	-	-	0,01-95	0,3-687	1,1-9 108

* : teneurs totales : mise en solution triacide à l'aide de HF + HClO₄ + HCl méthode NF X 31-147 — total contents: total solution using HClO₄, HF and HCl according to NF X 31-147 (AFNOR, 1996); ** : teneurs biodisponibles : extraction à l'acétate d'ammonium + EDTA à pH 4,65 — bioavailable contents: extraction with CH₃COONH₄ and EDTA at pH 4.65 (Lakanen et al., 1971); *** : données de base dont les moyennes sont reprises dans Faucon et al. (2011) — basic data with averages included in Faucon et al. (2011).

Figure 11: propriétés physico-chimiques de l'horizon de surface des sols des collines de l'arc cuprifère katangais (Kaya Muyumba et al., 2015)

5.2.2 Sols naturels

Passons à la composition des sols de la ville et des vallées et plateaux environnants. Les résultats discutés dans cette partie proviennent de la synthèse inédite de Shutcha et al. sur la pollution des sols de Lubumbashi. Il apparaît que ces sols sont acides à neutres (tableau 1), sableux à argileux en passant du plateau au fond de vallée. De même, la concentration en Al est plus élevée dans les vallées (Shutcha et al., inédit). Le Fe suit la tendance inverse, en lien avec les conditions oxydantes des plateaux et réductrices des vallées (hydromorphes). Ces teneurs en Al et Fe augmentent avec la profondeur alors que l'inverse est observé pour les éléments traces métalliques (Cu, Co, Pb, Zn) (tableau 1). Dans de nombreux cas, cet enrichissement en Cu et Co en surface est synonyme de contamination d'origine anthropique (apports aériens). Cependant, un fond géochimique élevé est présent naturellement dans l'environnement, comme c'est le cas pour les collines de l'arc cuprifère (figure 11).

Dans les plateaux, une différence nette, encore non-expliquée, a été observée pour les horizons profonds : les sols jaunes ont des teneurs moyennes en Cu et Co (110 et 22 mg/kg) plus élevées que les sols rouges (58 et 9 mg/kg, respectivement) (Shutcha et al., inédit). Concernant les horizons surfaciques, John (2009) a déterminé une limite naturelle maximale de 400 mg/kg pour le Cu et 50 mg/kg pour le Co. Enfin, Gillot (2008) et Maekelbergh (2012) ont étudié ces mêmes limites pour la biodisponibilité. Le Cu serait à 15 mg/kg et le Co à 2 mg/kg. Cependant, ces études ont porté sur des sols éloignés de Lubumbashi et ne sont pas représentatifs. Les teneurs disponibles en éléments traces métalliques de Lubumbashi sont encore à étudier.

Variable	N	Moyenne	CV	Min	Q1	Med	Q3	Max
Horizons de surface								
pH Eau	18	5,6	0,03	4,9	5,0	5,5	5,9	6,8
Fe_T	18	3,6	0,12	0,9	1,8	3,8	4,7	7,4
Al_T	18	5,8	0,09	1,9	4,5	5,9	7,0	10,7

Cu_T	18	187,1	0,14	20,0	103,8	191,3	217,5	455,5
Co_T	18	20,2	0,11	7,1	13,1	20,1	24,0	38,0
Pb_T	18	39,9	0,15	7,0	19,7	32,3	58,5	82,3
Zn_T	18	69,1	0,13	25,7	45,7	58,1	89,1	179,9
Horizons profonds								
pH Eau	36	5,3	0,01	4,6	4,9	5,3	5,5	6,2
Fe_T	36	4,2	0,09	0,8	2,7	4,0	5,4	10,2
Al_T	36	7,4	0,06	2,7	6,0	7,1	9,0	13,6
Cu_T	36	77,5	0,11	15,0	50,7	68,4	82,3	227,3
Co_T	36	17,9	0,09	5,7	10,5	16,6	22,3	42,9
Pb_T	31	34,4	0,09	2,0	25,5	31,8	39,7	74,8
Zn_T	35	33,4	0,06	16,0	26,1	29,9	38,6	77,9

Tableau 1: paramètres physico-chimique des sols naturels de Lubumbashi (modifié d'après Shutcha et al., inédit)

Pour faire le lien avec le chapitre sur la pédologie, nous allons donner quelques ordres de grandeurs de teneurs spécifiques des sols, tirées d'Andres (2008). Les alisols ont des concentrations naturelles variant de 116 à 220 mg/kg en Cu. Pour le Co, 12 à 25 mg/kg est enregistré en moyenne.

Les vallées et bas de versants sont caractérisés par des gleysols et fluvisols. Ils ont des teneurs moyennes naturelles aux alentours de 160 mg/kg en Cu et 20 mg/kg en Co (Andres, 2008).

5.2.3 Sols contaminés

Nous allons présenter l'exemple du quartier Gécamines, tristement célèbre pour sa forte contamination. Il se situe au nord-ouest de l'usine de la Gécamines, soumis aux vents dominants de la région (Figure 12). Les poussières déposées par la cheminée de l'usine depuis plus de 100 ans ont mené à une contamination métallique qui a progressivement détruit les écosystèmes de la zone. L'absence de végétation entraîne une érosion hydrique et éolienne accrue du plateau. L'anthropisation du site (récolte de terre pour la briqueterie et de quartz, trafic routier, habitations) favorise d'autant plus cette dégradation et le transfert des éléments traces métalliques. Deux plateaux (Gécamines et Karavia) et une vallée constituent le site.

Les sols de plateaux et de versants sont acides (pH allant de 4.9 à 5.6). Comme pour les sites naturels, Fe et Al augmentent en profondeur. Très contaminés, le Cu a une concentration maximale de 10 400 mg/kg et le Co atteint les 270 mg/kg, soit cinq fois plus que dans les sols naturels. La différence de teneurs entre horizons de surface et horizons profonds est extrêmement marquée, atteignant parfois des concentrations vingt fois supérieures en surface (Andres, 2008).

Les sols de vallées sont acides avec des pH variant de 5.3 à 5.9. L'aluminium en particulier augmente avec la profondeur tandis que le Fe reste verticalement constant. Ecore une fois, une nette différence est mesurée entre horizons de surface et horizons profonds (Andres, 2008).



**Figure 12: localisation du terril de Lubumbashi avec l'usine au nord de ce dernier.
Remarquons la zone dévégétalisée au nord-ouest du terril (d'après Google Earth, 2018)**

Autrement dit, les alisols ont des teneurs en Cu allant de 4950 mg/kg à 10 400 mg/kg et le Co varie de 90 à 270 mg/kg. Les gleysols et fluvisols présentent les concentrations les plus élevées, résultat d'une accumulation de par leur situation topographique. La teneur moyenne en Cu culmine à 26 400 mg/kg et 460 mg/kg de Co ont été mesurés (Andres, 2008).

La contamination du quartier est donc flagrante. Le chapitre suivant présente le travail déjà accompli en termes de cartographie des contaminations des sols de Lubumbashi. Il permettra de mieux visualiser la répartition de la pollution sur l'ensemble de la ville.

6. Synthèse des précédentes cartographies

Les premiers travaux liés à la contamination des sols de Lubumbashi remontent à la période 2005-2010. Il s'agissait de mémoire d'étudiants de l'UNILU ciblés sur les alentours de la cheminée de la Gécamines. En particulier, Mukobo (2007) a quantifié et cartographié la contamination des sols de cette zone (figure 13), avec pour objectif spécifique, la détermination de l'importance de la direction des vents. La perturbation des sols par érosion des plateaux et l'accumulation des sédiments contaminés dans les vallées n'a pas permis, dans un premier temps, de mettre en lien des teneurs plus élevées en éléments traces métalliques dans la zone sous les vents dominants.

Les mémoires de Kaya Muyumba (2008) et Lubalega (2009) ont permis de mettre en évidence la responsabilité de la Gécamines dans ces contaminations. Le premier a démontré que la face des termitières exposée aux fumées de la cheminée contenait plus d'éléments traces métalliques que la face opposée (figure 13). Le second a confirmé des contaminations atmosphériques des sols liées aux rejets de la cheminée. La thèse de Mpundu (2010) a partiellement élargi cette cartographie à l'échelle de la ville, épaulé par des mémoires de l'UNILU et de Gembloux Agro-Bio-Tech (ULg) (Faucon, 2009 ; John, 2009). Shutcha et al. (Inédit) ont compilé ces données avec celles de Mukobo pour évaluer la répartition spatiale de la contamination (figure 13 et figure 14).

Comme précédemment présenté, la figure 14 met en évidence la contamination en Cu de la région située au nord-ouest de la cheminée Gécamines, sous les vents dominants. On constate aussi des teneurs élevées du côté sud-est de la cheminée mais sur une zone bien plus restreinte. A l'extrême est de Lubumbashi, une contamination liée à la Mine de l'Etoile apparait également. Un élément important à noter est que ces teneurs élevées sont bien liées à l'activité minière et industrielle car l'ensemble des éléments traces métalliques présents dans ces sols (Cu, Co, Pb, Zn, Cd) se distribue spatialement de manière identique ce qui démontre que le Cu et le Co ont la même source que les autres métaux. Dans les sols non-contaminés aux alentours de la ville, ces éléments ont des sources différentes et se répartissent donc différemment. Ces teneurs élevées sont donc bien liées à l'activité minière et industrielle (Kaya Muyumba et al., 2015).

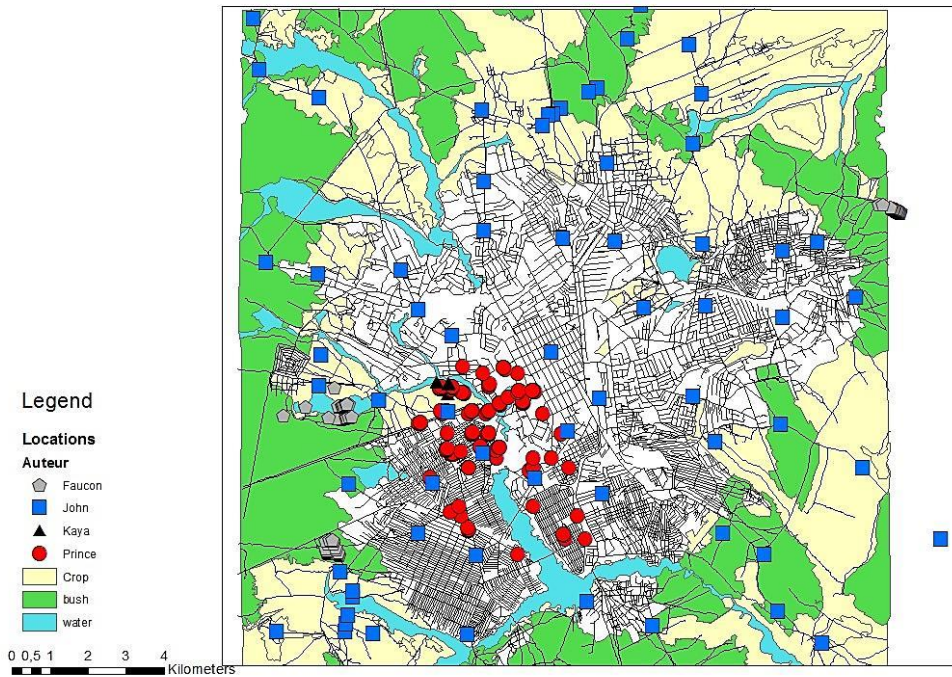


Figure 13: localisations des données sur la composition des sols de Lubumbashi (Shutcha et al., inédit)

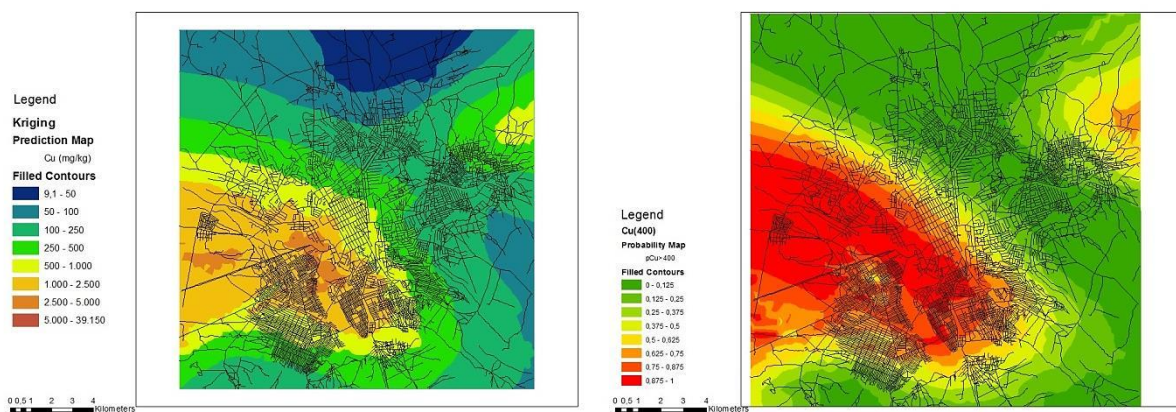


Figure 14: carte des teneurs en Cu disponible (gauche) et des probabilités de dépassement de la limite de teneur pédogéochimique (400 mg/kg) établie par John (2009) (gauche) (Shutcha et al., inédit)

Ce présent travail a pour objectif de densifier l'échantillonnage dans Lubumbashi et sa banlieue afin de confirmer la carte prédictive ci-dessus (figure 14).

7. Zones d'échantillonnage

Un échantillonnage par communes et quartiers a été réalisé. Lubumbashi est divisée en 7 communes, dont la commune Annexe correspondant à la périphérie de la ville (Figure 15). Chaque commune comprend plusieurs quartiers. Les échantillons ont été nommés en fonction de la commune où ils ont été prélevés, à part ceux provenant de la commune Annexe. Ces derniers ont reçu un nom correspondant au quartier d'origine. Tout d'abord, des points aléatoires d'échantillonnage ont été générés par commune (10-20 points en fonction de la surface de la commune) sur le logiciel QGIS. Nous avons ensuite vérifié qu'il n'y avait pas superposition avec les points déjà échantillonnés. Cela étant fait, nous nous sommes rendus sur le terrain avec les coordonnées de l'ensemble des points et avons procédé à un échantillonnage de 5 à 10 points par commune, toujours en fonction de leur taille. En fonction des lieux, l'échantillonnage se fit au point exact, décalé de quelques dizaines à quelques centaines de mètres ou fut impossible. Si nécessaires, les nouvelles coordonnées furent enregistrées. Il en résulte l'échantillonnage de 47 points (Figure 15), répartis sur les 7 communes. Nous avons favorisé l'échantillonnage dans des zones encore non-prospectées, dans la mesure du possible. En effet, l'urbanisation, la réticence des habitants ou encore la réalisation de cette campagne en utilisant les transports en communs ont été autant d'obstacles à un échantillonnage idéal. Nous allons maintenant présenter ces zones d'échantillonnage.

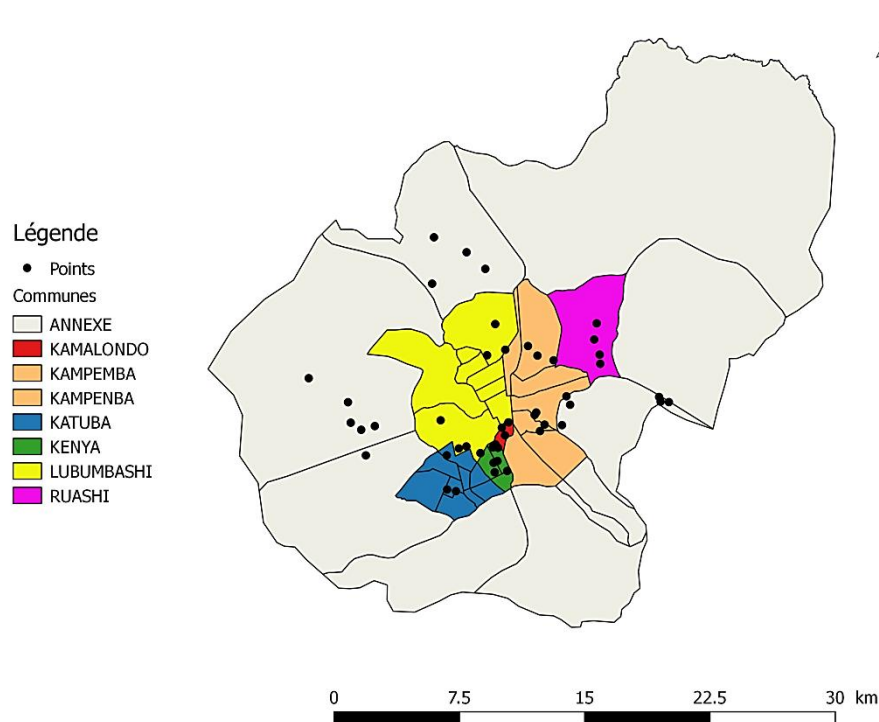


Figure 15: organisation administrative de Lubumbashi et sites échantillonnés

Un grand nombre d'échantillons ont été collectés dans des jardins de maison voire dans les potagers des parcelles. Certains proviennent de terrains vagues, nus ou végétalisés, ou encore de bords de route. Une surface latéritique est souvent présente à proximité des points et on

retrouve des clastes et nodules de latérite dans les sols. Les premiers millimètres de sol, riches en matière organique, ont été dégagés avant la prise des échantillons. Les 10 à 15 premiers centimètres de surface ont été prélevés pour ce travail. Un mot supplémentaire sur les potagers semble important : ces derniers sont cultivés dans la grande majorité des parcelles. Il s'avère que les propriétaires sont généralement au courant d'une contamination en éléments traces métalliques due à l'industrie minière de la région et, en particulier, la cheminée de la Gécamines. Cependant, la culture de certains légumes, fruits et tubercules leur fournit une certaine autosuffisance au niveau alimentaire qui permet de les soulager quelque peu financièrement. De toute manière, les marchés offrent des produits originaires d'autres potagers lushois ou de zones de cultures plus industrialisées mais toujours situées à Lubumbashi. Ces aliments sont donc également contaminés.

Le tableau 2 présente spécifiquement l'ensemble des échantillons.

Nom	Commune	Quartier	Environnement	Remarque
PK1	Annexe	Kisanga	Jardin	Influence du terril (flore)
PK2	Annexe	Munua	Jardin	Influence du terril (flore)
PK3	Annexe	Munua	Bord de route	Influence du terril (flore)
PK4	Annexe	Munua		Influence du terril (flore)
PK5	Annexe	Munua		Influence du terril (flore)
PK6	Annexe	Munua		Influence du terril (flore)
P1	Lubumbashi	Mampala	Terrain vague	Proche du terril
KT1	Katuba	Upemba	Potager	
KT2	Katuba	Musumba	Potager	
KT3	Katuba	N'Sele	Jardin	
L1	Lubumbashi	Mampala	Potager	
L2	Lubumbashi	Mampala	Potager	Proche du terril
L3	Lubumbashi	Mampala	Potager	
L4	Lubumbashi	Makutano	Bord de route	
L5	Lubumbashi	Gambella	Jardin	
L6	Lubumbashi	Gambella		
L7	Lubumbashi	Gambella		
KE1	Kenya	Lualaba	Jardin	
KE2	Kenya	Luvua	Jardin	
KE3	Kenya	Luvua	Jardin	
KE4	Kenya	Lualaba	Potager	
KM1	Kamalondo	Njanja	Bord de route	
KM2	Kamalondo	Njanja	Terrain vague	Proche du terril
KM3	Kamalondo	Njanja	Jardin	
KM4	Kamalondo	Njanja	Jardin	
KM5	Kamalondo	Njanja	Cour d'école	
R1	Ruashi		Potager	Proche de Ruashi Mining
R2	Ruashi		Potager	Proche de Ruashi Mining
R3	Ruashi		Potager	Proche de Ruashi Mining
R4	Ruashi		Potager	Proche de Ruashi Mining

N1	Annexe	Naviundu	Potager	
N2	Annexe	Naviundu	Potager	
N3	Annexe	Naviundu	Champs	Cuvette
N4	Annexe	Naviundu	Potager	
N5	Annexe	Naviundu	Chemin	
KP1	Kampemba	Kigoma	Potager	Proche d'une raffinerie
KP2	Kampemba	Kigoma	Chemin	Proche d'une raffinerie
KP3	Kampemba	Kigoma	Terrain vague	Proche d'une raffinerie
KP4	Kampemba	Bongonga	Jardin	
KP5	Kampemba	Bel-Air 2	Jardin	
KP6	Kampemba	Bel-Air 2	Chemin	
KP7	Kampemba	Bongonga	Jardin	
KP8	Kampemba	Bel-Air 2	Jardin	
KS1	Annexe	Kasapa	Jardin	
KS2	Annexe	Kasapa	Bord de route	
KS3	Annexe	Kasapa	Potager	Proche de la raffinerie CDM
KS4	Annexe	Kasapa	Champs	

Tableau 2: localisation des échantillons

Présentons maintenant plus en détail chaque commune échantillonnée.

7.1 Lubumbashi

La commune de Lubumbashi est, comme son nom l'indique, le centre névralgique de la ville. Il s'agit de la plus ancienne partie de la ville. Elle a perdu de sa superficie au cours du temps du à sa scission administrative avec Kamalondo et ensuite Kampemba (Figure 15). Elle est divisée en treize quartiers et huit points y ont été échantillonnés (Figure 16). Cette commune avait déjà été densément prospectée lors des travaux précédents (figure 13), par Mpundu notamment. C'est dans cette commune que se situe le terril. Un point provient d'ailleurs du quartier appelé « Penga-Penga », officiellement Mampala (figure 17). Pour rappel, ce quartier, situé au nord-ouest du terril, a été particulièrement contaminé par les éléments traces métalliques présents dans les fumées de l'usine. Les quatre autres échantillons proviennent du sud de la commune et se situent de l'autre côté du terril (figure 17). Une contamination liée à du ruissellement ou des rejets a également été observée dans cette zone (Shutchu et al., inédit). Les habitants cultivent pourtant dans leurs parcelles, malgré les teneurs en éléments traces métalliques très élevées (figure 14).

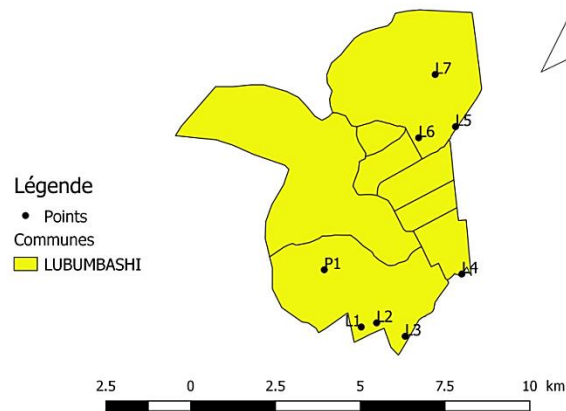


Figure 16: sites d'échantillonnage de Lubumbashi



Figure 17: site L2, avec le terrill en arrière-plan (gauche) et site P1, dont la végétation nettement moins développée reflète la pollution (bas à droite) et la proximité immédiate du terrill (droite en haut)

7.2 Kamalondo

Petite commune ne comptant que deux quartiers, Kamalondo fut la première commune créée au début du 20^e siècle. En effet, on décida de scinder la ville en deux : le centre-ville, Lubumbashi, réservé aux colons, et Kamalondo (ex-Quartier Albert), relégué aux autochtones (Musalula, 2010). A l'époque, elle était bien plus étendue qu'actuellement. Elle se situe au sud-est de la commune de Lubumbashi (Figure 15). Cinq sites ont été échantillonnés dans cette zone (Figure 18). Une influence importante du terrill sur les sols y est attendue également

(figure 14). La figure 19 met en évidence une des causes potentielles de transfert d'éléments traces métalliques dans la commune : les convois ferroviaires qui transportaient les stériles des mines jusqu'au terril. De nombreux débris de roches présentent une couleur verte « malachite » de surface, synonyme de cuivre oxydé. L'échantillon n'a pas été prélevé à proximité immédiate du chemin de fer car l'activité qui y a eu cours pendant des décennies mènerait à un biais trop élevé des teneurs en métaux par rapport au reste du quartier. Les potagers sont encore bien présents (figure 19).

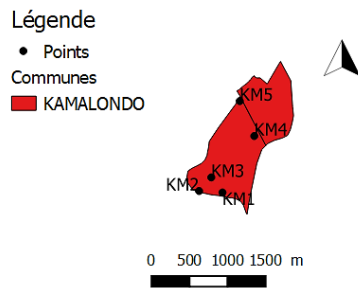


Figure 18: sites d'échantillonnage de Kamalondo



Figure 19: ancienne ligne de chemin de fer menant au terril, à proximité du site KM2 (gauche) et site KM4, avec potager (droite)

7.3 Kenya

La commune de Kenya se situe au sud de la ville. En 1929, elle fut scindée de la commune de Kamalondo (Musalula, 2010). Trois quartiers la composent et quatre échantillons y ont été prélevés (figure 20). D'après la figure 14, une contamination importante toucherait cette commune. Tout comme Kamalondo et le sud de la commune de Lubumbashi, un transfert par ruissellement, transport de stériles ou encore apports éoliens (limités aux alentours immédiats

du teruil pour la zone sud-est) en seraient responsables. Comme toujours, la culture vivrière est fréquente (figure 20).



Figure 20: sites d'échantillonnages de Kenya (gauche) et site KE4 (droite)

7.4 Katuba

Située au sud-ouest de la ville, la commune de Katuba se situe dans la zone d'influence du teruil (figure 14). Assez peu d'échantillons avaient été prélevés dans cette zone lors des études précédentes. Trois points viennent de cette commune : en particulier, KT2 et 3 ont été échantillonnés dans une zone encore non-prospectées (centre-sud de la commune) car difficile d'accès. Cette commune est la plus densément peuplée mais aussi une des plus pauvres de Lubumbashi. Les habitants sont assez réticents à autoriser un prélèvement dans leur parcelle. La figure 21 illustre la proximité du teruil. Katuba a été fondé en 1950 pour répondre à la croissance démographique de la ville (Musalula, 2010). Les potagers sont visibles partout, malgré une contamination du sol très probable (figure 22).

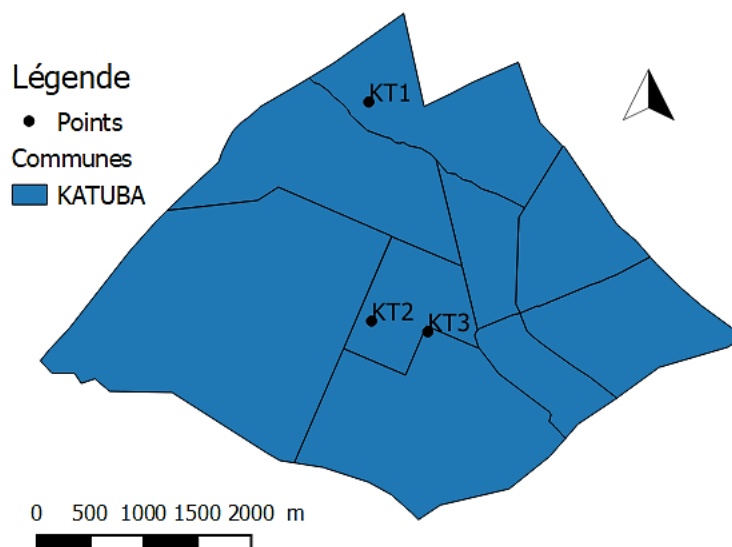


Figure 21: sites d'échantillonnage de Katuba



Figure 22: vue sur le terril depuis le quartier Katuba (gauche) et site KT1 (droite)

7.5 Kampemba

Fondée en 1972, cette commune est également issue de la scission avec Lubumbashi (Musalula, 2010). Elle se situe à l'est de la ville et compte neuf quartiers. Relativement peu échantillonnée dans les travaux précédents, huit échantillons sont issus de cette zone (Figure 23). Bien qu'elle soit à priori moins concernée par la contamination en provenance du terril (figure 14), une raffinerie des produits bruts de l'industrie minière se situe sur le territoire de Kampemba (Figure 15). L'analyse des échantillons renseignera sur une potentielle pollution locale en éléments traces métalliques. De plus, les points KP3 et KP4 proviennent d'une zone fortement industrialisée. Les teneurs en métaux pourraient avoir une origine différente de l'activité minière. Par ailleurs, cette commune est fortement polluée par des décharges à ciel ouvert et le charriage de déchet par les inondations et les fortes pluies (figure 24). Comme dans les autres zones, des potagers sont visibles dans la plupart des parcelles (figure 24).

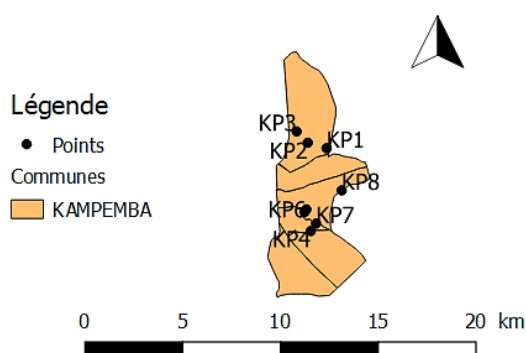


Figure 23: sites d'échantillonnage de Kampemba



Figure 24: site KP1 (gauche) et cas de pollution de la commune de Kampemba (droite)

7.6 Ruashi

Tout comme Katuba, cette commune fut créée en 1956 pour répondre aux besoins de la croissance démographique (Musalula, 2010). Elle est localisée au nord-est de Lubumbashi (Figure 15). Encore une fois, peu d'échantillons étaient originaires de cette zone lors des études antérieures (figure 13). Quatre échantillons y ont été prélevés (Figure 25). Comme son nom l'indique, la commune est le siège de la mine de Ruashi (communément appelée « Ruashi Mining »). Le site R1 est d'ailleurs en bordure immédiate des tailings de la mine (figure 26). Des potagers sont pourtant entretenus partout dans la commune jusqu'à la base des stériles (figure 26).

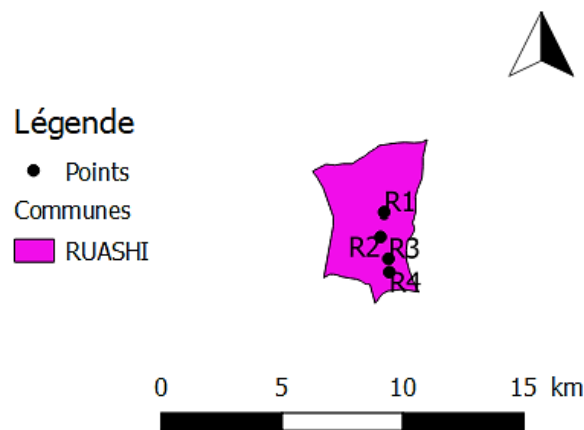


Figure 25: sites d'échantillonnage de Ruashi



Figure 26: site R2 (gauche) et barrages à tailings de la mine de Ruashi (droite dans le fond)

7.7 Annexe

Cette commune extrêmement vaste (Figure 15) forme une ceinture autour du centre-ville. Elle fut officialisée en 1957 en raison de la démographie explosive de la ville. Essentiellement rurale, elle compte 10 quartiers (Musalula, 2010). En raison de sa difficulté d'accès et sa superficie, très peu de prospection y a été effectuée dans les travaux précédents (figure 13), en particulier dans les quartiers ouest et nord. Quinze échantillons ont été collectés dans les quartiers Kasapa, Munua, Kisanga et Naviundu (Figure 27).

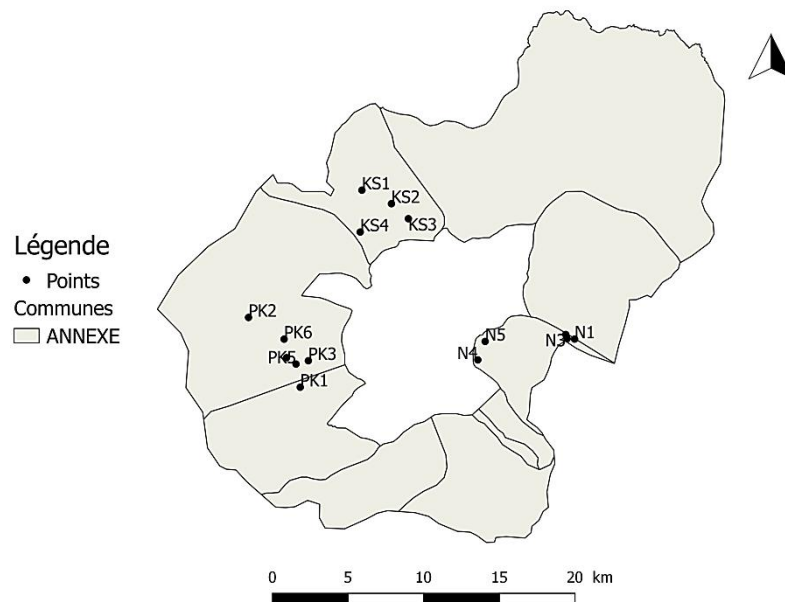


Figure 27: sites d'échantillonnage de la commune annexe

Les sites de Munua et Kisanga (PK1 à PK6) ont été nommés d'après le « Plateau Karavia », mentionné dans le chapitre sur la composition des sols. Ce plateau reprend une partie des deux quartiers, situés à l'ouest de Lubumbashi. Une flore cupricole, à dominance de *Haumaniastrum katangense*, est omniprésente dans cette zone (figure 28), encore

relativement peu urbanisée. Cela est un indicateur infaillible d'une contamination élevée en Cu et/ou Co. Le plateau Karavia se situe d'ailleurs au-delà de Penga-Penga, au nord-ouest de la cheminée Gécamines, et a donc reçu les rejets éoliens de cette industrie durant des décennies. La figure 14 confirme cette pollution. Le site PK2 est le plus éloigné de la cheminée, dans une zone complètement inexplorée jusqu'à présent concernant la contamination en éléments traces métalliques. Nous verrons si la pollution y est tout aussi intense.



Figure 28: site PK3, avec espèces cupricoles (gauche) et végétation éparse du plateau (droite)

Le quartier Kasapa se situe au nord-ouest de la ville. Il compte quatre points échantillonnés (Figure 27). Le site KS3 est proche de la raffinerie CDM (Congo Dongfang international Mining) (Figure 15). Les analyses révéleront si cette usine contamine la zone.

Les cinq échantillons du quartier Naviundu, à l'est de Lubumbashi, sont scindés en deux zones : N1, N2 et N3 à l'extrême est du quartier et N4 et N5 à l'extrême ouest (Figure 27). La première zone n'a jamais été sujette à une étude de contamination. Le site N3 se situe dans une cuvette naturelle occupée par des champs (figure 29). Il sera donc intéressant de déterminer s'il y a contamination dans cette zone, concentrant les métaux du sol. Ce quartier en particulier possède de nombreux potagers et champs (figure 29).



Figure 29: sites N3 (gauche) et N2 (droite)

8. Techniques d'analyses et résultats

Les 47 échantillons ont subi les analyses suivantes : pH, carbone organique total (COT), spectrométrie de fluorescence X pour les éléments majeurs (XRF), mesure de la concentration en éléments extractibles par AA-EDTA et mesure des éléments totaux (Cd, Cu, Zn, Co, Pb, Mg, Mn, Al, Fe, Ca, Na, K). Chaque échantillon a été divisé en deux parties : l'une n'ayant pas subi de préparation (pour le pH, les éléments totaux) et l'autre tamisée à 200 μm (pour le COT et la XRF).

8.1 pH

Après avoir tamisé (2 mm) 20 g d'échantillon, la terre est mise à l'agitation dans 50 ml de KCl 1N pendant deux heures. Dix minutes de centrifugation sont ensuite nécessaires avant de mesurer le pH du surnageant avec un pH-mètre (Baize, 2000).

Le pH des sols de Lubumbashi varie de 3.9 à 7.5. Les échantillons prélevés à Kasapa révèlent un sol acide ($4.04 < \text{pH} < 4.68$). Le plateau Karavia présente également des sols à pH faible ($4.07 < 5.62$). Le quartier Naviundu enregistre des pH s'étalant de 3.95 à 4.36 avec une exception pour le point N5 (6.71). Étonnamment, le seul échantillon de Penga-Penga n'est pas acide (6.88). Les communes de Lubumbashi, Kenya, Kamalondo, Katuba, Kampemba ont des sols non-acides ($5.5 < \text{pH} < 7.5$). Le point KP8 a un pH de 4.44. La commune de Ruashi a un pH intermédiaire entre celui de la commune annexe et les autres communes ($4.52 < \text{pH} < 6.32$). L'ensemble des résultats de pH est donné dans le Tableau 3.

8.2 Carbone organique total (COT)

La méthode de Springer-Klee modifiée est ici appliquée. Après un broyage à 200 μm , 1 g d'échantillon est oxydé par une solution 1M de bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) dans un bain acide ($\text{H}_2\text{SO}_4 - 56\%$). La réaction est catalysée en chauffant. Le surplus d'oxydant est titré par du sel de Mohr ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) avec présence de diphénylamine comme indicateur de la fin de réaction (virage du violet au vert foncé). Du fluorure de sodium (NaF) est également ajouté en tant que complexant pour empêcher le virage de l'indicateur avant que la réaction ne soit complète (Baize, 2000).

Le contenu en carbone des sols de Lubumbashi est assez variable : entre 0.5 et 4.5% de COT (Tableau 3), autant dire de très faibles quantités à des sols riches en matière organique. En général, le contenu en carbone augmente avec le pH mais ce n'est pas toujours le cas (KS1, PK5, P1,...).

8.3 XRF

Après avoir tamisé à 200 μm , les échantillons ont été conditionnés dans des capsules agréées pour l'analyse à la XRF portable. La poudre bombardée de rayons X réémet de l'énergie sous forme, entre autres, de rayonnement X. Ce spectre de réémission X est directement lié à la composition chimique de l'échantillon. En l'analysant, on peut déterminer la concentration massique en éléments majeurs (SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3) (Beckhoff et al., 2006).

Un sol acide possède des concentrations élevées en aluminium si une source de cet élément est présente (Uehara et Gilman, 1981). De manière générale, cela est vrai pour les sols de Lubumbashi : les sols à pH faible contiennent les plus grandes quantités d'Al (15-20% contre

8-12% dans les sols non-acides). Cependant, des sols non-acides peuvent contenir 15 % d'Al₂O₃ aussi (Tableau 3). Comme précédemment expliqué, un pH bas favorise la concentration en métaux dans les sols (Bruemmer et al., 1986) : ainsi, de plus grandes concentrations en Fe sont trouvées dans les sols acides (8-10% alors que 3-6% dans les sols non-acides).

ID	pH (KCl)	COT	Eléments majeurs XRF		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
		g/100g	%		
KS1	4,04	2,3	44,5	20,7	10,6
KS2	4,02	1,1	46,6	17,2	9,6
KS3	4,68	1,0	51,5	15,5	8,0
KS4	4,68	1,7	65,0	12,7	2,7
KE1	7,38	2,6	54,7	12,0	6,1
KE2	6,96	4,1	46,8	9,9	6,3
KE3	7,43	1,3	59,1	15,1	3,9
KE4	6,94	3,5	58,6	10,4	5,9
KM1	6,37	2,0	64,1	10,0	5,1
KM2	6,27	6,1	55,2	9,7	5,9
KM3	7,13	2,5	59,0	10,9	4,9
KM4	7,52	2,2	60,1	9,2	5,6
KM5	6,52	1,4	61,7	10,7	5,9
KP1	6,67	1,0	57,3	15,1	4,4
KP2	7,42	1,6	68,7	10,2	3,7
KP3	7,60	1,8	54,1	14,1	5,6
KP4	6,79	1,3	64,6	12,2	3,0
KP5	6,89	1,3	60,6	14,4	2,6
KP6	5,66	0,9	62,0	16,0	1,6
KP7	7,30	2,7	62,1	10,8	3,6
KP8	4,44	1,6	55,2	17,0	6,0
KT1	7,32	2,9	59,1	10,8	3,4
KT2	7,71	2,3	52,2	14,2	5,7
KT3	7,31	4,5	56,1	9,8	5,3
L1	7,31	2,6	66,7	6,8	3,3
L2	7,64	3,3	61,5	8,6	4,1
L3	6,99	2,9	57,5	7,9	5,1
L4	6,38	3,5	50,3	12,5	6,3
L5	7,53	1,3	65,6	9,9	4,6
L6	7,44	1,7	62,8	15,1	2,6
L7	7,49	1,7	56,7	14,0	5,7
N1	3,95	0,9	44,2	19,4	8,9
N2	4,69	1,6	46,9	21,6	8,4
N3	4,89	2,3	61,1	13,7	3,7
N4	4,36	0,8	54,4	18,1	4,4
N5	6,71	1,3	72,0	8,4	4,1
P1	6,88	0,7	68,8	9,3	2,7
PK1	4,57	2,5	67,8	10,4	2,6
PK2	5,08	1,8	48,2	20,0	7,0
PK3	5,62	3,9	65,4	10,0	3,9
PK4	4,07	1,4	47,5	18,1	9,3
PK5	4,50	3,1	48,9	16,9	6,0
PK6	4,93	0,5	58,9	13,7	6,6

R1	5,61	1,2	44,0	17,8	9,7
R2	6,32	1,0	58,0	15,3	6,6
R3	4,52	0,9	50,0	19,4	7,1
R4	6,10	1,0	47,2	21,2	7,1

Tableau 3: pH, contenu en carbone et analyse XRF des échantillons

8.4 Eléments extractibles à l'EDTA

L'EDTA (acide éthylènediaminetétraacétique) est un puissant agent liant formant des complexes notamment avec les métaux en solution. L'échantillon est plongé 30 min dans une solution de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ + EDTA à pH 4.65. Après formation des complexes, les teneurs en métaux sont mesurées par absorption atomique dans les extraits acétate-EDTA (Irene et Yang, 1999).

Les concentrations en K, Mg, P et Ca sont ici données à titre d'information (Tableau 4). Elles dépendent du type de roche mère ayant donné naissance au sol échantillonné.

Le Cu atteint des sommets dans certaines zones (Tableau 4). Selon la limite naturelle établie par John en 2009 (400 mg/kg) pour les sols de Lubumbashi, une pollution en Cu est nette dans les communes de Kenya, Kamalondo (KM1 et KM2 très élevés), Lubumbashi (L2, L3 et L4 très élevés), le quartier Penga-Penga et le plateau Karavia (PK1, PK3 et PK5 très élevés).

Le cobalt est nettement moins représenté dans les horizons de surface de Lubumbashi : pas plus de 40 mg/kg n'ont été trouvés dans les échantillons. De telles concentrations sont cependant élevées pour cet élément vu que John (2009) fixe une limite naturelle *maximale* de 50 mg/kg. Il s'agit du quartier Penga-Penga et de certains points de la commune de Kamalondo (KM2 et KM5) (Tableau 4).

Concernant le cadmium, de très faibles concentrations sont déjà synonymes de pollution : la norme AFNOR situe la limite naturelle moyenne à 2mg/kg. Or, certains échantillons dépassent les 10 mg/kg. Le point KE4 de la commune de Kenya, les échantillons KM1 et KM2 de Kamalondo, un point de Kampemba (KP3), 2 échantillons de Katuba (KT1 et KT3), L1, L2, L3 et L4 de la commune de Lubumbashi, le quartier Penga-Penga et 2 points du plateau Karavia présentent une pollution en cadmium (Tableau 4).

Même en se référant à la concentration maximale naturelle du plomb (120 mg/kg) donnée par John (2009), deux échantillons dépassent largement cette limite : 1500 mg/kg pour KP2 et 505 mg/kg pour L7. Nous pouvons aussi mentionner KM1, L2, L3, L4, Penga-Penga, PK3 et PK5. Ces derniers points sont loin d'atteindre des pics de concentrations comme KP2 et L7 mais dépassent la norme, déjà jugée trop élevées (Tableau 4).

Les teneurs en zinc dépassent les 200 mg/kg établis par John (2009) pour douze échantillons. Les communes de Kenya, Kamalondo, Kampemba, Katuba et Lubumbashi sont concernées.

Il apparaît que ce sont en général les mêmes échantillons et, par extension, les mêmes communes qui ont un problème de pollution. Comme attendu, le quartier Penga-Penga et le plateau Karavia sont presque concernés à chaque fois. Certains échantillons de Kenya, Kamalondo, Katuba et Lubumbashi dépassent aussi largement les limites naturelles pour ces métaux. Seuls les quartiers Kasapa, Naviundu et la commune de Ruashi semblent épargnés.

ID	Eléments extractibles AA-EDTA								
	P	K	Mg	Ca	Cu	Co	Cd	Pb	Zn
	mg/100g				mg/kg				
KS1	0,9	19,7	7,2	16	46	2,3	0,25	7,8	8,0
KS2	0,3	7,7	5,6	20	21	0,4	0,10	3,1	1,8
KS3	0,5	13,6	7,7	33	131	8,9	0,21	5,0	10
KS4	1,0	3,2	12,0	72	77	1,8	0,52	10	5,7
KE1	47,1	85,9	53,6	897	434	3,4	2,40	56	282
KE2	61,9	130,6	105,9	1337	391	3,4	2,01	38	354
KE3	18,6	70,9	23,8	268	279	9,5	2,31	38	75
KE4	26,2	19,9	28,6	545	708	4,6	9,05	100	657
KM1	29,2	11,5	10,4	189	1761	12,1	8,85	271	82
KM2	33,9	21,8	19,5	425	3135	24,1	12,75	121	726
KM3	76,2	65,2	44,6	1185	394	4,5	2,12	44	306
KM4	32,3	55,9	47,9	721	243	5,9	1,47	41	106
KM5	4,5	22,1	12,8	151	403	21,1	2,19	39	85
KP1	3,0	12,8	13,5	143	100	5,8	0,40	15	23
KP2	7,8	6,5	11,7	362	289	17,7	1,55	1500	66
KP3	5,8	15,3	26,6	567	337	12,0	6,30	140	435
KP4	5,7	32,4	15,4	192	150	3,0	0,54	29	53
KP5	21,5	44,8	15,9	227	258	7,1	1,72	31	109
KP6	1,7	15,4	9,7	79	120	2,4	1,76	5,5	46
KP7	26,4	8,6	48,7	735	113	2,7	1,35	33	273
KP8	8,4	3,7	24,0	125	41	1,0	0,62	4,3	9,2
KT1	31,9	77,5	60,1	1263	582	4,7	4,75	88	214
KT2	14,3	120,8	46,7	1595	118	1,8	1,02	30	98
KT3	56,1	115,8	99,4	1418	593	10,8	4,30	79	786
L1	26,1	41,4	44,2	723	853	9,5	4,75	83	281
L2	17,5	48,5	71,6	974	1759	15,7	8,75	170	302
L3	50,4	99,6	55,9	687	982	9,4	6,75	151	343
L4	33,9	28,5	27,0	476	1088	16,0	9,00	169	100
L5	25,6	11,3	16,2	326	205	8,7	0,88	36	71
L6	10,8	17,7	14,6	395	165	2,9	0,78	19,0	29
L7	22,4	63,8	39,8	608	80	5,1	0,88	505	54
N1	0,5	5,9	1,7	6	16	1,4	0,07	3,5	1,2
N2	0,7	21,3	9,2	55	26	1,9	0,34	6,7	4,2
N3	0,8	15,4	25,4	123	80	5,4	0,26	4,9	4
N4	0,8	11,1	4,9	77	23	0,6	0,19	5,1	7,0
N5	3,3	14,8	9,6	130	104	5,1	0,59	13	20
P1	10,7	13,2	8,9	113	2096	40,6	7,10	180	80
PK1	3,5	3,6	1,8	17	1118	3,2	1,00	135	27
PK2	0,9	16,2	14,9	101	311	6,1	1,79	33	27
PK3	12,5	9,0	4,6	136	2092	9,8	3,70	267	51
PK4	0,7	5,7	4,6	13	389	2,6	0,44	42	20
PK5	1,9	12,9	5,9	38	999	11,5	1,31	170	41
PK6	0,3	9,9	6,1	45	198	10,2	3,30	27	60
R1	0,7	7,4	13,6	69	106	11,0	0,19	5,2	23
R2	3,3	23,8	13,0	135	47	3,9	0,30	6,1	16
R3	0,5	15,5	6,9	66	274	14,6	0,66	19	73
R4	1,7	24,5	13,9	135	267	12,6	0,27	6,8	20

Tableau 4: dosage des métaux à l'acétate-ammonium + EDTA

8.5 Eléments totaux

Pour déterminer la concentration totale en chaque élément, il est nécessaire d'extraire les éléments de toutes les formes sous lesquelles ils sont présents dans les sols (silicates, carbonates, oxydes, etc.). La méthode triacide (HF + HClO₄ + HCl) extrait efficacement toutes les formes. La spectrométrie d'absorption atomique permet d'obtenir directement les concentrations en Cu, Co, Zn et Pb (Baize, 1997).

Les teneurs obtenues sont plus élevées que pour l'extraction à l'AA-EDTA. En effet, il s'agit de la teneur totale donc pas seulement présentes suite à une pollution. L'analyse des résultats est cependant similaire à celle-ci-dessus (Tableau 4) : les échantillons enrichis en Cu sont facilement identifiables (Kenya, Kamalondo, Lubumbashi, Penga-Penga, Plateau Karavia) (Tableau 5). Il en va de même pour les autres métaux. A noter que la limite de détection, plus élevée pour les éléments totaux que pour l'AA-EDTA, est souvent atteinte dans le cas du cobalt (Tableau 5).

ID	Eléments totaux			
	Cu	Co	Pb	Zn
	mg/kg			
KS1	147	< LOD	39	47
KS2	82	< LOD	< LOD	31
KS3	471	< LOD	22	55
KS4	164	< LOD	< LOD	61
KE1	1262	< LOD	156	865
KE2	1206	< LOD	135	913
KE3	623	< LOD	61	246
KE4	2097	< LOD	237	1590
KM1	3830	< LOD	348	941
KM2	7594	58	599	2113
KM3	1137	< LOD	162	805
KM4	653	< LOD	80	468
KM5	873	< LOD	96	345
KP1	243	< LOD	34	125
KP2	765	< LOD	2088	748
KP3	913	< LOD	207	1475
KP4	238	< LOD	46	124
KP5	429	< LOD	61	228
KP6	213	< LOD	31	141
KP7	270	< LOD	57	676
KP8	102	< LOD	29	77
KT1	1554	19	208	659
KT2	299	< LOD	83	353
KT3	1155	22	170	1565
L1	1654	9	188	980
L2	3670	34	349	1037
L3	3345	55	282	968
L4	2299	< LOD	404	793
L5	504	< LOD	85	307
L6	291	< LOD	45	111
L7	210	< LOD	449	261
N1	126	< LOD	< LOD	29

N2	91	< LOD	35	48
N3	164	< LOD	< LOD	33
N4	67	< LOD	< LOD	41
N5	188	< LOD	22	84
P1	3459	*	177	471
PK1	3865	< LOD	420	318
PK2	753	< LOD	98	162
PK3	6552	6	780	654
PK4	938	< LOD	113	83
PK5	2804	< LOD	307	207
PK6	489	< LOD	70	171
R1	404	< LOD	30	80
R2	116	< LOD	< LOD	59
R3	470	< LOD	38	298
R4	645	< LOD	23	87

Tableau 5: teneurs totales en métaux traces

9. Résultats et discussion

Avant de discuter les cartes obtenues, il est utile de s'intéresser à la variographie de la carte du cuivre (Figure 30). Les semi-variogrammes représentent la variance de valeurs d'échantillons en fonction de la distance qui les séparent. En effet, il existe une plus grande probabilité que des points proches aient des propriétés similaires que des points distants. Autrement dit, des échantillons proches seront plus prédictibles et présenteront moins de variabilité que des échantillons distants. Concrètement, un semi-variogramme consiste à reporter les distances h entre deux points en abscisse et la différence de valeurs entre ces deux points (teneur en Cu dans notre cas) en ordonnées. Il s'agit donc de la semi-variance. Plus des points ont une semi-variance élevée, plus il est probable qu'ils soient éloignés l'un de l'autre. La valeur de x à laquelle un plateau est atteint (*portée*) représente la distance à partir de laquelle il n'y a plus aucun rapport entre les points. La distance est exprimée sur le graphique en $m \cdot h \cdot 10^{-2}$. Pour convertir cette unité en mètres, il faut multiplier la valeur par 100. Dans la Figure 30, nous pouvons voir que le modèle suit une courbe qui représente bien le lien distance-variance. La portée se situe vers 200m : des points séparés de plus de 200m l'un de l'autre auront donc très peu de chances d'avoir un lien au niveau des teneurs en cuivre. Il ressort de cette observation qu'il est nécessaire d'avoir un réseau d'échantillons relativement dense, en particulier pour pouvoir fixer les limites entre zones de teneurs différentes. Des zones où l'échantillonnage a été très dense seront modélisées plus précisément. L'erreur liée à l'interpolation sera plus faible avec une maille dense. Il est cependant difficile d'échantillonner selon une maille serrée, en particulier en milieu urbanisé.

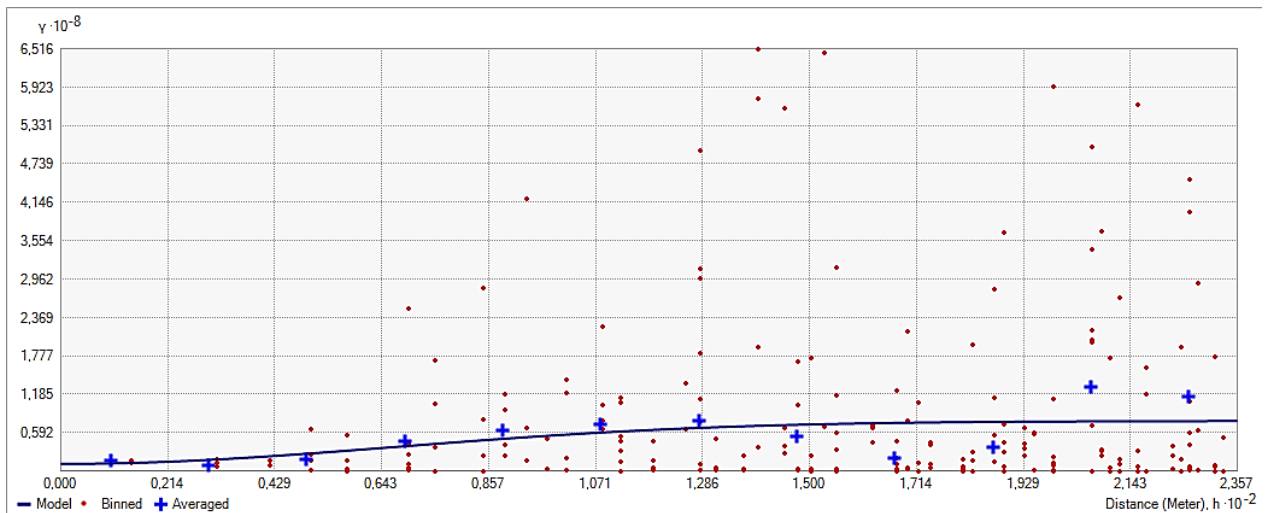


Figure 30: semi-variogramme des teneurs en cuivre modélisées

Une régression linéaire entre les points mesurés et modélisés est également disponible (Figure 31): le coefficient de corrélation vaut 0.72. La modélisation est donc d'une qualité convenable.

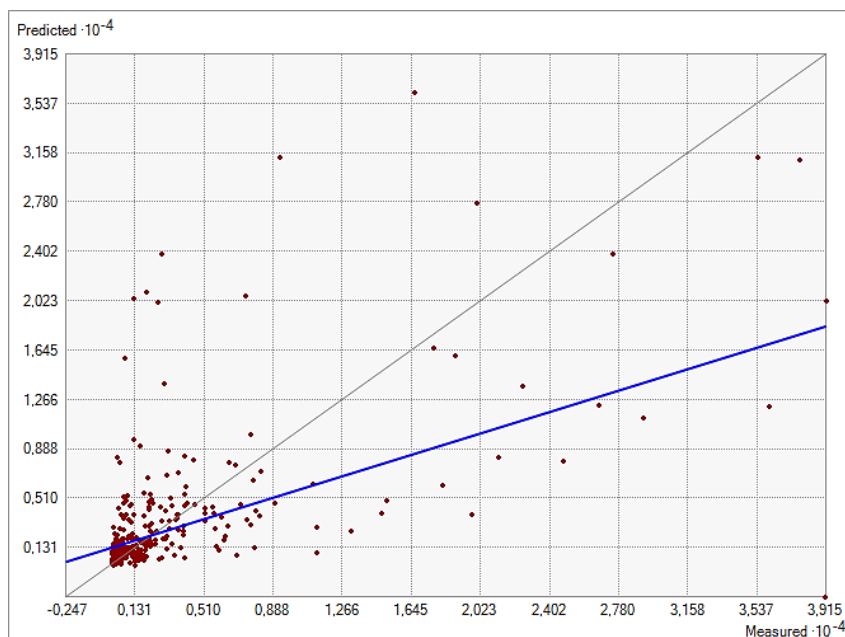


Figure 31: régression linéaire de la modélisation des teneurs en cuivre

La carte ci-dessous (Figure 32) a été obtenue en compilant les données existantes (Mukobo, 2007 ; Muyumba, 2008 ; Faucon, 2009 ; John, 2009) avec les résultats obtenus dans ce travail. Il s'agit d'une carte de prédiction des teneurs en cuivre des sols de Lubumbashi, construites à partir des analyses de tous les échantillons collectés dans les études précédentes et celle-ci. Au total, ce sont 364 échantillons qui ont été récoltés et analysés pour mettre cette carte au point. Les concentrations obtenues par extraction à l'AA-EDTA ont été utilisées. La technique du krigeage ordinaire a été choisie pour élaborer la carte, permettant ainsi d'interpoler les points entre eux.

Une seconde carte (Figure 33) représentant la probabilité de dépasser la limite naturelle de 400 mg/kg a été mise sur pied grâce au krigeage d'indicatrice. L'indice de probabilité varie entre 0 et 1 : plus on se rapproche de 1, plus la probabilité de dépasser les 400 mg/kg augmente. Un indice de 1 signifie une certitude absolue.

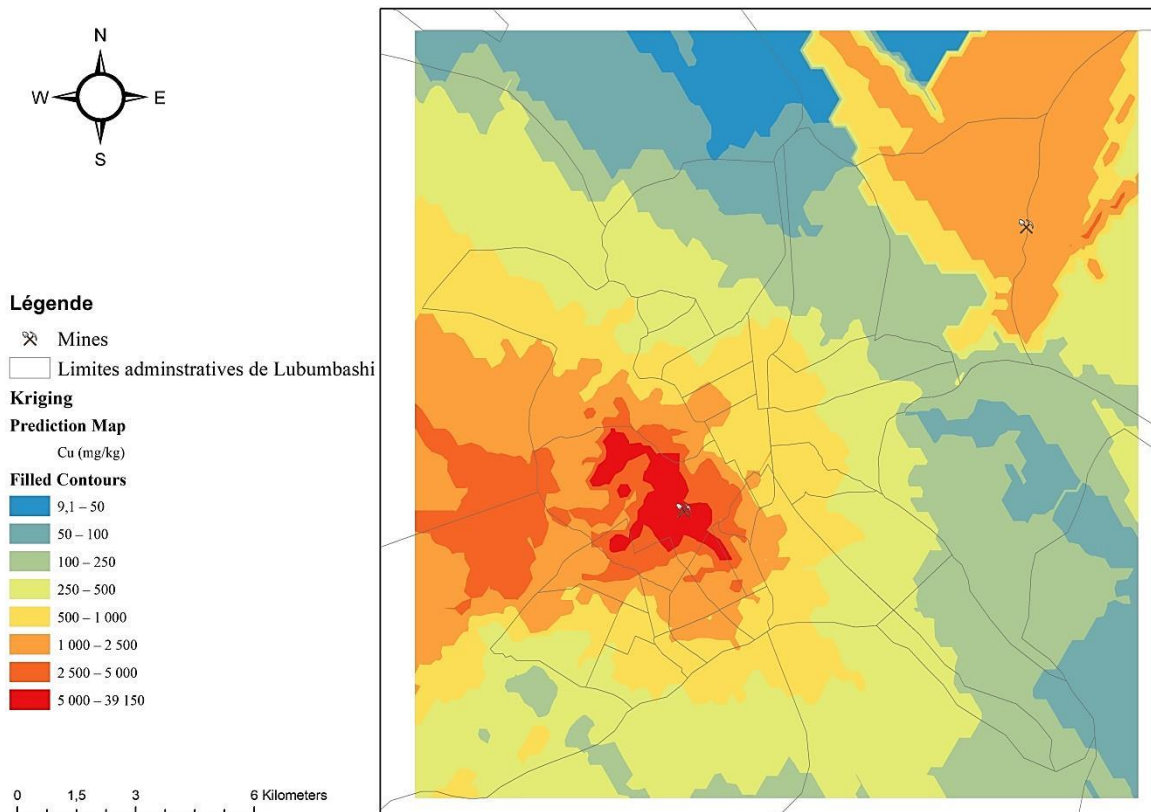


Figure 32: teneurs en Cu disponible des sols de Lubumbashi

La carte des teneurs en cuivre de sols de Lubumbashi (Figure 32) est similaire à celle établie par Shutcha et al. (Inédit) (Figure 14). Comme observé dans des études préalables, le quartier Gécamines (Penga-Penga et Plateau Karavia) présente des contaminations critiques en cuivre. La Figure 33 prouve qu’il s’agit bien d’une contamination et pas d’un évènement naturel. Le cône de pollution qu’on retrouve dans ces cartes reflète l’effet des vents dominants de la région, soufflant vers le nord-ouest. La contamination en cuivre et autres éléments traces métalliques n’est donc pas restreinte au site minier et industriel de la Gécamines mais s’étale sur tout le nord-ouest de la ville. Suite à l’échantillonnage approfondi de ce travail, il apparait que le cône de pollution monte plus vers le nord-ouest que ce qu’avait obtenu Shutcha et al. (Inédit). Une autre zone contaminée est aussi identifiée au nord-est de la ville (Figure 32). Déjà observée dans la carte de Shutcha et al. (Inédit), on la retrouve ici plus étendue. Cette différence réside dans un échantillonnage plus approfondi dans cette zone (Figure 16). La mine de l’Etoile et le site de Ruashi Mining sont responsable de ces teneurs élevées. Il est possible cependant que les teneurs en cuivre dans cette zone aient été surestimées par l’interpolation, notamment la fine langue qu’on observe à l’extrême nord de la carte, cette dernière n’étant pas représentée dans la carte des probabilités de dépassement (Figure 33). Il est utile de dire également que, après avoir mené une analyse multivariée sur les teneurs en Cd, Cu, Co, Pb et Zn, Muyumba et al. (2015) ont montré que les éléments traces métalliques ont tous la même distribution spatiale et ont donc la même origine concernant la contamination des sols.

En observant la Figure 33, on se rend compte qu’une surface restreinte de la ville est épargnée par la contamination en cuivre. Seuls le nord et le sud-est de Lubumbashi semblent avoir des

teneurs en cuivre dans le sol relativement normales par rapport au fond pédogéochimique de la région. La carte des probabilités de dépassement montre également une contamination plus étendue au nord-est de Lubumbashi par rapport à la même carte de Shutchka et al. (Inédit). Il semble également que le cône de pollution dû à la cheminée de la Gécamines s'étende encore plus vers le nord que prévu.

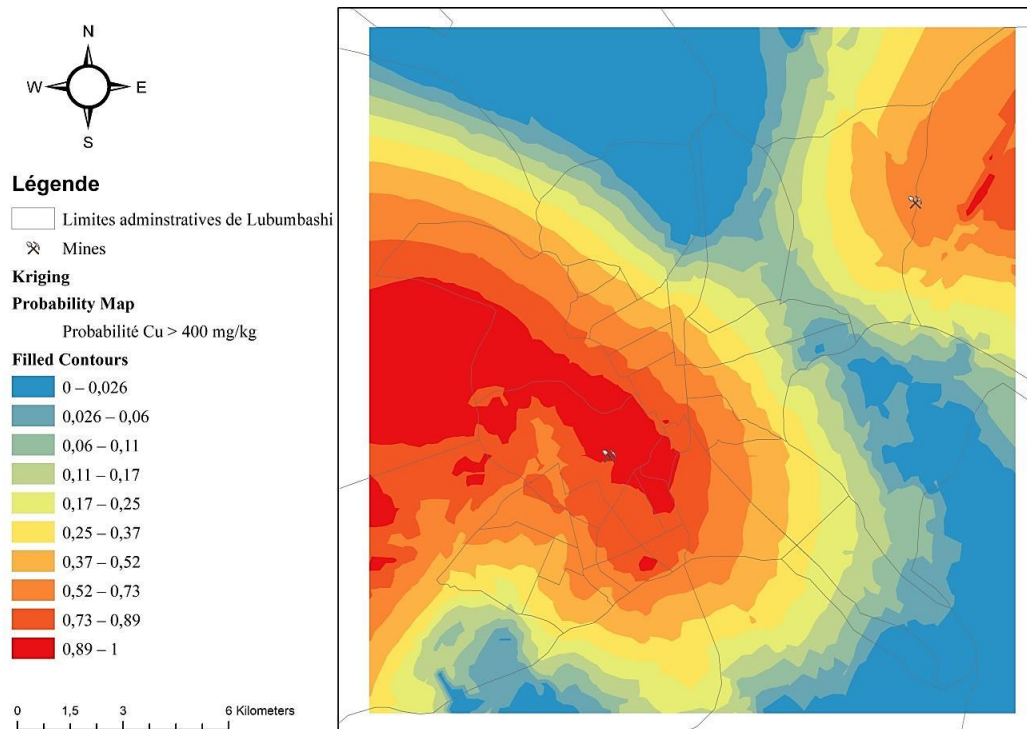


Figure 33: probabilité de dépassement de la limite des 400 mg/kg de Cu

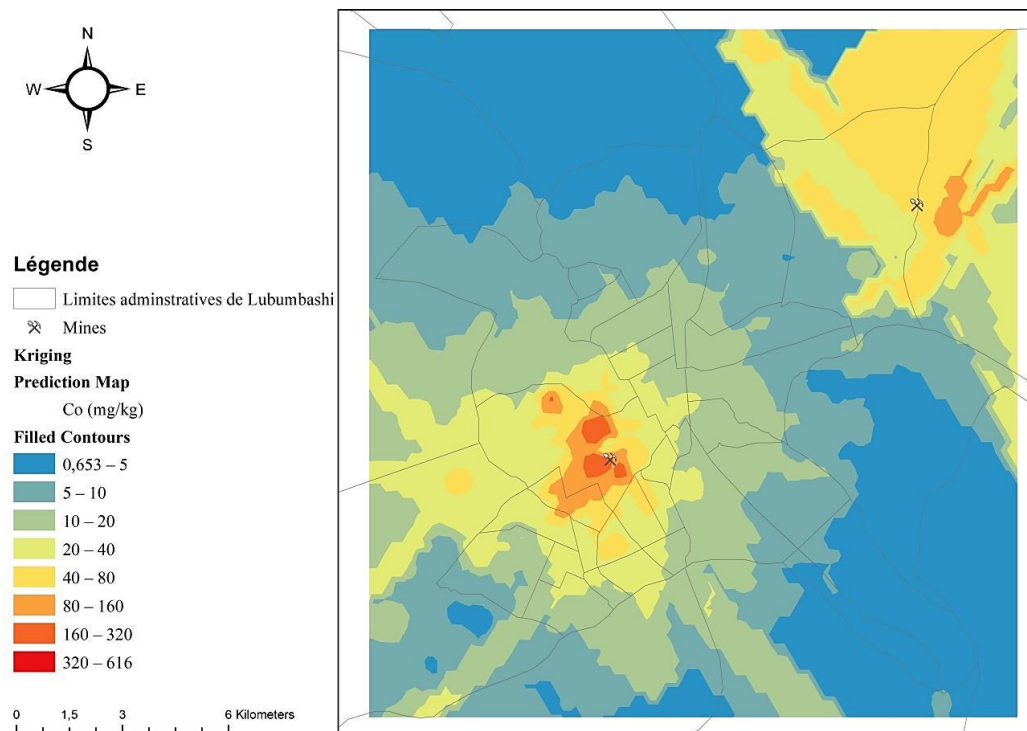


Figure 34: teneurs en Co disponible des sols de Lubumbashi

Une carte des contaminations en cobalt a également été mise au point (Figure 34). La répartition de la pollution est différente du cuivre. Cependant, les mêmes tendances sont observées : de fortes teneurs correspondant au site de la Gécamines et du terril s'étendant (légèrement dans ce cas) vers le nord-ouest et une autre contamination au nord-est de la ville reflétant l'activité des mines de l'Etoile et de Ruashi.

10. Conclusion

L'industrie minière à Lubumbashi a toujours fait partie du paysage, de mémoire d'habitants. Il en est de même pour les retombées de particules riches en cuivre, cobalt et autres éléments traces métalliques, notamment issues de la célèbre cheminée Gécamines. Jusqu'à récemment, une pollution des sols, en cuivre particulièrement, était soupçonnée mais n'avait jamais été étudiée. C'est à partir de 2005 que l'UNILU a commencé à s'intéresser à cette question. Il devenait urgent de déterminer s'il y avait pollution et quelle était son étendue, d'un intérêt tant environnemental que sanitaire. En effet, une possible contamination de la chaîne alimentaire à partir des plantes absorbant le cuivre donne un caractère beaucoup plus concret et alarmant au problème. Il s'en suivit douze ans d'études diverses, toujours liées aux teneurs en éléments traces métalliques des sols de Lubumbashi. Il apparut rapidement que les sols lushois contenaient des quantités de cuivre largement supérieures aux concentrations naturelles de la région, déjà élevées. C'est à l'issue de cette période que Shutcha et al. ont établi une carte des contaminations des sols de la ville dans un article encore inédit. Cette carte met en évidence une pollution très importante du quartier Gécamines, aussi appelé Penga-Penga. Loin d'être restreinte à cette zone, les vents dominants de la région ont entraîné les fumées polluantes vers le nord-ouest, laissant derrière eux un large cône de pollution. Du côté est de la ville, les rejets de la mine de l'Etoile et de Ruashi Mining sont aussi observables par une zone de contamination de plus faible envergure. Une carte de la probabilité de dépasser la limite naturelle des 400 mg/kg de cuivre dans les sols fut également modélisée dans cet article. Elle permet de faire la distinction entre les teneurs naturelles et d'origine anthropiques.

Ce travail avait pour but de densifier l'échantillonnage sur Lubumbashi et de confirmer la carte de Shutcha et al. (Inédit). Pour ce faire, 47 échantillons ont été récoltés dans toute la ville, à des endroits encore non-prospectés. Diverses analyses ont été menées afin de caractériser les sols: pH, carbone organique total, XRF pour les éléments majeurs, extraction des éléments mineurs et métaux à l'acétate-ammonium EDTA et dosage des métaux par la technique des éléments totaux. C'est à partir des teneurs en cuivre obtenues par AA-EDTA qu'une carte fut élaborée par la méthode du krigeage. Elle donne un résultat similaire à la première bien que des différences existent : le cône de pollution s'étendrait plus encore vers le nord-ouest qu'initialement modélisé et la zone contaminée par les mines de l'Etoile et de Ruashi serait plus grande que dans la première carte. La carte des probabilités de dépassement est aussi semblable à l'initiale, avec la zone contaminée au nord-est plus étendue.

L'objectif de ces cartes est de rendre compte de l'état chimique des sols de Lubumbashi. Les prochaines étapes sont la mise en place de campagnes de sensibilisation auprès de la population afin de restreindre au minimum l'impact sur la santé via l'alimentation, la détermination de zones de priorité quant à la contamination et la planification de solutions de remédiation. A aucun moment une limite de toxicité en cuivre et autres ETM des systèmes sol-plante de Lubumbashi n'a été introduite. Cela relève du domaine médical, de même que les effets sur la santé de la contamination en cuivre de la chaîne alimentaire. Ce genre d'étude est également à prévoir dans le futur dans le cadre de la remédiation de la pollution minière à Lubumbashi.

11. Bibliographie

- Alloway B.J. 1990. *Heavy metal in soils*. Halsted Press, New York, 339 p.
- Andres L. 2008. *Etude de l'impact des contaminations métalliques sur les propriétés des sols autour de Lubumbashi*. Mémoire, Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Université de Liège, 151 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.
- Baker A.J.M., Brooks R.R., Pease A.J. et 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, 377-385.
- Beckhoff B., Kanngießler B., Langhoff N., Wedell R. et Wolff H. 2006. *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*, Springer, 863p.
- Bourrelie 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.
- Brion R. et Moreau J-L. 2006. *De la mine à Mars : la genèse d'Umicore*. Lanoo, 481 p.
- Brooks R.R., Baker A.J.M. et Malaisse F. 1992. Copper flowers. *National Geographic Research and Exploration* 8 (3), 338-351.
- Bruemmer G.W., Gerth J. et Herms U. 1986. Heavy metal species, mobility and availability in soils. *Z. Pflanzenernahr. Bodenkd.* 149, 382-398
- CAID. 2016. *Ville de Lubumbashi. Fiche d'identité de la ville*. <https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-villes/ville-de-lubumbashi/?domaine=fiche>. Consulté le 1^{er} avril 2018.
- Cailteux J., Binda P.L., Kampunzu A.B., Katekesha W.M., Kaunda C. et Wendorff M. 1995. *The late proterozoic Roan supergroup between Zambia and Zaïre, central African copperbelt*. Royal Museum of Central Africa, 27 p.
- Celardin F. 2002. Approche semi-quantitative de la mobilité. In : Baize D. et Tercé M. (coord.). *Un point sur... les éléments traces métalliques dans les sols : approches fonctionnelles et spatiales*. Paris, INRA, 565 p.
- Chassin P., Baize D., Cambier P. et Sterckeman T. 1996. Les éléments traces métalliques et la qualité des sols. Impact à moyen et à long terme. *Etude et Gestion des Sols* 3, 297-306
- Climate-Data. 2018. Climat : Lubumbashi. <https://fr.climate-data.org/location/503/>. Consulté le 1^{er} avril 2018.
- Colinet G. et al. 2007. Phytoremediation of contaminated sites in urban environment: preliminary results of a study focussed on Lubumbashi. In: *Proceedings of the 9th*

International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, 15-19 July 2007, Beijing, China.

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 (vol.2), SNC-LAVALIN International, Montréal, 222 p.

Dewaele S., Muchez P., Vets J., Fernandez-Alonso M. et Tack L. 2006. Multiphase origin of the Cu-Co ore deposits in the western part of the Lufilian fold-and-thrust belt, Katanga (Democratic Republic of Congo). *Journal of African Earth Sciences* 46 (5), 455-459.

Duvigneaud P. 1958. La végétation du Katanga et de ses sols métallifères. *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique* 90, 127-278.

Duvigneaud P. et Denaeyer-De Smet S. 1963. Cuivre et végétation au Katanga. *Bulletin de la Société royale de Botanique de Belgique* 47 (96), 93-231.

FAO. 1998. World Reference Base for soil resources. World Soils Resources Report 84. Food and Agricultural Organization of United Nations, Rome,

Faucon M.-P. 2009. *Ecologie et biologie de la conservation des métallophytes. Le cas de Crepidorhopalon perennis et C. tenuis (Scrophulariaceae) des sols cupro-cobaltifères du Katanga*. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 108p.

Faucon M-P., Le Stradic S., Boisson S., Ilunga wa Ilunga E., Séleck M., Lange B. Delhaye G., Shutcha M., Pourret O., Meerts P. et Mahy G. 2015. Implication of plant-soil relationships for conservation and restoration of copper-cobalt ecosystems. *Plant and Soil* 403 (1-2), 153-165.

Forrest Group. 2012. *Société pour le Traitement du Terril de Lubumbashi (STL)*. <http://www.forrestgroup.com/fr/stl.html>. Consulté le 1 avril 2018.

Gillot L. 2008. *Contribution à l'estimation de l'impact des contaminations métalliques sur les propriétés des sols et étude des transferts des éléments traces métalliques dans les systèmes sol-plante* (Lubumbashi, Katanga, RDC). TFE FUSAGX, 75 p.

Giroux M., Deschênes L. et Chassé R. 2008. *Les éléments traces métalliques (ETM). Leur accumulation dans les sols agricoles du Québec*. Fiche synthèse, IRDA, 4 p.

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.

Irene L. et Yang X. 1999. EDTA Extraction of Heavy Metals from Different Soil Fractions and Synthetic Soils. *Water, Air and Soil Pollution* 109 (1-4), 219-236.

John A. 2009. *Contribution à l'évaluation du risque de contamination de la chaîne alimentaire par les Eléments Traces Métalliques, dans le cadre des activités d'élevage et de production agricole à Lubumbashi*. TFE FUSAGx, 75 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.
- Kampunzu A.B., Cailteux J., Kamona A., Intiomale M. et Melcher F. 2009. Sediment-hosted Zn-Pb-Cu deposits in the Central African Copperbelt. *Ore Geology Review* 35, 263-297.
- Kasamwa, B. 2002. *Environnement : Lubumbashi, rêve d'une Gécamines plus propre*. Syfia Info.
<http://www.syfia.info/index.php5?view=articles&action=voir&idArticle=2819>. Non consulté.
- Muyumba D. 2008. *Contribution à l'étude des facteurs de distribution spatiale des teneurs en éléments traces métalliques dans les sols et les sédiments dans le quartier GECAMINES*. Mémoire DEA UNILU, 50 p.
- Muyumba D., Liénard A., Mahy G., Luhembwe M. et Colinet G. 2015. Caractérisation des systèmes sols-plantes dans les collines de l'arc cuprifère du Katanga (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 19 (2), 204-214.
- Leblanc M. et Malaisse F. 1978. *Lubumbashi, un écosystème urbain tropical*. Université Nationale du Zaïre, 152 p.
- Levi P. 2017. *Le tribunal de commerce de Bruxelles embarrassé dans l'affaire Gécamines Vs Groupe Forrest*. Business et Finances. <http://business-et-finances.com/le-tribunal-de-commerce-de-bruxelles-embarrasse-dans-laffaire-gecamines-vs-groupe-forrest/>. Consulté le 31 mars 2018.
- Leteinturier B. et Malaisse F. 1999. De la réhabilitation des sites pollués par l'exploitation minière du cuivre en Afrique centro-australe. *Bulletin des Séances. Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer* 45 (1999-4), 535-554.
- Lubalega K.T. 2009. *Contaminations métalliques et termitières autour de lubumbashi*. Mémoire DEA Lubumbashi, 50 p.
- Maekelbergh D. 2012. *Contribution à l'étude des propriétés des sols dans la région de Lubumbashi (Katanga, R.D. Congo) en relation avec la végétation du miombo*. MFE FUSAGx, 75 p.
- Maton J. et Lecompte H-B. 2001. *Congo 1965-1999 : les espoirs déçus du « Brésil africain »*. Centre de Développement de l'OCDE, OCDE, Document de travail n°178, 57 p.
- Mpundu M. 2010. *Contaminations des sols en Éléments Traces Métalliques à Lubumbashi (Katanga/RDCongo). Évaluation des risques de contamination de la chaîne alimentaire et choix de solutions de remédiation*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi (RD Congo).

- Mukobo R.P. 2007. *Evaluation et cartographie des contaminations des sols autour du site de la Gecamines*. Mémoire DEA UNILU, 50 p.
- Musalula F. 2010. *Le désengagement du gouvernement congolais face à l'efficacité des politiques de développement des entités locales. Cas de la ville de Lubumbashi*. Institut supérieur interdiocésain Monseigneur Mulolwa (ISIM), Mémoire.
- PNUD. 2004. *Conflits armés en République Démocratique du Congo. Le rôle des facteurs économiques et leçons pour la reconstruction*. Kinshasa, 72 p.
- Quevy B., Laudelout H. et 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.
- Ramazani Y. 2009. *Transfert des éléments traces métalliques (ETM) dans le système sol-plante et évaluation des risques de contamination de la chaîne alimentaire. Etude des cas dans la ville de Lubumbashi en RDC*. Mémoire, Université de Lubumbashi, RDC. <https://www.memoireonline.com/01/14/8540/Transfert-des-elements-traces-metalliques--ETMs--dans-le-systeme-sol-plante-et-evaluation-de.html>. Consulté le 31 mars 2018.
- Robert M. 1956. *Géologie et géographie du Katanga, y compris l'étude des ressources et de la mise en valeur*. Bruxelles, Hayez, 620 p.
- Schuh W., Leveille R.A., Fay I. et North R. 2012. *Geology of the Tenke-Fungurume sediment-hosted strata-bound copper-cobalt district, Katanga, Democratic Republic of Congo*. In: Hedenquist J.W., Harris M. et Camus F. (eds). *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world. A tribute to Richard H. Sillitoe*. Vol. Special Publication 16. Littleton, CO, USA, *Society of Economic Geologists*, 269-301.
- Shutchka M., Mukembo R-P., Kaya D., Mpundu M., Faucon M-P., Lubalega T., Andres L., John A., Vandenheede N., Pourret O., Ngongo M. et Colinet G. Inédit. *Fond pédogéochimique et cartographie des pollutions des sols à Lubumbashi*. 14 p.
- Sillanpää M. 1979. *Les éléments traces dans les sols et en agriculture*. Bulletin pédologique de la FAO, Rome, 84 p.
- Sys C. 1960. *Notice explicative de la carte des sols et de la végétation du Congo belge et du Ruanda-Urundi*. Bruxelles, Publications de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo belge (I.N.E.A.C.), 69 p.
- Sys C. et Schmitz A. 1959. *Carte des sols et de la végétation du Congo belge et du Ruanda-Urundi*. Bruxelles, Publications de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo belge (I.N.E.A.C.), 69 p.
- Taylor S.R. et McLennan S.M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Oxford (UK), Blackwell Scientific Publications, 312 p.

Uehara G. et Gilman G. 1981. *The Mineralogy, Chemistry and Physics of Tropical Soils with Variable-Charge Clays*. West-View Press, Boulder, 170p.

Vennetier P. et Nzuzi L. 1991. Urbanisation et aménagement en Afrique noire. In: *Annales de Géographie* 100 (558), 247-248.