



HAL
open science

Fond pédogéochimique et cartographie des pollutions des sols à Lubumbashi

Mylor Shutcha, Robert-Prince Mukobo, Donato Kaya Muyumba, Michel Mpundu, Michel-Pierre Faucon, Tolérant Lubalega, Ludovic Andres, Annabelle John, Nathan Vandenheede, Olivier Pourret, et al.

► To cite this version:

Mylor Shutcha, Robert-Prince Mukobo, Donato Kaya Muyumba, Michel Mpundu, Michel-Pierre Faucon, et al.. Fond pédogéochimique et cartographie des pollutions des sols à Lubumbashi. Bogaert J., Colinet G. & Mahy G.,. Anthropisation des paysages katangais., : Presses Universitaires de Liège, 2018. hal-02265975

HAL Id: hal-02265975

<https://hal.science/hal-02265975>

Submitted on 13 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fond pédogéochimique et cartographie des pollutions des sols à Lubumbashi

Mylor NGOY SHUTCHA, Robert-Prince MUKOBO, Donato KAYA MUYUMBA, Michel MPUNDU MUBEMBA, Michel-Pierre FAUCON, Tolérant LUBALEGA KIMBAMBA, Ludovic ANDRES, Annabelle JOHN, Nathan VANDENHEEDE, Olivier POURRET, Michel NGONGO LUHEMBWE, Gilles COLINET*

Il n'existe pas de cartographie récente des contaminations des sols par les activités minières à Lubumbashi malgré l'importance de la question en matière de santé humaine et de risques pour les écosystèmes. Une synthèse des recherches menées depuis 2005 a été réalisée en vue de proposer une cartographie du fond pédogéochimique naturel comme base d'estimation des contaminations d'origine anthropique. L'analyse des teneurs totales sur des profils représentatifs a permis d'estimer des teneurs de fond de 400, 50, 120 et 200 mg.kg⁻¹ pour respectivement les éléments Cu, Co, Pb et Zn. Les recherches ont également permis de cartographier les teneurs de l'horizon de surface en ces éléments et la probabilité de dépasser les valeurs de fond. La distribution spatiale des contaminants est conditionnée par la localisation des sources anthropiques de contamination, mais également par les redistributions localement importantes en surface dues à l'érosion, comme en témoigne l'analyse des sédiments des cours d'eau.

Determination of the pedochemical background and mapping of soil contamination in Lubumbashi

Despite its importance for human health and ecosystem function, no up-to-date map of soil contamination by mining processes exists for the Katanga Province. This paper presents a synthesis of research that has been conducted since 2005 in Lubumbashi in order to map the natural pedogeochemical background of trace elements. The knowledge of the natural background enables an assessment of local contaminations due to human activities. The analysis of the total content for selected soil profiles gave estimations of the natural background of 400, 50, 120 et 200 mg.kg⁻¹, respectively for Cu, Co, Pb and Zn. Maps of the content of trace elements in the topsoil were produced as well as maps of the probability to exceed the local background values. Locally, the spatial distribution of contaminants is determined by the presence of anthropic contamination but also by surface migration mainly due to erosion, as confirmed by the analysis of stream sediments.

Bogaert J., Colinet G. & Mahy G., 2018. *Anthropisation des paysages katangais*. Gembloux, Belgique : Presses Universitaires de Liège – Agronomie-Gembloux.

1. Introduction

Un grand nombre d'études ont été menées sur la caractérisation des contaminations des écosystèmes par les activités minières au Katanga, mais il n'existe aucune cartographie récente des contaminations des sols en métaux à l'échelle de la ville de Lubumbashi et de sa périphérie, même si une carte a été proposée par Mpundu Mubemba (2010) dans le cadre de sa thèse de doctorat. Or, la connaissance spatialisée de l'état chimique des sols est un préalable à une occupation du territoire qui permette la réalisation d'activités socio-économiques environnementalement durables et surtout qui n'engendrent pas de risques sanitaires. L'étude de Banza et al. (2009) a mis en évidence une accumulation excessive de cobalt dans l'organisme de personnes riveraines des sites miniers au Katanga. Les analyses de Mpundu Mubemba (2010) sur les potagers ont également confirmé les risques de contamination des légumes dans certains quartiers de Lubumbashi particulièrement impactés par les contaminations atmosphériques. D'autres compartiments des écosystèmes sont également touchés par les contaminations métalliques, comme l'ont montré Mbenza et al. (1989) sur la qualité de l'air, Lubalega et al. (2015) sur les termitières ou Manda et al. (2010) sur les écosystèmes aquatiques.

Les contaminations des sols peuvent être naturelles et correspondre à un fond géochimique élevé, comme dans les collines de l'Arc cuprifère (voir la synthèse bibliographique de Kaya Muyumba et al., 2015), ou à des apports atmosphériques d'origine volcanique ou géothermique (Gustin et al., 2008). Elles sont cependant plus fréquemment d'origine anthropique, et peuvent résulter d'apports massifs de sources locales bien identifiées ou d'apports diffus d'origine plus lointaine (Baize, 1997). Leteinturier (2002) a identifié de nombreux modes de contamination dus à l'activité minière au Katanga, des tranchées de prospection des sites précoloniaux aux émissions de particules dans l'atmosphère résultant des activités industrielles telle l'usine de la Gécamines à Lubumbashi : mines à ciel ouvert, remblais, bassins de décantation, sites de lavage de roches excavées, ballasts des voies ferrées et accotements de routes, etc. Les sources de pollution sont dès lors multiples dans une ville comme Lubumbashi.

De nombreux exemples de cartographie des contaminations existent dans la littérature récente (Liénard et al., 2014; Lee et al., 2016; Cao et al., 2017; Liu et al., 2017; Marugo-Negrete et al., 2017; Shen et al., 2017). Ces recherches combinent le développement de systèmes d'information géographique et les techniques d'interpolation géostatistiques pour la spatialisation des contaminations, avec l'usage d'indicateurs universels ou locaux dédiés à l'estimation du fond pédogéochimique – *enrichment factor* (EF), *geoaccumulation index* – ou à la caractérisation de la gravité de la pollution – *pollution index* – (Wu et al., 2014). En particulier, les approches spatiales basées sur les analyses multivariées visent à identifier les sources de pollution dès lors que celles-ci ne présentent pas les mêmes associations de métaux (Liénard et al., 2014).

L'objectif de nos recherches était d'établir le niveau des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) des sols de Lubumbashi lié au fond pédogéochimique naturel, d'une part, et de cartographier l'ampleur des contaminations par ailleurs. Ce papier synthétise les résultats d'analyses menées dans le cadre de différents mémoires et thèses de doctorat entre 2006 et 2015.

2. Méthodologie

Nous avons collecté les résultats d'analyses et les coordonnées géographiques des prélèvements de sol de l'ensemble des travaux de recherche (thèses de doctorat et mémoires de master) menés à Lubumbashi depuis le début du projet REMEDLU jusqu'en juin 2015. La liste de ces travaux est donnée au tableau 1, ainsi que les analyses effectuées.

Tableau 1. Relevé d'études (mémoires de fin d'études (MFE) et thèses de doctorat (PhD)) ayant contribué à la mesure des contaminations des sols à Lubumbashi.

Référence	Objectif de l'étude	Analyses
Mukobo (2007)	Cartographie des contaminations autour de la Gécamines (MFE)	pH, COT, Cd, Co, Cu, Pb et Zn disponibles*
Kaya Muyumba (2008)	Redistributions des ETM par ruissellement et érosion sur le site de la Gécamines (MFE)	pH, COT, Cd, Co, Cu, Pb et Zn disponibles*
Andres (2008)	Caractérisation du fond pédogéochimique (MFE)	pH, COT, Granulométrie, Eléments totaux triacides
Gillot (2008)	Relations sols-plantes en milieux contaminés (MFE)	pH, COT, Cd, Co, Cu, Pb et Zn disponibles*
John (2009)	Évaluation spatialisée des risques de contamination de la chaîne alimentaire (MFE)	pH, COT, Granulométrie, Eléments totaux triacides
Lubalega (2009)	Contaminations métalliques et termitières (MFE)	pH, COT, Cd, Co, Cu, Pb et Zn disponibles*
Faucon (2009)	Phytodisponibilité des ETM (PhD)	pH, Cd, Co, Cu, Pb et Zn disponibles*
Mackelbergh (2012)	Déterminisme pédologique des formations végétales naturelles (MFE)	pH, COT, Cd, Co, Cu, Pb et Zn disponibles*
Vandenheede (2015)	Contaminations des sédiments et plaines alluviales (MFE)	pH, COT, Cd, Co, Cu, Pb et Zn disponibles*

* Disponible = extraction chimique par $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ +EDTA à pH = 4,65.

Nous avons fait le choix de présenter les résultats relatifs à la définition du fond pédogéochimique en premier lieu et en suivant la chronologie de réalisation des différentes études ainsi que les différents enseignements qui en ont été tirés. Des cartes qui intègrent l'ensemble des teneurs en Cu disponible acquises sur l'horizon de surface des sols de Lubumbashi sont ensuite proposées et comparées avec celles mesurées dans les sédiments des principales vallées.

Les analyses statistiques et les graphiques ont été réalisés avec Minitab, les cartes avec ArcGIS 10.0.

3. Résultats et discussion

3.1. Teneurs de fond

Le fond pédogéochimique correspond aux teneurs dans les sols qui résultent de l'héritage de la roche-mère (fond géochimique) et des redistributions naturelles liées aux processus de pédogenèse et aux cycles biogéochimiques (Baize, 1999 ; Colinet, 2003). Le fond pédogéochimique est généralement estimé à partir des teneurs totales, mesurées à partir d'extractions chimiques par un mélange d'acides forts ou par fusion alcaline. Les teneurs disponibles, par contre, sont des teneurs mesurées dans des extraits liquides ou des résines qui simulent l'absorption par une plante ou tout autre organisme biologique. Il s'agit en général d'une estimation de l'offre du sol en élément. Les approches de détermination des fonds géochimiques et pédogéochimiques ciblent en général les alluvions des principaux cours d'eau ou les grands types de sols, respectivement.

Les mémoires de fin d'études de Andres (2008) et John (2009) ont posé les bases pour l'estimation du fond pédogéochimique des sols à Lubumbashi. Des profils représentatifs (18) des sols de Lubumbashi ont été échantillonnés en zones non contaminées et comparés aux profils en zones contaminées. Les sols de Lubumbashi sont présentés à la figure 1, dans le système de classification de l'INEAC (Sys & Schmitz, 1959).

Les sols peuvent être classés en fonction de leur position topographique (plateau et versant vs vallée), le matériel parental profond (schiste, roche carbonatée, roche siliceuse) et la couleur dominante (rouge, ocre-rouge, jaune).

Les analyses physico-chimiques (Tableau 2) indiquent des sols présentant une gamme relativement large de pH (réaction acide à neutre). La texture varie de sableuse à argileuse, du plateau vers le bas de versant. La CEC se situe autour de 25 cmolc.kg⁻¹ et celle des sols de vallées est plus forte que celle des sols de plateaux. Les teneurs en Al total, à l'instar des teneurs en argiles, sont globalement plus élevées dans les sols de vallées. Par contre, pour le Fe total, c'est l'inverse qui est observé en raison probablement des modifications de conditions d'oxydo-réduction entre le domaine aéré des plateaux et le domaine hydromorphe des vallées. Les teneurs totales en Al et en Fe augmentent de la surface vers la profondeur tandis que les teneurs totales en Cu, Co, Zn et Pb diminuent avec la profondeur. Des corrélations significatives ont été identifiées entre les teneurs en ETM et l'Al total pour les horizons de profondeur, et ces relations ont permis d'identifier des situations probables de contaminations de surface par le calcul de facteurs d'enrichissements locaux (EF) :

EF : $([ET] / [Al])_{\text{surface}} / ([ET] / [Al])_{\text{profondeur}}$, où ET représente l'élément trace considéré.

Au niveau des sols de plateaux, pour les horizons de profondeur, les sols jaunes se différencient des sols rouges par des niveaux médians de teneurs en Cu et Co supérieurs, respectivement : 110 et 22 mg.kg⁻¹ dans les sols jaunes contre 58 et 9 dans les sols rouges. Le type de sol pourrait a priori être un facteur de différenciation du fond pédogéochimique des sols de plateaux, mais, à ce stade, les raisons de cette différenciation n'ont pas été identifiées.

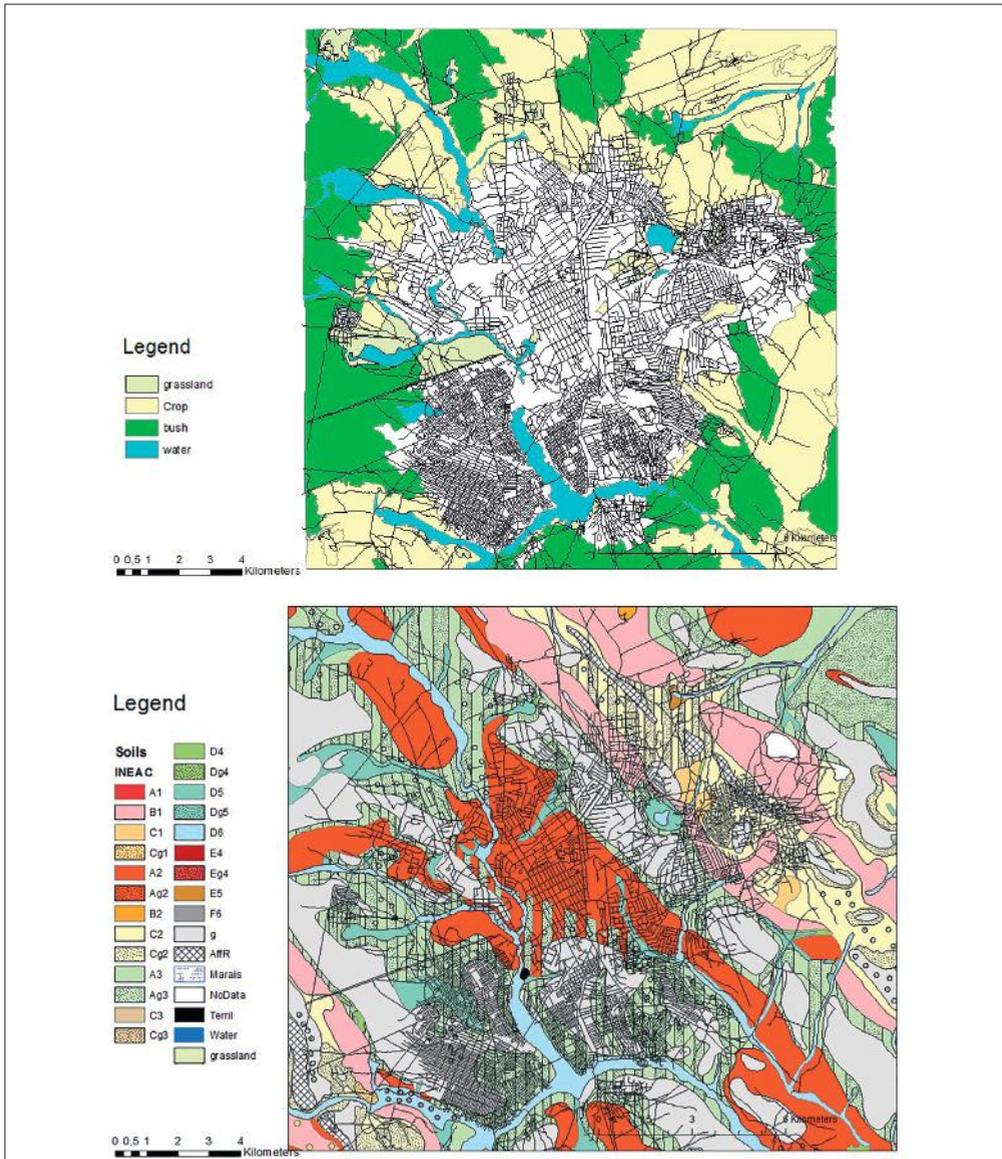


Figure 1. Occupation (haut) et carte des sols de l'INEAC autour de Lubumbashi.

Sur base des résultats analytiques, John (2009) a appliqué la technique des box-plots pour définir les limites supérieures des populations naturelles de teneurs en ETM dans les sols de Lubumbashi. Pour les horizons de surface, ces limites sont de 400, 50, 120 et 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour respectivement Cu, Co, Pb et Zn totaux.

En ce qui concerne les références naturelles relatives aux teneurs disponibles, les études de Gillot (2008) et Maekelbergh (2012) permettent de proposer les limites suivantes : 15 ; 2,5 ; 0,5 ; 13 et 2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour Cu, Co, Cd, Pb et Zn disponibles. Ces

chiffres apparaissent toutefois très faibles eu égard aux teneurs mesurées à Lubumbashi et ailleurs au Katanga. Ils proviennent essentiellement de mesures effectuées sur des sols sous forêt éloignés de plus de 10 km de Lubumbashi.

Tableau 2. Propriétés des sols de référence pour le fond pédogéochimique. N : nombre d'échantillons; CV : coefficient de variation; Q1-Q3 : 1^{er} et 3^{ème} quartile; Med. : médiane; Max. : maximum; Min. : minimum; COT (%): carbone organique total; A% : pourcentage d'argile; CEC : capacité d'échange cationique (cmolc.kg⁻¹); _T : concentration totale (mg.kg⁻¹).

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
pH _{KCl}	18	4,4	0,03	3,8	3,9	4,1	4,8	5,8
COT	18	2,3	0,09	1,0	1,9	2,3	2,7	5,0
A%	15	45,0	0,09	14,9	35,5	48,4	55,4	71,2
CEC	15	16,8	0,09	5,7	14,8	16,4	22,0	26,6
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 de profondeur								
pH _{Eau}	36	5,3	0,01	4,6	4,9	5,3	5,5	6,2
pH _{KCl}	36	4,1	0,01	3,6	3,9	4,0	4,1	5,3
COT	34	1,0	0,15	0,4	0,5	0,8	0,9	4,0
A%	20	51,4	0,05	31,4	41,9	48,8	61,0	74,6
CEC	20	17,1	0,06	9,6	12,6	17,3	21,2	26,0
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

3.2. Premiers travaux de cartographie autour de la Gécamines

Les premiers travaux datent de la période 2005-2010 et s'inscrivaient dans le cadre du projet REMEDLU. Divers mémoires de fin d'études de l'UNILU et de Gembloux Agro Bio-Tech ont appuyé la thèse de doctorat de Mpundu Mubemba (2010), dont un objectif spécifique était la cartographie des contaminations.

En particulier, les mémoires de Mukobo (2007), Kaya Muyumba (2008) et Lubalega (2009) ciblaient respectivement la cartographie des contaminations, l'évaluation des redistributions par érosion vers les sédiments et les contaminations des termitières (Figure 2) autour de l'ancienne cheminée de la Gécamines. En effet, l'état de dégradation du quartier Gécamines situé sous le vent de la cheminée est particulièrement marqué.

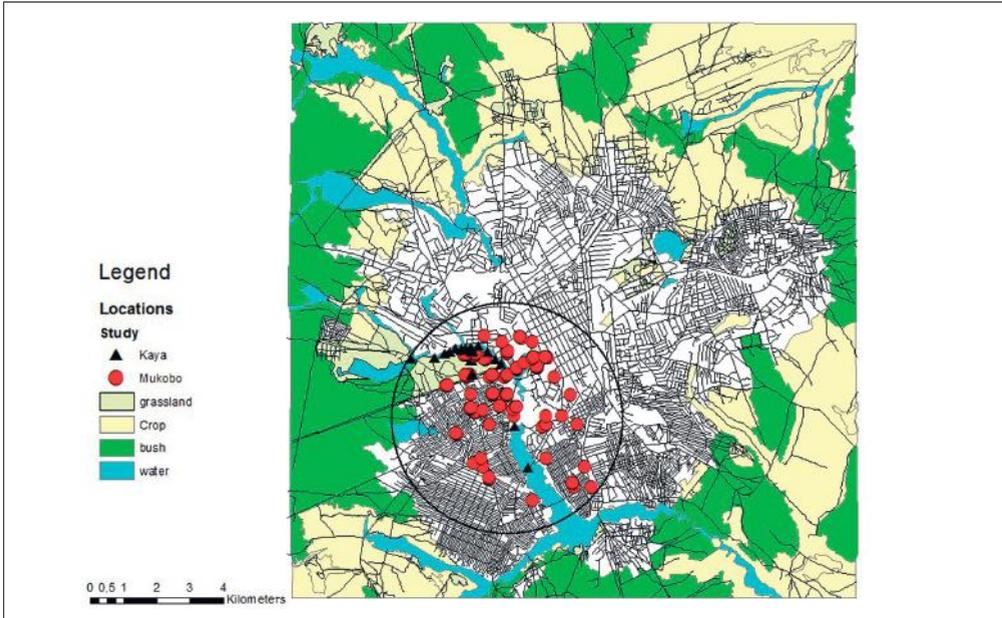


Figure 2. Localisation des points de prélèvements de Mukobo (2007) et Kaya Muyumba (2008) à Lubumbashi.

L'étude de Mukobo (2007) portait sur les 15 premiers centimètres de sol et un échantillonnage aléatoire stratifié, centré sur la cheminée de la Gécamines, a été mis en œuvre pour évaluer la variabilité du pH et de Cd, Cu, Co, Pb et Zn disponibles à différentes échelles spatiales (métrique, décimétrique, hectométrique et kilométrique) et pour évaluer si le quadrant sous le vent est davantage contaminé que les autres.

Les résultats d'analyses chimiques ne confirmaient toutefois pas l'existence de contaminations plus sévères dans le quadrant sous les vents dominants (Figure 3), principalement en raison de redistributions paysagères par érosion sur les plateaux et par accumulation des contaminants dans les dépressions et les vallées.

Les recherches complémentaires sur cette zone de Kaya Muyumba (2008) et Lubalega (2009) ont en effet confirmé l'existence, respectivement, de contaminations de surface par voie atmosphérique en provenance de la cheminée de la Gécamines et d'accumulation progressive dans les sédiments de la vallée. Dans le premier cas, l'analyse de terre prélevée en surface des nombreuses termitières du quartier Gécamines montre que les faces exposées à la cheminée présentaient des niveaux de teneurs en ETM significativement plus élevées que les faces protégées du vent (Lubalega, 2009; Lubalega et al., 2015). Dans la seconde étude, les teneurs en ETM dans les sédiments sont largement plus élevées que les teneurs moyennes sur le plateau, et croissent vers l'aval à mesure que la rivière Lubumbashi draine le plateau du quartier Gécamines. En outre, les marques d'érosion/dépôt de natures hydrique et éolienne sont très visibles sur le terrain. L'analyse de fosses pédologiques peu profondes a confirmé l'extrême variabilité des teneurs en ETM entre horizons de surface, en raison de la présence/

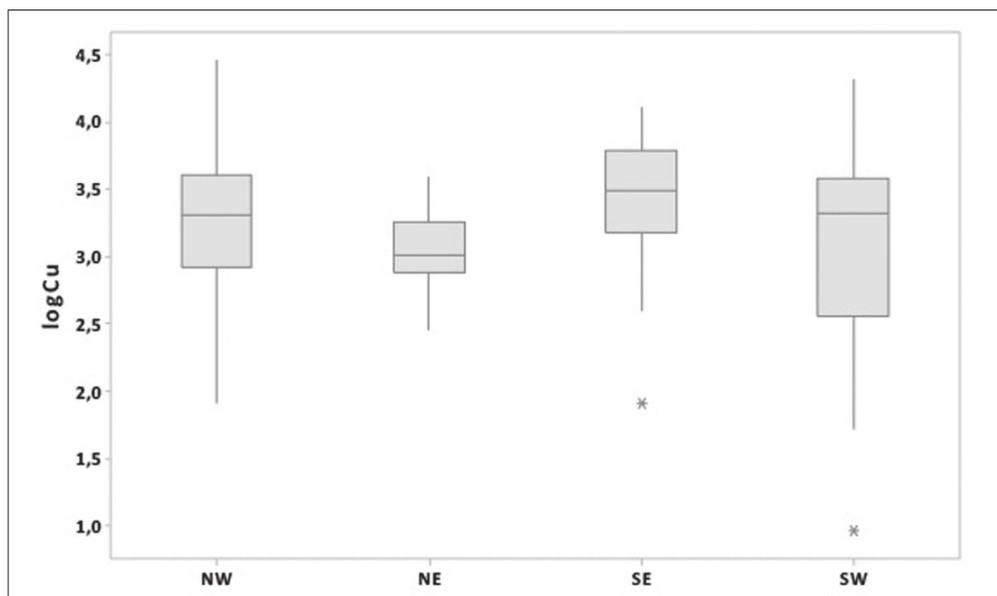


Figure 3. Box-plots du Cu disponible (en log₁₀) dans la zone d'étude centrée sur la cheminée de la Gécamines. Le quadrant sous le vent est noté NW.

absence des dépôts de poussières en provenance de la cheminée de la Gécamines (Figure 4). En saison des pluies, l'érosion hydrique entraîne les horizons de surface vers la vallée et met à nu les horizons B largement moins contaminés. En saison sèche, le vent redistribue les particules vers les zones végétalisées où elles s'accumulent. Il en résulte une variabilité spatiale très forte à l'échelle métrique qui explique que les teneurs moyennes en ETM ne soient pas plus élevées dans le quartier Gécamines.

3.3. Un ensemble d'observations qui se densifie

Suite aux premières études relatives aux contaminations autour de la Gécamines, il est apparu important de changer d'échelle et d'évaluer celles-ci sur un territoire plus large, la ville et sa proche périphérie. Les résultats de différentes études ont été rassemblés dans une même base de données afin d'évaluer les structures spatiales de variation des éléments en traces dans les sols et d'établir des cartes qui pourront évoluer en fonction de la disponibilité des données (Figures 5 et 6).

Les résultats indiquent clairement que le quartier Gécamines a fait l'objet de contaminations sérieuses en Cu (Figure 6) et autres ETM. On retrouve en effet l'axe des vents dominants le long du site de la Gécamines. Des contaminations se sont également produites dans la direction opposée, mais sur des distances beaucoup moins importantes. On notera également l'influence de la mine de l'Étoile à l'est de la zone.

L'analyse multivariée des teneurs en Cd, Cu, Co, Pb et Zn montre que l'ensemble des ETM répond aux mêmes facteurs de distribution spatiale et que les sources de

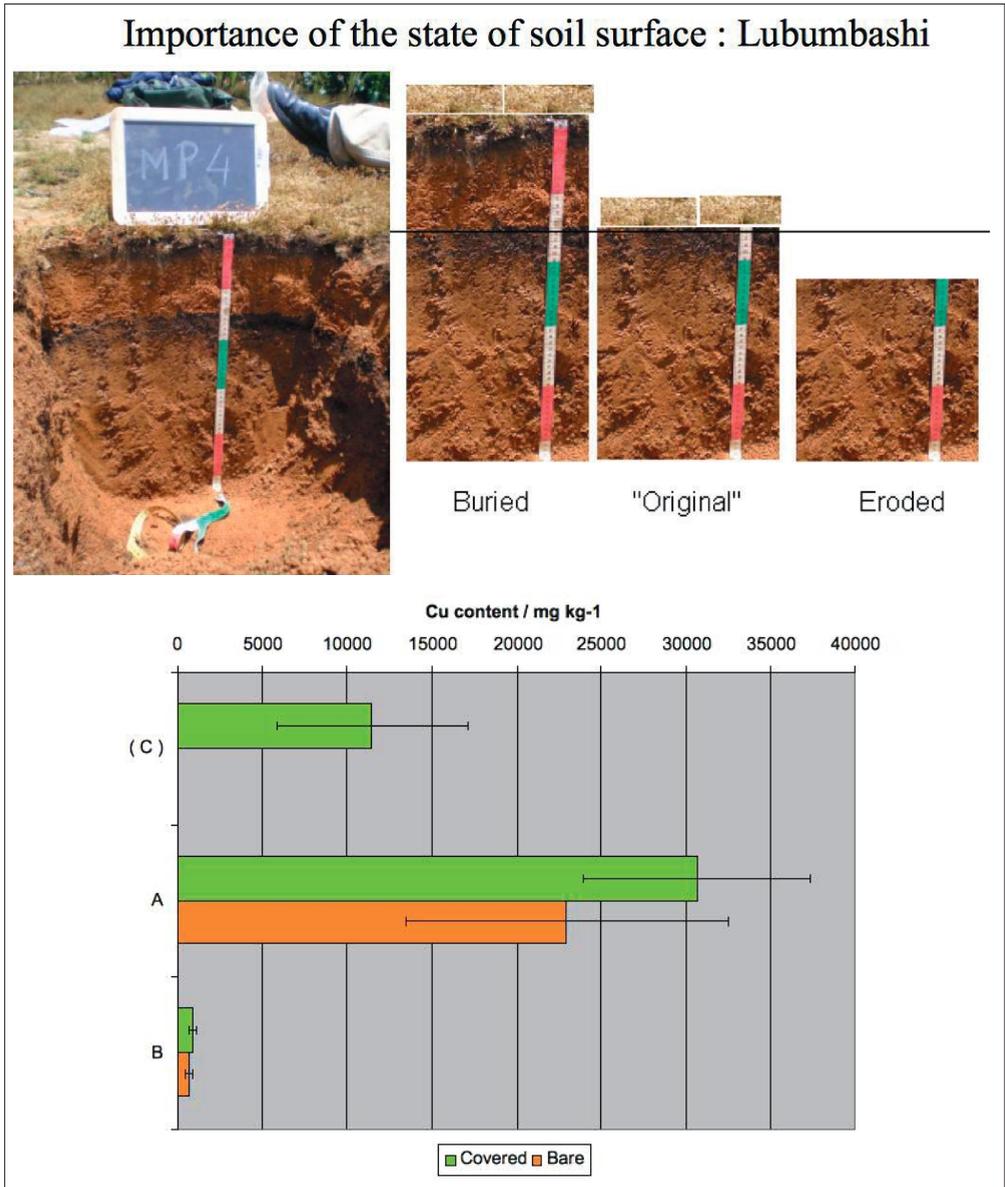


Figure 4. Modèles de sols remaniés par érosion / dépôt rencontrés dans le quartier Gécamines de Lubumbashi et teneurs en Cu dans les différents horizons : (C) dépôt éolien de surface, A horizon organo-minéral, B horizon B argique (Mpundu Mubemba et al., 2009).

contamination des sols par le Cu sont dès lors les mêmes que pour les autres ETM. Ces résultats indiquent que les symptômes des contaminations d'origine industrielle à Lubumbashi sont différents de ceux qui peuvent être observés dans les écosystèmes métallifères naturels (Kaya Muyumba et al., 2015).

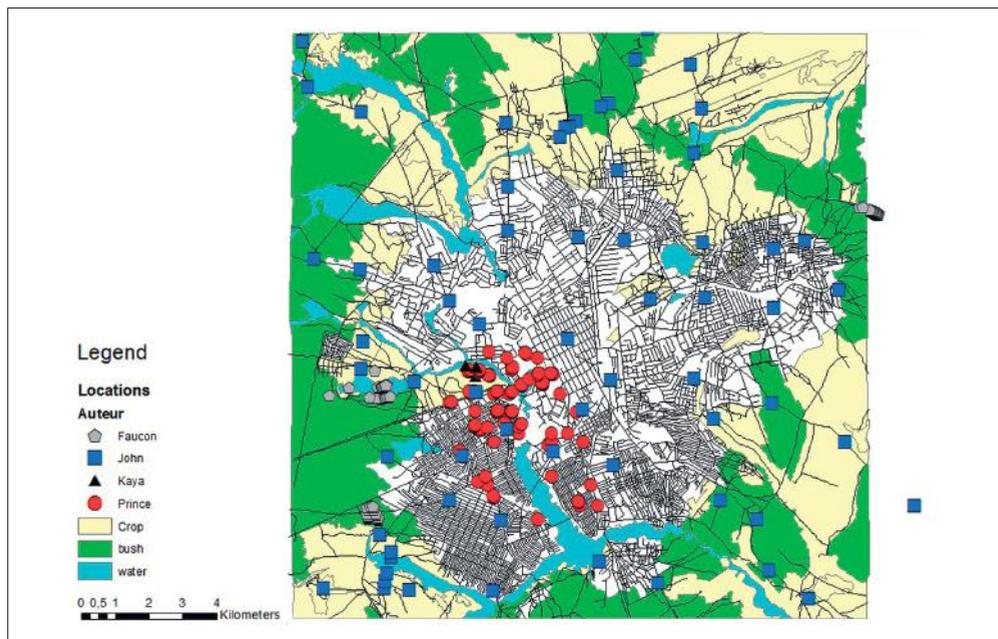


Figure 5. Localisation des données disponibles sur l'état chimique des sols à Lubumbashi et sa périphérie (Mukobo, 2007 ; Kaya Muyumba, 2008 ; Faucon, 2009 ; John, 2009).

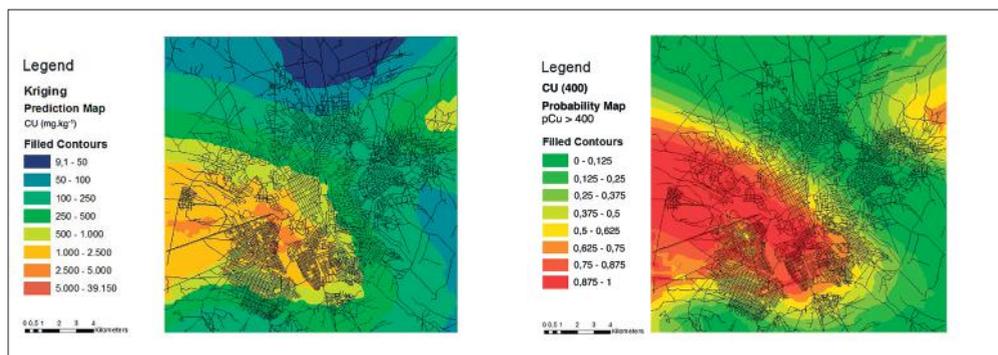


Figure 6. Cartes des teneurs en Cu disponible (gauche) et de probabilité de dépassement de la teneur de fond pédogéochimique (400 mg.kg^{-1}) (droite) à Lubumbashi.

3.4. Contaminations des sols de vallées et sédiments

Un dernier point de discussion concerne la contamination des vallées et des sédiments par rapport à celle observée dans les sols de plateaux et versants. Le fonctionnement pédologique dans ces deux types d'environnement est en effet fondamentalement différent en raison du caractère réducteur des sols hydromorphes et oxydant des sols du domaine aéré. La mobilité de certains éléments comme Fe et Mn est particulièrement sensible aux conditions d'oxydo-réduction. Or, ces éléments influencent également la

sorption des éléments traces. Les études de Kaya Muyumba (2008) et Vandenneede (2015) ont ciblé spécifiquement les sédiments et les sols sur alluvions dans les plaines de Lubumbashi.

Les résultats relatifs aux teneurs en ETM disponibles sont illustrés à la figure 7 pour le cuivre. À quelques exceptions près, les teneurs en Cu dans les sédiments suivent la logique de contamination identifiée pour les sols de plateaux. Toutefois, pour certains lieux de prélèvement de sédiments, des analyses de sol sur la berge du cours d'eau et sur la plaine alluviale voisine confirment la forte hétérogénéité à courte distance entre ces points, particulièrement dans les zones contaminées (Vandenneede, 2015). Tant les sédiments que les alluvions anciennes doivent être perçus comme des échantillons qui intègrent les caractéristiques du bassin versant drainé en amont, à l'instar des approches de caractérisation du fond géochimique. Toutefois, les sédiments constituent la part active actuelle des redistributions tandis que les plaines alluviales ont potentiellement reçu des contaminations atmosphériques ultérieurement au dépôt des alluvions. Il apparaît clairement que c'est la rivière Karavia qui, en découpant le plateau du quartier Gécamines, se charge de sédiments contaminés qui à leur tour contaminent la rivière Lubumbashi en aval de l'ancienne usine. Il est possible que les remblais toujours présents sur ce site contaminent également directement la rivière Lubumbashi. Il n'est à ce stade pas possible de quantifier l'importance du transport de sédiments actifs par la rivière par rapport aux rejets directs pour cette zone.

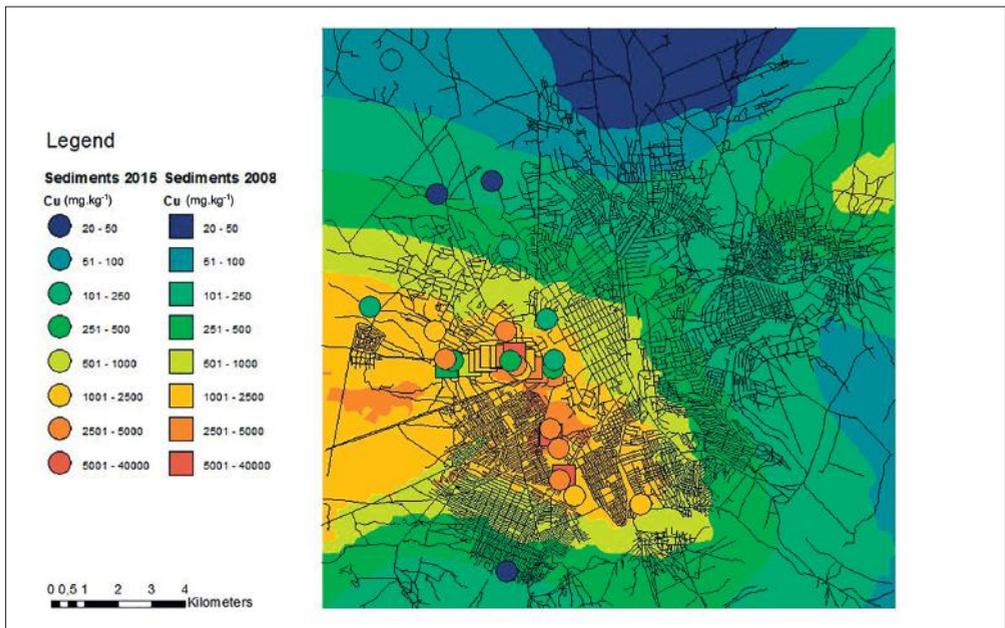


Figure 7. Carte des teneurs en Cu disponible (en mg.kg⁻¹) dans les sédiments à Lubumbashi d'après les études de Kaya Muyumba (2008) et Vandenneede (2015). Le fond correspond aux valeurs interpolées pour les sols de plateaux avec la même échelle de couleur.

En ce qui concerne la mobilité du Cu et du Co dans les sédiments, les sols de vallées et les sols de plateaux, les recherches menées jusqu'ici n'ont pas permis de conclure à des différences de fonctionnement entre ces systèmes.

4. Conclusions

Les travaux menés ont montré la difficulté de réaliser une cartographie par interpolation dans ce type d'environnement fortement anthropisé en raison d'une variabilité spatiale très importante à courte distance, due notamment aux redistributions paysagères par érosion.

Les résultats confirment toutefois le fort degré de contamination de la ville de Lubumbashi suite aux activités de traitement des minerais. Le cuivre n'est en outre pas le seul ETM dans les contaminations, car les autres éléments étudiés suivent le même patron de contamination. La mise en place d'un SIG environnemental pourrait être un préalable à la planification de solutions de remédiation, en établissant des priorités en fonction de l'état chimique des sols.

En particulier, les sols de vallées constituent un enjeu important, car ils sont de plus en plus sollicités pour le développement du maraîchage. Or, les études montrent que ces milieux sont au moins aussi contaminés que les sols environnants, ce qui suscite des questions quant au caractère sanitaire de cette activité économiquement cruciale pour certains groupes de population.

Bibliographie

- Andres L., 2008. *Étude de l'impact des contaminations métalliques sur les propriétés des sols autour de Lubumbashi*. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).
- Baize D., 1997. *Un point sur : Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols*. Paris : INRA.
- Baize D., 1999. Éléments traces dans les sols. Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles : définitions et utilités. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, **57**, 63-72.
- Banza C.L.N. et al., 2009. High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, a mining area of the Democratic Republic of Congo. *Environ. Res.*, **109**(6), 745-752.
- Cao S., Lu A., Wang J. & Huo L., 2017. Modeling and mapping of cadmium in soils based on qualitative and quantitative auxiliary variables in a cadmium contaminated area. *Sci. Total Environ.*, **580**, 430-439.
- Colinet G., 2003. *Éléments traces métalliques dans les sols. Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge*. Thèse de doctorat : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).
- Faucon M.-P., 2009. *Écologie 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, Bruxelles.
- 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*). Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).
- Gustin M.S., Lindberg S.E. & Weisberg P.J., 2008. An update on the natural sources and sinks of atmospheric mercury. *Appl. Geochem.*, **23**(3), 482-493.
- John A., 2009. *Contribution à l'évaluation du risque de contamination de la chaîne alimentaire par les éléments traces métalliques, dans le cadre des activités d'élevage et de production agricole à Lubumbashi*. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).
- Kaya 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 Gécamines S*. Mémoire DEA : UNILU, Lubumbashi (RDC).
- Kaya Muyumba D. et al., 2015. Caractérisation des systèmes sols-plantes dans les collines de l'arc cuprifère du Katanga (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **19**(2), 204-214.
- Lee H., Choi Y., Suh J. & Lee S.O., 2016. Mapping copper and lead concentrations at abandoned mine areas using element analysis data from ICP-AES and Portable XRF instruments: a comparative study. *Int. J. Env. Res. Public Health*, **13**, 384.
- Leteinturier B., 2002. *Évaluation des potentialités phytocénologiques des gisements cupriques d'Afrique centro- australe en vue de la phytoremédiation des sols pollués par les activités minières*. Thèse de doctorat : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).
- Liénard A., Brosteaux Y. & Colinet G., 2014. Soil contamination near a former Zn-Pb ore-treatment plant: Evaluation of deterministic factors and spatial structures at the landscape scale. *J. Geochemical Exploration*, **147**, 107-116.
- Liu H. et al., 2017. Source identification and spatial distribution of heavy metals in tobacco-growing soils in Shandong province of China with multivariate and geostatistical analysis. *Environ Sci Pollut Res.*, (On Line). DOI 10.1007/s11356-016-8229-1
- Lubalega K.T., 2009. *Contaminations métalliques et termitières autour de lubumbashi*. Mémoire DEA : Lubumbashi (RDC).
- Lubalega K.T., Ngongo M., Lejoly J. & Colinet G., 2015. Contaminations en éléments traces métalliques des termitières autour de Lubumbashi. *Congo Sciences*, **3**(1), 49-55.
- Maelkerbergh 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*. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).
- Manda B.K. et al., 2010. Évaluation de la contamination de la chaîne trophique par les éléments traces (Cu, Co, Zn, Pb, Cd, U, V et As) dans le bassin de la Lufira supérieure (Katanga/D.R. Congo). *Tropicultura*, **28**, 246-252.
- Marrugo-Negrete J., Pinedo-Hernández J. & Díez S., 2017. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environ. Res.*, **154**, 380-388.
- Mbenza M., Aloni K. & Muteb M., 1989. Quelques considérations sur la pollution de l'air à Lubumbashi (Shaba, Zaire). *Géo-Eco-Trop.*, **13**(1-4), 113-125.
- Mpundu Mubemba M., 2010. *Contaminations des sols en éléments traces métalliques à Lubumbashi (Katanga/R.D. Congo). 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, Lubumbashi (RDC).
- Mpundu Mubemba M. et al., 2009. *Mapping of soil-sediment systems contaminations around a metal-ore smelter. The example of Cu in Lubumbashi (R.D. Congo)*. Poster presented at EGU.

- Mukobo R.P., 2007. *Évaluation et cartographie des contaminations des sols autour du site de la Gécamines*. Mémoire DEA : UNILU, Lubumbashi (RDC).
- Shen F. et al., 2017. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil near a Pb/Zn smelter in Feng County, China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **139**, 254-262.
- Sys A. & Schmitz A., 1959. *Notice explicative de la carte des sols et de la végétation*. Bruxelles : I.N.E.A.C.
- Vandenhede N., 2015. *Approche exploratoire de la distribution spatiale des contaminations en cuivre et en cobalt de sols hydromorphes du Katanga et de leur mobilité à court et long terme*. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).
- Wu J. et al., 2014. Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. *PLoS ONE*, **9**(11), e112917. Doi:10.1371/journal.pone.0112917