http://lib.uliege.be https://matheo.uliege.be

þÿ P O L L U T I O N D E L A R I V I E R E N D J I L I E T C O N T R A I N T E S D SOLS AUTOUR DU POOL MALEBO (Cas du site agricole Masina Rail 1/Kinshasa)

Auteur : Falasi Nitu, Joseph
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/2268.2/5571

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

POLLUTION DE LA RIVIERE N'DJILI ET CONTRAINTES DE GESTION DES SOLS AUTOUR DU POOL MALEBO (CAS DU SITE AGRICOLE MASINA RAIL 1/KINSHASA)

FALASI NITU JOSEPH REAGAN

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

Filière Eau et Sol

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : Pr. GILLES COLINET

a

« *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 promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg et/ou de l'UC L ».

Le présent document n'engage que son auteur

« Auteur du présent document : FALASI NITU Joseph Reagan,
reaganfalasi@gmail.com ».

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

UCL - Faculté des Bioingénieurs

POLLUTION DE LA RIVIERE N'DJILI ET CONTRAINTES DE GESTION DES SOLS AUTOUR DU POOL MALEBO (CAS DU SITE AGRICOLE MASINA RAIL 1/KINSHASA)

FALASI NITU JOSEPH REAGAN

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

Filière Eau et Sol

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : Pr. GILLES COLINET

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire de master, mes pensées s'orientent avant tout vers Dieu en qui j'ai la vie, le mouvement et l'être (Actes des Apôtres 17, 28). Qu'il soit béni pour ses merveilles en ma faveur.

Je remercie vivement mon Promoteur le Professeur Gilles Colinet, qui a bien accepté la direction de ce travail et s'est chargé de l'analyse des éléments traces métalliques dans les échantillons végétaux. Ses orientations scientifiques et son attitude à mon égard, m'ont été d'un grand appui. A travers lui, que messieurs Tarantino et Vandenberghe qui m'ont réservé bon accueil à Gembloux et conservé les échantillons, soient aussi remerciés.

Ma gratitude s'exprime également envers le Professeur Vincent Debbaut qui a été d'une générosité extrême en ma faveur. En effet c'est lui qui m'a aidé dans l'analyse des échantillons d'eau et de sols, malgré son agenda chargé et sans rien payer. Pour des bons moments passés au Laboratoire des Ressources Hydriques à Arlon, je remercie aussi tout le personnel que j'ai pu y rencontrer.

Je pense aussi à tous ceux qui ont contribué à la collecte des échantillons à Kinshasa ou à leur transport en Belgique. Il s'agit principalement de messieurs José Nlandu, Fiston Kayembe, Giresse Falasi et Jeff Lupwe, mademoiselle Bélinda Feza, ma collègue Grace Mbangama, mesdames Fifi Falasi et Marie Jeanne, et Prof. Minengu. Que les paysans du site agricole masina rail 1 qui ont coopéré à la réalisation de ce travail, trouvent aussi l'expression de ma gratitude. De même, mes amis Désiré Bisimwa, Erick Lutete et Monshe Zico qui travaillent à Kinshasa, ont mis à disposition l'appareil photographique ou participé à la réalisation des cartes du site. Je leur dis merci pour la sympathie dont ils ont fait montre.

Mes remerciements s'adressent aussi au Dr Antoine Dénis et aux autres Responsables de notre Master, à tous nos Formateurs durant ce programme tant à Arlon qu'à Louvain-la-Neuve, ainsi qu'à l'ARES qui a financé ces études en Belgique. De plus, que ceux qui m'ont aidé lors des démarches de voyage vers la Belgique dont madame Gisèle Kubindana, trouvent en ces mots, l'expression de ma gratitude.

Mon frère Jeff Lupwe, sa femme Fabiola Madidi, et leurs enfants Milca, Océanne et Fréderic, m'ont bien accueilli en Belgique, et ma reconnaissance à leur endroit est infinie. Je n'oublierais pas non plus l'hospitalité d'autres amis et connaissances rencontrés ou retrouvés en Europe, comme Dieudonné, Edouard, Bode et sa petite famille, Gaétan Kalala, madame Nadine Kambashi, Professeur Malumba, Pathy Kibungu, Manu Mukoma, Junior Mundele, Maxime Selemani, Patricia Onia, Kennedy, Jean-Paul, Papy Bonkena, Julio, Michael Nzola, Tresor Bongwa et tant d'autres.

Ma reconnaissance s'exprime aussi à l'endroit des collègues de classe et voisins des homes, avec lesquels j'ai passé des bons moments en Belgique. Je citerais notamment, Toussaint, Alix, Marion, Marcoty, Vanessa, Ferdinand, Grace, Firmin, Ibra, Starence, Larissa, Jos, Ephrem, Didier, Hughes, Liliane, Esther, Rita, Rindra, Elie, Carlos, Jean-Marie, Moumouni, Adahir, Romain, Launay, Mbaye, Amélie et Mariama.

Pour clore, je remercie les membres de ma famille, mes Professeurs et mes amis restés en Afrique, pour leur soutien intellectuel, moral et spirituel. Loin des yeux et distants de milliers de kilomètres, nous sommes restés proches de cœur.

DEDICACE

Ce travail est dédié à mes parents Simon FALASI et Joséphine LUYULA, à ma femme Félicité et à notre fille Félicia

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS i
DEDICACE ii
TABLE DES MATIERES iii
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES v
RESUME vii
ABSTRACT viii
INTRODUCTION ET REVUE DE LA LITTERATURE 1
CONTEXTE 1
PROBLEMATIQUE 1
HYPOTHESES 2
OBJECTIF 3
LIMITATION DE L'ETUDE 3
REVUE DE LA LITTERATURE 3
SUBDIVISION DU TRAVAIL 4
CHAPITRE UN : PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE 5
1.1.POOL MALEBO 5
1.1.1. Présentation et Localisation 5
1.1.2. Sols et Climat 6
1.1.2.1. Sols 6
1.1.2.2. Climat 9
1.1.3. Importance environnementale et socio-économique 10
1.1.3.1. Protection contre les inondations 11
1.1.3.2. Exutoire des déchets déversés dans les cours d'eaux 11
1.1.3.3. Agriculture et pêche artisanale 12
1.1.3.1. Maraichage 13
1.1.3.1.1. Légumes produits 13
1.1.3.1.2. Sources d'eau d'arrosage 14
1.1.3.2. Riziculture 15
1.2. RIVIERE N'DJILI 16
1.2.1. Présentation du bassin versant de la N'djili 17
1.2.1.1. Situation géographique 17
1.2.1.2. Hydrographie et délimitation du bassin versant 17
1.2.1.3. Géomorphologie du bassin versant de la rivière N'djili 18
1.2.1.4. Occupation et aménagement du bassin 18
1.2.1.5. Problèmes causés par l'urbanisation du bassin versant 18
1.2.2. Qualité des eaux de la rivière N'djili 19
1.2.2.1. Paramètres physiques et éléments majeurs 19

1.2.2.2. Eléments traces métalliques....20
1.2.2.2.1. Données sur la pollution en éléments traces métalliques de la rivière N'djili....20
1.2.2.2.2. Origines de la pollution en ETM....21
1.2.2.2.3. Conséquences établies et probables de la pollution en ETM de la rivière N'djili....23
CHAPITRE DEUX : MATERIEL ET METHODES....25
2.1. ECHANTILLONAGE....25
2.1.1. Collecte des échantillons d'eau....25
2.1.2. Collecte des échantillons de sol....25
2.1.3. Collecte des échantillons végétaux....26
2.2. ANALYSES DE LABORATOIRE....27
2.2.1. Echantillons de sol et d'eau....28
2.2.2. Echantillons végétaux....28
2.3. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES....29
CHAPITRE TROIS : RESULTATS ET DISCUSSION....30
3.1. PRESENTATION DES RESULTATS....30
3.1.1. Eau....30
3.1.2. Sols....31
3.1.3. Echantillons végétaux....34
3.2. DISCUSSION DES RESULTATS....37
3.2.1. ETM dans l'eau....37
3.2.2. ETM dans les sols....38
3.2.3. ETM dans les échantillons végétaux....38
CONCLUSION ET PERSPECTIVES....40
BIBLIOGRAPHIE....41
ANNEXES....47

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude 5
Figure 2 : Localisation du pool malebo 5
Figure 3 : Geologic map of Kinshasa City 7
Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques d'un Arénosol à Kinshasa, autour du pool malebo ... 8
Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques d'un Histosol à Kinshasa 9
Figure 4 : Moyennes mensuelles des précipitations à la station de Kinshasa/ N'djili de 1986-1995) 10
Figure 5 : Moyennes mensuelles de nombre de jours de pluies sur une période de 10 ans (1986-1995) à la station de Kinshasa/ N'djili 10
Figure 6 : Carte des zones humides de la RD Congo 11
Figure 7 : Bloc maraicher du site masina rail 1 12
Figure 8 : Occupation du sol du site masina rail 1 13
Figure 9 : Plates-bandes d'amarante au site masina rail 1 13
Figure 10 : Puits à buse plus haut que la surface du sol 14
Figure 11 : Couverture ou non des puits à buse 14
Figure 12 : Canal de drainage en saison sèche 15
Figure 13 : Puits à buse dans les rizières 15
Figure 14 : Rivière N'djili le long du site masina rail 1 16
Figure 15 : Ecroulement de la digue sur les berges de la rivière N'djili 17
Figure 16 : Hydrographie du bassin de la rivière N'djili 18
Figure 17 : Indice de transport soluble des différents éléments 22
Figure 18 : Prélèvement des échantillons d'eau dans la rivière N'djili 25
Tableau 4 : Synthèse sur les échantillons prélevés 26
Tableau 5 : Moyenne ± écart-type d'éléments dans les échantillons d'eau (mg/l) en saison sèche 30
Tableau 6 : Moyenne et écart-type d'éléments dans les échantillons d'eau (mg/l) en saison pluvieuse 30
Tableau 7 : Matrice de corrélation des éléments présents dans l'eau en saison sèche 31
Tableau 8 : Matrice de corrélation des éléments présents dans l'eau en saison pluvieuse 31
Tableau 9 : Moyenne et écart-type d'éléments dans les échantillons de sol (mg/l) en saison sèche 31
Tableau 10 : Moyenne et écart-type d'éléments dans les échantillons de sol (mg/l) en saison pluvieuse 32
Tableau 11 : Matrice de corrélation des éléments dans le sol en saison sèche 33
Tableau 12 : Matrice de corrélation des éléments dans le sol en saison pluvieuse 33
Tableau 13 : Moyenne et écart-type d'ETM dans les échantillons végétaux (mg/Kg de MF) en saison sèche 34
Tableau 14 : Moyenne et écart-type d'ETM dans les échantillons végétaux (mg/Kg de MF) en saison pluvieuse 34

Figure 19 : Teneur en Cu dans l'amarante et les grains de riz 35
Figure 20 : Teneur en Pb dans l'amarante et les grains de riz.....35
Figure 21 : Teneur en Pb dans l'amarante selon les saisons.....36
Figure 22 : Teneur en Cd dans l'amarante selon les saisons 36
Tableau 15 : Matrice de corrélation des ETM dans l'amarante en saison sèche 36
Tableau 16 : Matrice de corrélation des ETM dans l'amarante en saison pluvieuse.....37
Tableau 17 : Matrice de corrélation des ETM dans les grains de riz échantillonnés dans les rizières en saison pluvieuse 37
Tableau 18 : Matrice de corrélation des ETM dans les grains de riz prélevés sur l'aire de séchage en en saison sèche.....37

RESUME

Le transfert des éléments traces métalliques (ETM) de l'environnement vers la chaine alimentaire est une source importante d'inquiétude au niveau global. Nous avons abordé cette problématique autour du pool malebo (Kinshasa/RD Congo), dans le site agricole masina rail 1. Il s'agissait de vérifier l'existence de la pollution en ETM de la rivière N'djili, des sols et des cultures sur ce site.

Pour ce, des échantillons d'eau, de sol, d'amarante et de grains de riz ont été prélevés en saisons sèche et pluvieuse. L'extraction des ETM a été réalisée grâce à l'eau régale (pour les échantillons de sol et d'eau) ou par minéralisation nitro-perchlorique. Leur dosage fut réalisé par ICP-MS (pour l'eau et le sol) ou par spectrophométrie d'absorption atomique (pour les échantillons végétaux), en Belgique (laboratoires de Sciences hydriques à Arlon, et d'échanges eau-sol-plantes à Gembloux Agro-Bio Tech). Les données recueillies ont été analysées par le logiciel JMP Pro 13.

Les résultats montrent que les teneurs en ETM dans l'eau, sont soit faibles par rapport aux valeurs seuils (pour Cr et Zn), soit inférieures aux limites de détection de l'ICP-MS (Pb, Cd, Cu, As, Se, Ni, Co). De même, les concentrations en ETM des sols ont toutes été en-dessous des standards.

Par contre, les teneurs en Pb (> 0,3 mg/kg) dans l'amarante excèdent les limites fixées, alors que dans les grains de riz, le seuil n'était dépassé pour aucun ETM analysé. Cela montre que malgré une faible accumulation du Pb dans le sol, certains facteurs favoriseraient sa phytodisponibilité pour l'amarante. Il est donc important de les étudier pour limiter la concentration en cet élément dans les légumes, car il est susceptible de réduire la productivité agricole et intoxiquer les consommateurs.

Pour les grains de riz en revanche, des études doivent être menées pour renforcer l'accumulation de Zn, qui est un oligo-élément important pour la nutrition humaine et dont beaucoup de consommateurs à Kinshasa, sont carencés.

Mots clés : pollution, rivière N'djili, pool malebo, site agricole masina rail 1, éléments traces métalliques

ABSTRACT

The transfer of metallic trace elements from the environment (MTE) to the food chain is an important source of concern at the global level. We approached this issue around the malebo pool (Kinshasa/DR Congo), in the agricultural site masina rail 1. It was a question of verifying the existence of the MTE pollution of the N'djili river, soil and crops at this site (malebo pool).

For this, samples of water, soil, amaranth and rice grains were collected during the dry and rainy seasons. Extraction MTE was performed using aqua regia (for soil and water samples) or by nitro-perchloric mineralization. The assay was carried out by ICP-MS (for water and soil) or by atomic absorption spectrophotometry (for plant samples), in Belgium (water science laboratory in Arlon, and water-soil-plants exchanges laboratory in Gembloux Agro-Bio Tech). The data collected was analyzed by the JMP Pro 13 software.

The results found show that the concentrations of MTE in water are either low compared to the threshold values (for Cr and Zn), or lower than the detection limits of ICP-MS (Pb, Cd, Cu, As, Se, Ni, Co). Similarly, soil MTE concentrations have all been below standard.

In contrast, Pb levels (> 0.3 mg / kg) in amaranth exceed the fixed limits, whereas in rice grains, the threshold was exceeded for no analyzed MTE. This shows that despite a slow accumulation of Pb in the soil, some factors favor its phytoavailability for amaranth. It is therefore important to study them to limit the concentration in this element in vegetables, because it is likely to reduce agricultural productivity and intoxicate consumers.

For rice grains, however, studies must be conducted to enhance the accumulation of Zn, which is an important trace element for human nutrition and which many consumers in Kinshasa, are deficient.

Key words: pollution, N'djili River, malebo pool, agricultural site masina rail 1, metallic trace elements

INTRODUCTION ET REVUE DE LA LITTERATURE

CONTEXTE

Ce travail s'inscrit dans la problématique globale du transfert des éléments traces métalliques de l'environnement vers la chaine alimentaire, qui est une source importante d'inquiétudes et un sujet de nombreuses recherches à travers le monde (Amlan et al., 2012; Liénard et Colinet, 2018; Patel et al., 2016). Nous l'abordons à une échelle locale, autour du pool malebo, à Kinshasa (RD Congo).

Le pool malebo est un delta intérieur formé par le fleuve Congo entre ses cours inférieur et moyen. Il est situé entre 4°5' et 4°18'Sud, et 15°19' et 15°32'Est. Cette masse d'eau est entourée d'un ensemble de plaines inondables par les crues saisonnières, dont la superficie est de 6000 ha à Kinshasa (Tembeni et al., 2014; NEPAD-FAO, 2006 ; PARRSA-RD Congo, 2009 ; République Démocratique du Congo, 2009 ; Shomba et al., 2015).

Ces plaines, drainées par deux grandes rivières (N'djili et N'sele) (IGIP, 2007, cité par Lokakao et Shamba, 2015; Monsembula et al., 2013), sont le siège d'activités agricoles. On y dénombre 8 sites agricoles dont Masina rail 1 (notre milieu d'étude) qui longe la rivière N'djili, et où l'on pratique le maraichage sur 4ha, et la riziculture sur plus de 220ha, dans la zone inondable (Kasongo et Yumba, 2009 ; enquête non publiée de l'OSFAC : Observatoire des forêts d'Afrique Centrale).

PROBLEMATIQUE

La rivière N'djili est polluée en certains éléments traces métalliques (ETM). Le long d'un site agricole localisé à quelques kilomètres en amont de notre zone d'étude, les teneurs en cadmium, cobalt et cuivre dans l'eau, ont été, respectivement, supérieures à 0.1 mg/l, 0.05 mg/l, 0.02 mg/l et 0.2 mg/l, en saisons sèche et pluvieuse de l'année 2005 (Kifuani, 2009). Pourtant, les seuils pour un point d'eau utilisable en irrigation à long terme, sont respectivement de 0.01 mg/l, 0.05 mg/l et 0.017 mg/l, pour Cd, Co et Cu (FAO/OMS, 2014, cité par Diouf, 2016).

D'autres ETM se retrouvent plutôt en abondance dans les sédiments que dans l'eau de N'djili. C'est le cas du mercure dont la teneur, dans une étude, était faible dans l'eau mais atteignait 0,5 mg/kg dans les sédiments (Tshibanda et al., 2014).

La concentration en d'autres ETM n'est pas inquiétante pour un usage agricole, mais non-conforme pour la boisson. Selon des prélèvements faits en 2008, la concentration en Pb dépassait 3 mg/l (Lumbuenamo et al., 2010), alors que d'après l'OMS (2017), le maximum admissible est à 0.01 mg de Pb/l. D'autres ETM (Zn, As et Se) ont aussi été signalés dans l'eau de N'djili, bien qu'à des proportions admissibles pour l'irrigation et la boisson (Partow, 2011).

Les causes de cette pollution en ETM de la rivière N'djili, seraient notamment, le dépôt de sédiments (39,5 t/ha/an en 2013) (Lemba, 2013; Ndolo, 2015) ; l'évacuation des boues d'épuration par l'usine de traitement d'eau installée sur la rivière (Bipendu et al., 2017) ; le déversement d'effluents industriels (Gizanga et al., 2016), des déchets domestiques (Mindele, 2016) et des déchets hospitaliers non-traités

(Kasuku et al., 2016 ; Ilunga et al., 2013) ; le mélange des eaux de la N'djili avec celles du fleuve Congo, polluées en Hg, Pb et Cd au niveau du pool malebo (Nsimanda et al., 2015) ; la minéralisation des plantes poussant dans les marécages, enrichis en ETM par bioaccumulation (Singh et al., 2017) ; les précipitations atmosphériques, qui emporteraient certains métaux et métalloïdes polluant l'air à Kinshasa (As, Pb et Ni)(Kabamba et al., 2016) ; et l'apport de pesticides tel le sulfate de cuivre (Boland et al., 2004 ; Muzingu, 2010), dont la contribution peut être minimisée vu les très faibles quantités utilisées (Kasongo et Yumba, 2009).

Une des conséquences de la pollution de la rivière N'djili, est la contamination de l'eau de nappe. En effet, lors de l'étude réalisée en 2005 et évoquée ci-haut (Kifuani, 2009), on a relevé que les teneurs en Cd, Cr, Co, Ni et Cu dans l'eau des puits utilisée par des maraichers pour l'arrosage, dépassaient aussi les limites fixées par la FAO (FAO/OMS, 2014, cité par Diouf, 2016). Vu les concentrations généralement négligeables des ETM dans les eaux souterraines à Kinshasa, suite à un faible fond géochimique (Ndembo, 2009), cette pollution des eaux de puits serait causée par la rivière N'djili (Vernoux et al., 2010).

La pollution de cette rivière peut encore engendrer d'autres problèmes, dont la contamination en ETM des sols des parcelles rizicoles au moment des crues, et celles des cultures de riz exposées à ces éléments (Vernoux et al., 2010 ; Patel et al., 2016) ; la contamination en ETM des sols arrosés avec l'eau de N'djili ou des puits (Amlan et al., 2012), et celle des légumes cultivés sur ces sols sujets à l'accumulation des ETM (Mihali et al., 2012). En ce qui concerne le sol, les inquiétudes peuvent se fonder sur la teneur en ETM des matériaux argileux dans un site inondable par la rivière N'djili, situé en face de notre zone d'étude, et qui fait l'objet d'une exploitation artisanale d'argiles. Ils avaient dosé, lors d'une étude en 2012, jusqu'à 230 mg de Cu/kg, 490 mg de Co/kg, 890 mg de Pb/kg et 960 mg de Zn/kg (Wetshondo, 2012).

Dans l'hypothèse d'une contamination des sols et des produits végétaux, le risque d'intoxication des consommateurs est à craindre (Mpundu et al., 2013b). Les personnes concernées pourraient souffrir, notamment de cancer, d'obésité et des maladies cardiovasculaires (Diallo et al., 2013).

Pourtant, à ce jour, aucune étude ne s'est penchée sur cette possible contamination des sols et des cultures du site masina rail 1 en ETM, résultant d'un transfert des polluants à partir de la rivière n'djili. Si la contamination des sols du site étudié se confirmait, cela constituerait une contrainte majeure à la gestion de ces sols.

HYPOTHESES

Au regard de ce qui précède, nous estimons qu'il est possible que (') :

- certains ETM contenus dans la rivière N'djili et les autres points d'eau utilisés, s'accumulent dans les sols des rizières et des plates-bandes maraichères, et atteignent des concentrations supérieures aux seuils tolérables ;
- une partie des ETM accumulés dans ces sols contaminés, soit transférée dans les cultures de riz et les légumes prêts à la récolte, et y atteint un seuil toxique pour les consommateurs.

OBJECTIF

Ainsi, la présente étude vise à vérifier l'existence de la pollution en ETM de la rivière N'djili, des sols et des cultures au site masina rail 1 (pool malebo). Spécifiquement, il s'agit de :

- mesurer la teneur en ETM de l'eau de N'djili et d'autres points d'eau, ainsi que celle des sols et de quelques produits de récolte sur ce site ;
- comparer les valeurs obtenues aux standards fixés.

LIMITATION DE L'ETUDE

Le processus d'accumulation des ETM dans le sol ou celui de leur transfert vers la plante, est lent (Abdu, 2010). Par conséquent, une étude plus longue aurait été mieux par rapport à notre travail qui ne s'est réalisé que sur une seule année. De même, pour mieux prendre en compte les transferts latéraux possibles des ETM dans les sols (Colinet, 2003), l'échantillonnage dans le site masina rail 1, devait bénéficier d'une très grande couverture spatiale. Mais la taille du site (plus de 200 ha) et les moyens disponibles, ont été contraignants.

De plus, en ce qui concerne le dosage des ETM dans le sol, nous n'avons pas procédé à leur spéciation mais nous sommes limités aux teneurs pseudo-totales. Aussi, il était difficile d'isoler les autres sources possibles des ETM dans le sol, telles que les matières organiques utilisées dans les exploitations maraichères (McBride et Cherney, 2004). Mais le fond géochimique a été négligé à juste titre, car il est considéré faible selon Ndembo (2009).

Quant à l'analyse des tissus végétaux, elle n'a porté que sur les parties consommables, alors que certains ETM transférés dans la plante peuvent rester au niveau des racines (non consommables pour les plantes échantillonnées), le cas de ceux modérément mobiles (Ni, Cd et Zn) et ceux fortement liés aux cellules racinaires (Co, Cu, Cr, Pb et Hg) (Kabata-Pendias et Pendias, 2001).

REVUE DE LA LITTERATURE

La problématique de la contamination des cultures par des ETM en milieux urbains et péri-urbains, a été traitée dans nombre d'études, dont nous sélectionnons certains résultats ci-après. Ces éléments sont définis comme des métaux et métalloïdes dont la concentration est inférieure à 1g/kg de matière sèche dans la croûte terrestre ou 0.1 g/kg de matière sèche dans les organismes vivants (Tessier, 2012). Certains sont réputés toxiques sur la santé humaine, et plus généralement, on cible 9 éléments à risque ci-après : Cd, Pb, Hg, As, Ni, Cr, Cu, Zn, et Se (Burnol et al., 2006). Les lecteurs intéressés par des connaissances générales sur les ETM, peuvent se référer à Hooda (2010).

Les sources des ETM dans les sols des sites agricoles urbains et périurbains, sont diverses. Il peut s'agir de l'eau de rivière polluée, utilisée pour l'irrigation des cultures maraichères, ou qui inonde les rizières au moment des crues. Le transfert des ETM présents dans l'eau se réalise progressivement, et ils s'accumulent dans les plantes, et plus encore dans le sol (Zhang et al., 2010).

Malgré l'accumulation des ETM dans le sol, leur concentration peut rester faible comme dans un site inondable par une rivière polluée au Nigéria, où les teneurs en Cd, Cr et As n'ont pas été détectables par

l'ICP-MS (Ayinde, 2015). L'accumulation des ETM dans le sol peut aussi s'avérer importante sans donner lieu à la contamination des végétaux, tel que l'ont observé Nazih et al. (2009), dans un sol Marocain. Dans ce dernier cas, les propriétés physico-chimiques des sols favorisaient plutôt un piégeage des ETM au niveau des sols, réduisant ainsi leur phytodisponibilité. En d'autres situations, les cultures réalisées sur des sols contaminés peuvent absorber des quantités importantes d'ETM. Tel a été le cas du riz irrigué au Bengladesh, où la teneur en As des grains variait de 44 à 270 mg/kg. Ce, du fait de la phytodisponibilité de cet ETM et de la tendance hyperaccumulatrice du riz vis-à-vis de ce métalloïde (Patel et al., 2016).

L'effet de la rivière polluée sur la contamination des sols et des cultures est encore plus important, si le cours d'eau se trouve à proximité des sites miniers. A Lubumbashi, une ville minière au Sud de la RD Congo, Mpundu et al. (2013b) ont montré que les teneurs en Cu, Pb et Zn dans le sol et dans les échantillons de légumes (dont l'amarante), dépassaient largement les seuils. De même, à proximité d'une industrie minière en Roumanie, la teneur en Pb atteignait jusqu'à 29,21 mg/kg de MS dans les plantes, et 3058,82 mg/kg de MS dans les sols agricoles (Mihali et al., 2012).

A part l'eau polluée, d'autres sources d'ETM dans les sols agricoles peuvent être évoquées. A Ngaoundéré (Cameroun), Noubissie (2015) avait révélé que les sources principales de Pb, Hg et Sn retrouvés dans les sols et les cultures (*Lactuca sativa, Amaranthus hybridus et Corchorus olitorius*), ont été les débris de combustion d'ordures ménagères issus des décharges urbaines, avec lesquels les paysans amendaient les sols. Dans une autre ville du même Pays (Yaoundé), il avait été montré que la contamination des sols maraîchers en cadmium, zinc et plomb était causée par plusieurs sources dont les déchetteries, et les ateliers de récupérations métalliques et de dépannages électrotechniques (Nguelieu, 2017). Une multiplicité de sources était aussi à l'origine de la contamination des sols et des cultures en ETM à Kano (Nigéria), Bobo-Dioulasso (Burkina-Faso) et Sikasso (Mali) (Abdu, 2010).

SUBDIVISION DU TRAVAIL

En dehors de la présente introduction et de la conclusion, ce travail est subdivisé en trois chapitres ci-après :

- Chapitre un : Présentation du milieu d'étude
- Chapitre deux : Matériel et méthodes
- Chapitre trois : Résultats et discussion

CHAPITRE UN : PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE

Notre milieu d'étude est le site masina rail 1 (voir figure 1), qui longe la rivière N'djili dans le pool malebo. Ainsi, sa présentation se fait dans le cadre du pool malebo et du bassin de la rivière N'djili.

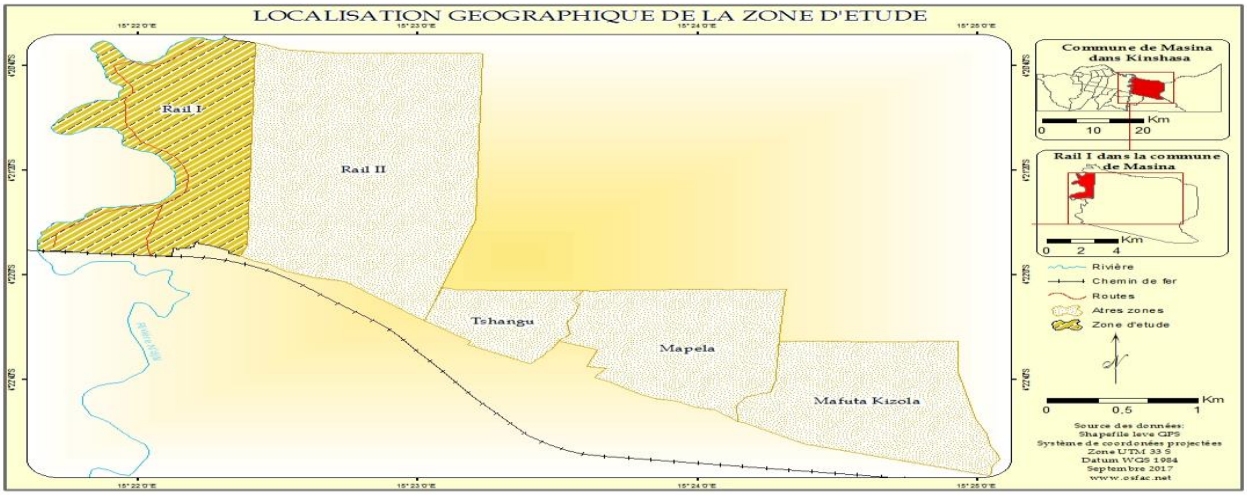


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Carte non-publiée, produite par l'OSFAC)

1.1. POOL MALEBO

1.1.1. Présentation et Localisation

Le pool malebo (ex Stanley Pool) est un delta intérieur de plus de 35 km sur 25 km maximum, formé par le fleuve Congo entre ses cours inférieur et moyen. Il résulte du fait qu'en aval, le fleuve franchit une trentaine de chutes et rapides qui se succèdent sur un dénivelé d'environ 300 m. Le pool est situé entre 4°5'- 4°18'S et 15°19'- 15°32'E, et est entouré d'un ensemble de plaines inondables par les crues saisonnières, localisées de part et d'autre du fleuve Congo, à Kinshasa (en RD Congo) et à Brazzaville (RP Congo) (voir figure 2). Du côté de Kinshasa, la plaine dont la superficie est de 6000 ha, est située au Nord–Est de l'agglomération, à cheval sur trois communes (Limete, Masina et N'sele) (République Démocratique du Congo, 2009 ; NEPAD-FAO, 2006 ; PARSSA-RD Congo, 2009 ; Tembeni et al., 2014 ; Shomba et al., 2015).

Figure 2 : Localisation du pool malebo (ex. Stanley Pool) **(NASA Earth Observatory, Image of the day for March 22, 2004)**

1.1.2. Sols et Climat

1.1.2.1. Sols

D'une manière générale, les sols du pool malebo sont alluvionnaires, riches en matière organique dans les 30 premiers cm, de texture variable (avec des substrats argileux et argilo-sableux), avec une forte teneur en eau qui entraîne de mauvaises conditions d'aération et d'oxydation (NEPAD-FAO, 2006).

Il a aussi été montré, à partir de l'abondance relative en marqueurs de l'oxydation aérobie du méthane (aminotetrol et aminopentol) que les sols du pool malebo sont le siège d'une importante méthanisation, donc ils sont riches en microorganismes méthanotrophes (Spencer-Jones, 2015).

Malgré ces caractéristiques générales des sols du pool malebo, localement l'on observe, d'après Kasongo et Yumba (2009), des sols à propriétés différentes selon les zones géographiques :

- Dans les plaines de l'Ouest, on retrouve soit les sols organiques (dans les parties du pool malebo inondées en permanence), soit des sols sableux podzoliques (dans certaines parties planes assez bien drainées) ;
- A l'Est, il y a successivement, des alluvions sableuses assez bien drainées, et une étroite zone transitoire à texture sablo-limoneuse assez riche en matière organique, dont le drainage interne n'est pas bon ;
- Au Nord-Ouest, soit une grande partie du pool malebo dont notre site d'étude, on observe des sols tourbeux complètement hydromorphes, mais aussi des sols argileux à propriétés gleyiques, dans les zones sèches et surélevées du périmètre, notamment les digues de la rivière Ndjili.

La différence des sols dans les zones du pool malebo résulte, notamment, de la nature des matériaux de départ. En effet, la carte géologique de la ville de Kinshasa ci-dessous, renseigne que les matériaux à partir desquels les sols des plaines entourant le pool malebo se forment, consistent majoritairement en grès tendre, grès siliciclastiques d'Inkisi (ou grès induré du cambrien) retravaillés ou engorgés (ouest), aux dépôts récents dans le bassin d'inondation, et à la tourbe (vers l'extrême ouest) (Lateef et al., 2010). Les sables grossiers se retrouvent particulièrement dans la zone comprise entre les rivières Ndjili et Nsele, et leur profondeur peut atteindre 30 m (Ndembo, 2009).

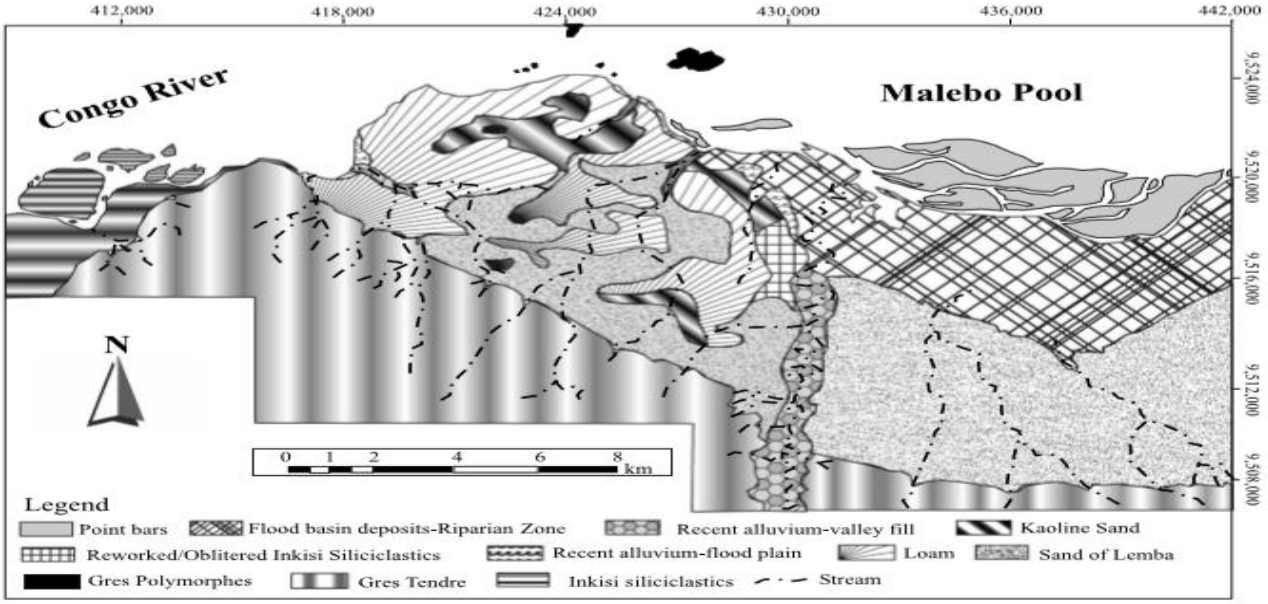


Figure 3: Geologic map of Kinshasa City (Lateef et al., 2010)

Les études systématiques des sols du pool malebo en fonction de leurs classes n'ont pas été réalisées, mais on peut déduire leurs propriétés en partant des profils étudiés en RD Congo pour les sols des mêmes groupes, selon la synthèse de Baert et al. (2009) et Ngongo et al. (2009) :

- **Arénosols et Podzols:**

Les Arénosols ont une texture grossière, ainsi ils sont très perméables à l'eau, et ont une faible capacité de stockage de l'eau et des éléments nutritifs. En revanche, cette richesse en sables les rend faciles à cultiver, et favorise l'enracinement et la récolte des racines ou des cultures à tubercule.

Les Podzols sont aussi des sols sableux qui se forment à partir du sable récemment déposé. On les retrouve notamment dans les régions côtières et alluvionnaires. Les Podzols observés autour du pool malebo (dans les anciennes terrasses du fleuve Congo), sont constitués de sable blanc assez grossier, et ont un horizon albique très profond (parfois > 5 m).

Ci-dessous, la description d'un profil-type d'Arénosol:

- Informations générales :

✓ Localisation : N'Sele (Ville de Kinshasa, autour du pool malebo)

✓ Roche-mère : alluvion (ou colluvion sableux)

✓ Drainage : légèrement excessif

✓ Etat hydrique durant description : frais

- Analyses physico-chimiques :

Les principales caractéristiques physico-chimiques de l'Arenosol décrit ci-avant, sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques d'un Arénosol à Kinshasa, autour du pool malebo (Baert et al., 2009)

Horizon	Profondeur (cm)	Refus > 2 mm	Texture			Classe texturale FAO	CO	N
			argile	limon	Sable			
			%				%	
Ah1	0-18		1	4	95	S	2,07	0,12
Ah2	18-48		1	5	94	S	1,44	0,09
Ah3	48-80		1	4	95	S	0,92	ND
Bws1	80-112		1	5	94	S	0,36	ND
Bws2	112-150		1	4	95	S	0,32	ND
Bws3	150-190		1	5	94	S	0,36	ND
Horizon	Bases échangeables				CEC sol	CEC argile	Saturation en bases	Ca/Mg/K
	Na	Ca	Mg	K				
	cmol (+)/kg de sol					cmol (+)/kg d'argile	%	
Ah1	0,00	0,23	0,02	0,05	7,16		4	77/7/17
Ah2	0,00	0,06	0,01	0,03	4,80		2	60/10/30
Ah3	0,01	0,04	0,01	0,02	3,22		2	57/14/29
Bws1	0,01	0,02	0,01	0,01	1,66		3	50/25/25
Bws2	0,00	0,01	0,01	0,01	2,04		1	33/33/33
Bws3	0,01	0,04	0,01	0,01	2,52		3	67/17/17
Horizon	pH (1 :2,5)		Acidité		ECEC	Saturation Al	DCB	
	H_2O	KCl	Al	Total			Fe_2O_3	Al_2O_3
		cmol (+)/kg de sol				%	%	%
Ah1	4,8	4,1	0,60	0,93	0,90	67	0,16	0,50
Ah2	5,4	4,5	0,15	0,39	0,25	60	0,16	0,46
Ah3	5,6	4,6			0,08		0,17	0,43
Bws1	5,5	4,7			0,05		0,15	0,27
Bws2	5,7	4,8			0,03		0,18	0,34
Bws3	6,0	5,0			0,07		0,23	0,56

- **Sols alluvionnaires récents (Gleysols, Fluvisols, Histosols)**

Les sols formés à partir des alluvions récentes sont généralement des Gleysols et des Fluvisols. Les sols organiques ou Histosols ne sont formés à partir des alluvions, que si les dépôts se font dans les marais.

Les Gleysols et Fluvisols sont généralement fertiles, ayant des pH neutres ou proches de la neutralité, et riches en nutriments. Leur défaut consiste en une réduction possible du fer ferrique insoluble en fer ferreux soluble dans les rizières inondées, exposant ainsi la culture de riz à la toxicité du fer ferreux (Fe^{2+}).

Les Histosols qui se forment dans les zones à engorgement en eau quasi-permanent, sont très riches en matière organique (> 12% C.O. dans les sols sableux, > 18% C.O. dans les sols très argileux), provenant essentiellement des débris de végétaux aquatiques.

La description d'un profil-type d'Histosol est faite ci-après :

- Informations générales :
  - ✓ Localisation : Maluku (Extrême-Est de la Ville de Kinshasa), non loin du pool malebo
  - ✓ Roche-mère : alluvion
  - ✓ Drainage : très pauvre
  - ✓ Etat hydrique durant description : frais
  - ✓ Profondeur de la nappe phréatique : 120 cm
- Analyses physico-chimiques :

Le tableau 2 reprend les principales caractéristiques physico-chimiques de l'Histosol présenté ci-haut.

Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques d'un Histosol à Kinshasa (Baert et al., 2009)

Horizon	Profondeur (cm)	Refus > 2 mm	Texture			Classe texturale FAO	CO	N
			argile	limon	sable			
			%				%	
H1	0-22		3	22	75	O	12,71	0,48
H2	22-40		4	19	74	O	17,60	0,38
2H1	40-70		ND	ND	ND	O	31,47	0,49
2H2	70-120		ND	ND	ND	O	54,74	0,50
2H3	120-165		ND	ND	ND	O	46,44	0,54
Horizon	Bases échangeables				CEC sol	CEC argile	Saturation en bases	Ca/Mg/K
	Na	Ca	Mg	K				
	cmol (+)/kg de sol					cmol (+)/kg d'argile	%	
H1	0,04	0,28	0,09	0,10	36,00		1	60/19/21
H2	0,03	0,19	0,06	0,05	37,96		1	63/20/17
2H1	0,05	0,23	0,08	0,10	96,36		0	56/20/24
2H2	0,05	0,42	0,07	0,16	139,86		1	65/11/25
2H3	0,07	0,23	0,06	0,04	179,02		0	70/18/12
Horizon	pH (1 :2,5)		Acidité		ECEC	Saturation	DCB	
	H_2O	KCl	Al	Total		Al	Fe_2O_3	Al_2O_3
		cmol (+)/kg de sol				%	%	%
Ah1	5,0	4,0	2,95	3,52	3,46	85	0,06	2,06
Ah2	5,0	4,2	2,05	2,57	2,38	86	0,03	2,23
Ah3	4,5	3,8	6,05	7,08	6,51	93	0,03	3,37
Bws1	3,5	2,4	8,28	11,50	8,98	92	0,03	0,86
Bws2	3,4	2,7	13,70	17,24	14,10	97	0,04	1,60

Dans le site masina rail 1, tous les sols sont secs pendant la période sèche de l'année, mais en saison pluvieuse, ceux des rizières sont engorgés d'eau.

1.1.2.2. Climat

Le climat du pool malebo et de toute la ville de Kinshasa, est de type Aw4 Köppen (Ngongo et al., 2009). C'est un climat tropical chaud et humide caractérisé par une température moyenne diurne du mois le plus froid supérieure à 18°C, et une pluviométrie annuelle (en cm) supérieure à deux fois cette température moyenne plus 14. La grande saison de pluie dure 8 mois, soit de mi-septembre à mi-mai, mais elle est souvent entrecoupée d'une petite période sèche entre janvier et février (Luboya, 2002). Les caractéristiques des principales variables climatiques à Kinshasa synthétisées par Ndembo (2009), sont données ci-dessous :

- Pluviométrie : la pluviométrie mensuelle est généralement la plus élevée au mois de novembre (257 mm en moyenne), et près de 40 % des précipitations annuelles sont concentrées en 3 mois (octobre, novembre et décembre). Avril est aussi très pluvieux, car c'est un mois au cours duquel tombent jusqu'à 210 mm en près de 18 jours. La pluviométrie la plus faible est observée en saison sèche, c'est-à-dire au mois de juin (5,5 mm), de juillet (2,0 mm), d'août (5,8 mm) et de septembre (31,8 mm) (voir les figures 4 et 5).

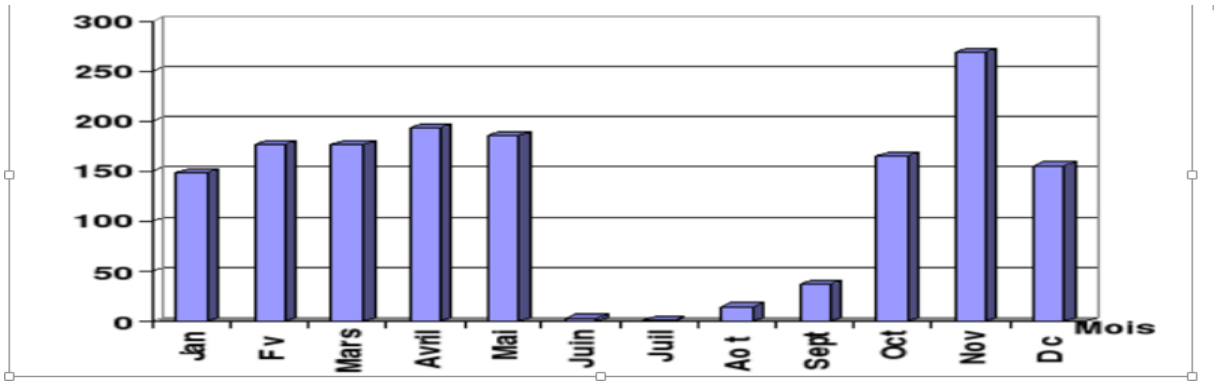


Figure 4 : Moyennes mensuelles des précipitations à la station de Kinshasa/n'djili de 1986 à 1995 (en mm) (Luboya, 2002)

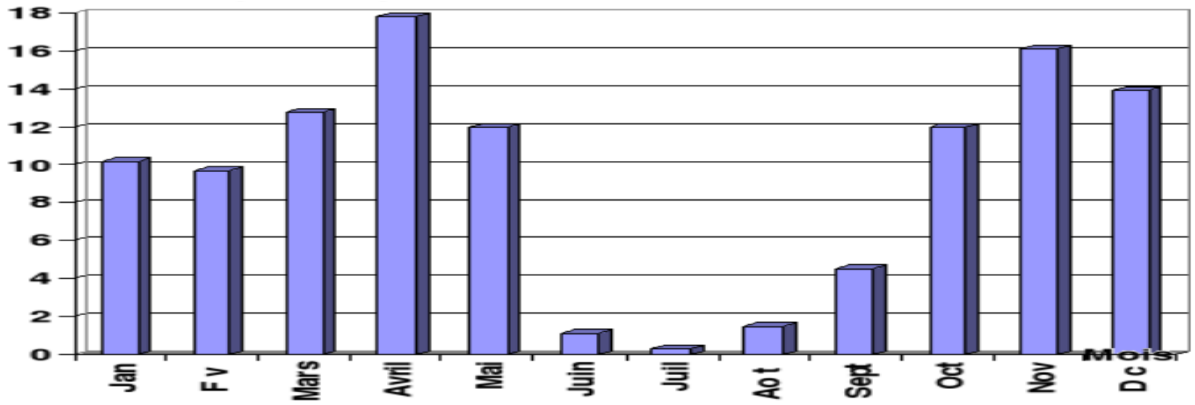


Figure 5 : Moyennes mensuelles de nombre de jours de pluies sur une période de 10 ans (1986-1995) à la station de Kinshasa/ N'djili (Luboya, 2002)

- Température : les températures moyenne, minimale et maximale sont respectivement, de, 25°C, 21,2°C (mois de juillet) et 30°C (en avril).
- Vitesse du vent : La vitesse moyenne du vent est inférieure à 3,5 m/s en saison pluvieuse, et augmente en saison sèche.
- Rayonnement : Les valeurs minimale et maximale de rayonnement, sont respectivement, de 3,9 h/jour (en juillet) et 5,2 h/jour (en avril). Quant à la durée d'insolation journalière, elle est de 4,9 h en moyenne, et de 6,4 h au maximum.
- Evapotranspiration (mesurée sous abri à l'aide de l'évaporomètre Piche) : à l'échelle annuelle, on atteint 1053,1 mm. Le minimum mensuel est de 69,2 mm (en juin) alors que le maximum est à 137,2 mm (en août).
- Humidité relative de l'air : sa valeur à Kinshasa est influencée par la température, l'évaporation et la convection des vapeurs d'eau provenant du Pool malebo et de l'océan. L'humidité relative de l'air est de 79 % en moyenne, avec un maximum de 84 % (entre novembre et mai, malgré une légère baisse en février et mars) et un minimum de 71 % (en septembre essentiellement).

1.1.3. Importance environnementale et socio-économique

Le pool malebo et les plaines qui l'entourent, constituent la principale zone humide de la ville de Kinshasa (E7 sur la carte ci-dessous) et l'une des 16 écorégions importantes du bassin du Congo (Thieme et al., 2008).

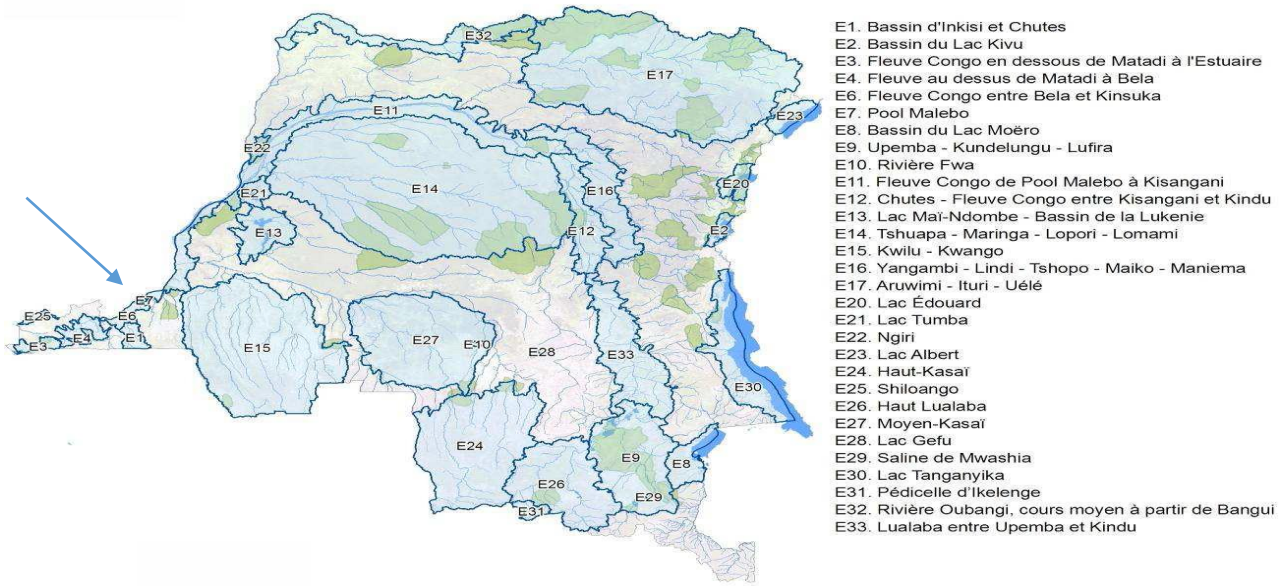


Figure 6 : Carte des zones humides de la RD Congo (Thieme et al., 2008). La flèche indique le pool malebo (zone E7)

Quelques informations sont fournies ci-après, en rapport avec les biens que la population de Kinshasa tire du pool malebo, mais aussi sur ses services écosystémiques.

1.1.3.1. Protection contre les inondations

La zone de la plaine de Kinshasa, est très exposée aux inondations, particulièrement aux mois d'avril et de novembre, durant lesquels tombent des averses (203,3 mm et 268,1 mm) dans l'hémisphère sud de la RD Congo. En effet, les rivières en crue alimentent alors le fleuve Congo dont la hauteur d'eau au pool malebo croit fortement en avril, novembre ou décembre. Par conséquent, les rivières dont la confluence se trouve dans le pool malebo, bénéficient d'un reflux de l'eau du fleuve, qui peut causer des inondations (Phanzu, 2016). Ces inondations de la plaine autour du pool malebo ne faisaient aucun dégat dans les années 70, puisque les habitants respectaient les zones inondables (Pain, 1984), qui pouvaient jouer leur rôle d'éponge (Convention de Ramsar sur les zones humides, 2016). Mais aujourd'hui, du fait de l'occupation incontrôlée des lits majeurs des rivières urbaines, plusieus quartiers de la plaine de Kinshasa sont victimes des inondations (Phanzu, 2016).

1.1.3.2. Exutoire des déchets déversés dans les cours d'eaux

A Kinshasa, les effluents industriels et les eaux usées domestiques sont généralement évacués dans les réseaux urbains et rivières réceptrices, sans traitement préalable. Il en est de même des déchets solides. En effet, les établissements industriels, notamment les industries chimiques, pétrochimiques, agroalimentaires et des usines diverses qu'on rencontre dans le bassin versant de la rivière N'Djili et ailleurs autour du pool malebo ; déversent directement dans les eaux des rivières des volumes importants d'effluents liquides contenant diverses substances (Gizanga et al., 2016 ; Luboya, 2002).

En ce qui concerne les eaux usées domestiques, le volume produit à Kinshasa était d'au moins 360.000 m^3 par jour en 2013, et 34,4% seulement des ménages kinois utilisaient, en ce moment, des modes hygiéniques d'évacuation des eaux usées. Pour ce qui est des excrétats, certains quartiers riverains

dirigent leurs conduits vers les cours d'eau (fleuve Congo ou rivières), des ménages riverains qui n'ont pas de toilettes utilisent la rivière comme latrine, les camions vidangeurs déversent tous les jours leurs boues de vidange dans les rivières ou le fleuve (Mindele, 2016). Ces déchets se concentrent dans le pool malebo, qui constitue leur principal exutoire à Kinshasa (Kasongo et Yumba, 2009).

1.1.3.3. Agriculture et pêche artisanale

La pratique de l'agriculture périurbaine et de la pêche artisanale à Kinshasa, se justifient essentiellement par la pauvreté d'une grande partie de la population. En effet, selon une étude sur les maraîchers, les raisons de cette activité sont le manque d'emploi rémunérateur (65 %), le souci de compléter des salaires modiques des fonctionnaires de l'État (30 %) et la perpétuation des traditions héritées des parents (5 %). Les mêmes raisons s'appliquent aux pêcheurs, avec, respectivement, une côte de 60 %, 30 % et 10 % (Musibono et al., 2011).

Vu la précarité de la population Kinoise évoquée ci-haut, et la disponibilité importante des terres autour du pool malebo, il est logique que ces sites soient le siège d'une importante activité agricole. L'agriculture autour du pool malebo consiste à la riziculture et aux cultures maraîchères. Les principaux sites agricoles y rencontrés sont : Tshuenge N'sele, Tshuenge Masina, Tshangu, Masina rail 2, Masina rail 1, Kingabwa 1, Kingabwa 2 et Kingabwa 3. Dans le site agricole de Masina rail 1 (notre milieu d'étude), le maraichage est pratiqué sur une étendue de 4ha, tandis que la riziculture occupe plus de 200ha, dans la zone inondable (Kasongo et Yumba, 2009 ; enquête de l'OSFAC). Le maraichage est réalisé près de la zone habitée (ou zone reconvertie) car elle n'est pas inondée (figure 7). La riziculture est quant à elle, pratiquée dans la partie marécageuse.

Figure 7 : Bloc maraicher du site masina rail 1

La zone de reconversion qui existe dans le site, témoigne de la pression foncière qu'il subit (voir la figure 8). Une étude réalisée en 2016 montre d'ailleurs que la superficie anthropisée dans les plaines entourant le pool malebo, a augmenté de 300 ha entre 2001 et 2016, c'est-à-dire plus de 20 ha par an (Muyaya et al., 2017).

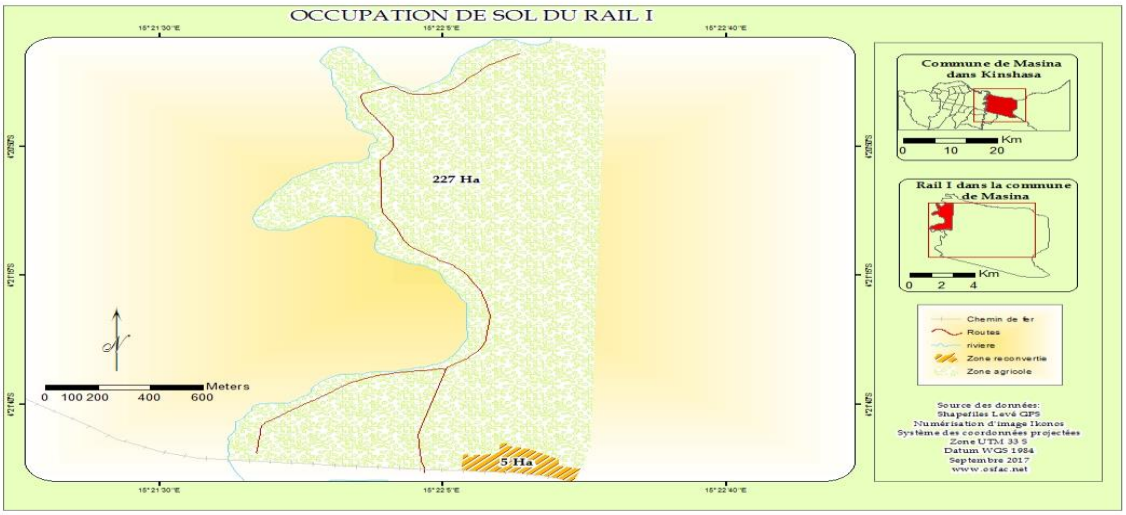


Figure 8 : Occupation du sol du site masina rail 1 (Carte non-publiée, produite par l'OSFAC)

Ci-dessous, un condensé sur les activités agricoles réalisées dans le site masina rail 1:

1.1.3.1. Maraichage

1.1.3.1.1. Légumes produits

En production maraichère à Kinshasa, le sol est généralement disposé en plates-bandes ou planches de 20 m^2. Les légumes-feuilles sont les plus cultivés, et l'amarante (*Amaranthus sp*, famille des Amaranthaceae), spécialement la variété d'origine africaine « biteku teku » (figure 9), bénéficie de la plus grande couverture spatiale, soit 28% de l'ensemble (Muzingu, 2012). Sa culture se justifie, notamment par sa précocité (cycle de 21 jours).

Figure 9 : Plates-bandes d'amarante au site masina rail 1

Il faut noter cependant que cette variété est mieux adaptée en saison sèche par rapport à la période pluvieuse, durant laquelle elle nécessite beaucoup de précautions. Les organes consommés sont les tiges et feuilles, et les maraichers obtiennent lors de chaque culture, des rendements de 2 à 5 kg de MF/m^2 (Muzingu, 2012 ; Kasongo et Yumba, 2009).

En ce qui concerne la commercialisation, la culture d'amarante est vendue au prix de 9,7$ par plate-bande de 20 m^2. Toutefois, il convient de signaler que les prix sont guidés par le rapport de l'offre et de

la demande. En effet, ce légume est abondant sur le marché entre février et mars, ainsi son prix de vente par plate-bande baisse de 10$ US à 8$ US. Son prix diminue aussi de juin à septembre suite à une forte concurrence. En revanche, le prix de vente augmente entre mars et mai (10,62$ US par plate-bande), et d'octobre à janvier (12,61$ US par plate-bande), suite, notamment aux difficultés de réaliser des pépinières en temps pluvieux, cause de la rareté de l'amarante (Muzingu, 2012).

1.1.3.1.2. Sources d'eau d'arrosage

Parmi les facteurs de production maraichère, nous mettons l'accent sur l'eau, dans cette section. Les sources utilisées par les maraichers du site masina rail 1 sont diverses selon l'emplacement géographique de leurs plates-bandes. Ceux dont les champs sont localisés du côté du bloc maraicher, utilisent des puits à buse ou un canal de drainage. Les puits, dont la hauteur est plus élevée que le niveau du sol, sont de faible profondeur et disposent ou non des couvercles. Ainsi, ils sont plus ou moins envahis de déchets transportés par le vent (figures 10 et 11).

Figure 10 : Puits à buse plus haut que la surface du sol

Figure 11 : Couverture ou non des puits à buse

En ce qui concerne le canal de drainage, qui constitue la limite entre le bloc maraicher et les rizières, son rôle premier est d'évacuer les excédents d'eau lors des crues. Mais les maraichers localisés aux abords, l'utilisent aussi comme point d'eau. La hauteur d'eau dans le canal est importante durant la saison pluvieuse mais elle baisse drastiquement en période sèche, tel qu'illustré dans la figure 12.

Figure 12 : Canal de drainage en saison sèche

Les maraichers qui exploitent les rizières en saison sèche, utilisent des puits creusés dans leurs champs ou recourent à l'irrigation à partir de la rivière N'djili. Seules quelques rizières sont dotées de puits à buse, qu'on retrouve en plus ou moins bon état (figure 13).

Figure 13 : Puits à buse dans les rizières

1.1.3.2. Riziculture

Au site agricole masina rail 1, la production rizicole se fait en saison pluvieuse, dans la partie inondable (du canal de drainage vers le fleuve Congo). Les producteurs, à l'instar de ceux d'autres sites de riziculture inondée en RD Congo, exploitent des lopins de terre de 0,20 ha selon un système de digue casier, et obtiennent des rendements de 3 tonnes de paddy à l'hectare. Les variétés utilisées généralement (*SIPI, Jasmine, Hubei 6*) sont peu productives, puisqu'introduites depuis des décennies. Des nouvelles variétés sont aussi diffusées (par exemple, les NERICA des lignées N-L16, N-L17, N-L19 et N-L56) mais elles ne sont pas suffisamment répandues auprès des riziculteurs (Kasongo et Yumba, 2009 ; Bangata et al., 2013 ; République Démocratique du Congo, 2013). Les revenus ne sont pas

satisfaisants, selon les paysans qui affirment affronter la concurrence du riz importé. Ils écouleraient leur paddy à moins d'1 $ le kilo, sauf s'il s'agit d'agrimultiplicateurs (riziculteurs formés comme producteurs de semences) qui vendent un peu plus cher leurs semences.

Parmi les rivières que compte le pool malebo, les informations seront fournies ci-après sur la N'djili, dans le bassin de laquelle se trouve notre site d'étude.

1.2. RIVIERE N'DJILI

La rivière N'djili comprend un cours supérieur (partie rurale) qui englobe les territoires de Kasangulu et de Madimba dans la province du Kongo central, et un cours inférieur (partie urbaine) se trouvant dans la ville de Kinshasa (Luboya, 2002).

Les informations fournies dans cette section portent, essentiellement, sur le cours inférieur qui traverse les plaines entourant le pool malebo. Cette rivière (figure 14) est la seule qui draine le site masina rail 1, qu'il sépare d'avec celui de kingabwa dans la commune de limete.

Figure 14 : Rivière N'djili le long du site masina rail 1. Notre site se trouve sur la rive droite

Elle envahit une partie des rizières au moment des crues, et la surface inondée tend à s'accroitre chaque année selon les agriculteurs, du fait de l'écroulement de la digue en certains endroits (voir figure 15).

Figure 15 : Ecroulement de la digue sur les berges de la rivière N’djili

1.2.1. Présentation du bassin versant de la N’djili

1.2.1.1. Situation géographique

Le bassin versant de la rivière N'Djili s'étend de la province du Kongo central où elle prend sa source dans les collines, à la ville de Kinshasa qu’elle traverse du Sud au Nord. Il mesure près de 2000 Km^2 compris entre 15°9' et 15°39' de longitude Est et 4°22' et 4°59' de latitude Sud. La partie urbaine du bassin versant de la rivière N'Djili, située dans la ville de Kinshasa et qui mesure environ 625 Km^2 (soit 31,2% de l'ensemble du bassin versant), se localise entre 15°9' et 15°18' de longitude Est et 4°22' et 4°37' de latitude Sud (Luboya, 2002).

1.2.1.2. Hydrographie et délimitation du bassin versant

La rivière N'djili, longue de près de 30 km, coule dans la partie Est de la plaine de Kinshasa. Son bassin (voir figure 16) est délimité par celui du fleuve Congo à l'Ouest, par le bassin versant de la rivière Inkisi au Sud et au Sud-Ouest, et par celui de la N'sele à l'Est. Il comprend plusieurs affluents dont : Lukaya, Luzumu, Didingi, Nshimi, Funda, Lususa, Wau, Mangoe, Musinga, Matete, Munfie, Ludisa. Ce sont des rivières d'importance variable et des petits ruisseaux autochtones, permanents ou saisonniers, dont les débits varient en fonction des saisons, devenant plus importants pendant la saison de pluie (Nsiala, 2012 ; Luboya, 2002).

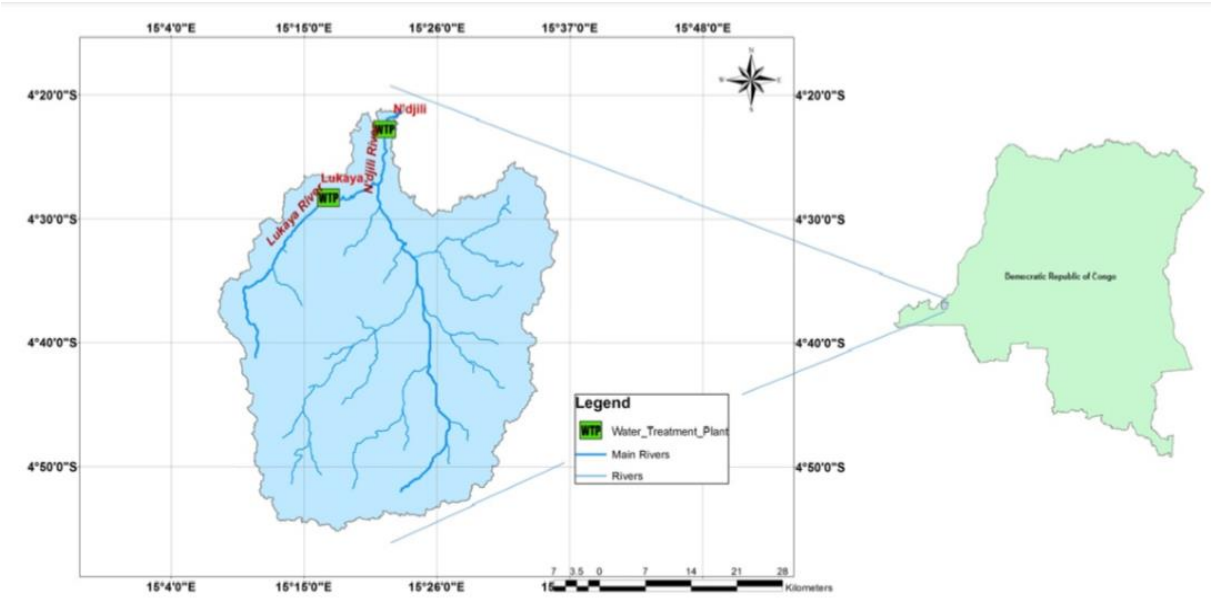


Figure 16 : Hydrographie du bassin de la rivière N’djili (Ndolo, 2015)

1.2.1.3. Géomorphologie du bassin versant de la rivière N’djili

La topographie du bassin versant de la rivière N'Djili présente deux ensembles morphologiques : la zone de la plaine et celle des collines. La plaine est notamment située autour du pool malebo, entre 280 et 350 m d'altitude moyenne. Elle est le siège d’une forte sédimentation avec d'importants dépôts des sédiments provenant des parties hautes. Cela a pour conséquences l'envasement et des inondations au niveau des parties basses (Luboya, 2002).

1.2.1.4. Occupation et aménagement du bassin

Des surfaces importantes du bassin dont les rives et vallées alluviales de la N’djili et de ses affluents, sont occupées par des habitations humaines, des cultures maraichères et rizicoles. Sur le plan démographique, le bassin de la N’djili héberge plus de 3 millions d’habitants (plus de 50 % de la population de Kinshasa) sur une superficie d’à peine 835,83 km² (soit 8,6% du territoire de la ville en 2004). L’alimentation en eau de ces habitants est en grande partie, assurée par une station de pompage et de traitement située sur la rivière N’djili, en amont et à quelques kilomètres des sites agricoles du pool malebo (Nsiala, 2012 ; Luboya, 2002).

1.2.1.5. Problèmes causés par l’urbanisation du bassin versant

Certains problèmes sont rencontrés dans la partie urbaine du bassin de la N’djili, en aval de laquelle se trouvent les plaines du pool malebo. Il s’agit d’après Nsiala (2012), de :

- la mauvaise urbanisation : des habitations ont été construites sur des sites inappropriés comme les flancs des versants et les lits majeurs de la rivière.
- mauvais drainage : il manque de système adéquat d’évacuation des eaux pluviales. Leur ruissellement est limité par une surcharge de déchets solides, favorisant des inondations.

1.2.2. Qualité des eaux de la rivière N'djili

1.2.2.1. Paramètres physiques et éléments majeurs

Luboya (2002) a considéré, sur base des propriétés physico-chimiques et biologiques des eaux de la rivière N'djili, que leur usage pour les travaux domestiques et la boisson, n'est possible qu'après un traitement préalable.

Les propriétés physico-chimiques des eaux de cette rivière ont été analysées en détail par Nsiala (2012), qui a, notamment, constaté que les valeurs de conductivité mesurées sont inférieures à 100 µS/cm, ce qui correspond aux eaux de surface très faiblement minéralisées. D'autres résultats trouvés par ce dernier auteur sont les suivants :

- les eaux de la N'djili sont peu chargées en éléments minéraux dissous, car la moyenne des TDS (total des solides dissous) est inférieure à la moyenne mondiale (100 mg/l) et africaine (± 60 mg/l) des eaux de rivière. Cela serait dû aux faibles teneurs en bicarbonates (29,28 mg/l au maximum, contre 26,9 mg/l comme moyenne africaine et environ 52 mg/l pour le monde) et en calcium (moins de 4 mg/l, contre 5,7 mg/l pour l'Afrique et 13,4 mg/l comme moyenne mondiale) des eaux de la N'djili.
- les concentrations en silice dissoute, en revanche, sont voisines de la moyenne mondiale (10,4 mg/l).

Les travaux précités (Nsiala, 2012 ; Luboya, 2002) se sont aussi penchés sur les facteurs qui influencent la qualité de l'eau de la rivière N'djili. Il s'agit, d'après les analyses faites, de la composition chimique de ses affluents et du fleuve Congo au pool malebo, des activités anthropiques, des précipitations atmosphériques et de la lithologie. Ci-dessous, les effets des différents facteurs sur la composition chimique des eaux de la rivière N'djili :

- précipitations : les précipitations auraient une contribution indirecte sur la composition des eaux de la rivière N'djili à travers l'effet ou non de mise en solution des éléments par les eaux, selon qu'il pleut ou pas :
  - la conductivité est plus grande en saison des pluies, période des hautes eaux, par rapport à la saison sèche, période des basses eaux.
  - les anions et les cations sont en général plus abondants en saison des pluies qu'en saison sèche.
  - les taux les plus élevés de nitrite et nitrate ont été observés en saison sèche
  - la teneur en phosphates dans l'eau décroît en saison sèche
  - le pH moyen est le plus élevé (plus de 7) en saison sèche
  - la turbidité est très élevée en saison pluvieuse. Cette turbidité excessive s'explique, en plus des précipitations, par la grande quantité des matières en suspension provenant essentiellement des eaux usées, des déchets de toute nature et des excréta rejetés dans les eaux. Il y aurait aussi l'apport des matériaux arrachés au sol par les processus érosifs le long des berges et sur les pentes collinaires en amont.

- lithologie : des corrélations positives avaient été établies entre, d'une part les propriétés géologiques, et d'autre part, la présence des ions Na, K, Ca, Mg et HCO^-_3, dans la rivière N'djili :

- les ions sodium proviendraient de l'hydrolyse des silicates sodiques trouvés dans les roches du bassin versant, dont des arkoses quartzitiques ou à ciment calcaire avec galets de schistes, quartz et feldspath.
- le potassium aurait majoritairement pour source, le lessivage des quartzites feldspathiques, rencontrés dans le bassin.
- l'origine des ions calcium, magnésium et bicarbonate, serait l'altération des calcaires dolomitiques et des dolomies présents dans le bassin. Pour le bicarbonate, d'autres sources seraient la contribution atmosphérique et la dissolution des carbonates des schisto-calcaires qui affleurent dans le bassin versant
- la teneur en silice dissoute dans l'eau de rivière serait justifiée par la présence des quartzites feldspathiques dans le soubassement précambrien du bassin.

❖ fleuve Congo : le fleuve Congo renvoie ses eaux vers la rivière N'djili en certaines périodes de l'année, lorsque ses affluents du nord du pays sont en crue (Phanzu, 2016). Le fleuve influence la concentration en certains ions dans la rivière N'djili, puisque leur teneur augmente de l'amont vers l'aval (à l'approche du fleuve), suite sans doute, à un mélange des eaux du fleuve Congo et des eaux de la partie aval du bassin de la N'djili. Il s'agit de : calcium, magnésium, sulfate, bicarbonate, fer et aluminium.

❖ activités humaines : à part leur influence sur la turbidité évoquée ci-dessus, l'effet des activités humaines se manifesterait sur d'autres propriétés de l'eau de la rivière N'djili, notamment :

- la saturation en oxygène : les eaux de N'djili sont sous-saturées en oxygène. Ceci peut s'expliquer par le fait que ce bassin versant, du moins dans la zone d'étude, subit des rejets d'eaux usées et des rejets de l'usine de traitement des eaux (REGIDESO), responsables d'une probable pollution organique.
- la teneur en nitrates : le teneur en cet ion était plus élevée dans l'eau de N'djili, lorsqu'on s'approchait des sites où les cultivateurs utilisent notamment les fertilisants tels que NPK et urée.

1.2.2.2. Eléments traces métalliques

1.2.2.2.1. Données sur la pollution en éléments traces métalliques de la rivière N'djili

Certains travaux ont été consacrés au dosage des éléments traces métalliques (ou ETM) dans l'eau ou les sédiments de la rivière N'djili. Les renseignements suivants peuvent être tirés de ces études:

❖ Sur la rivière N'djili, à quelques km de notre zone d'étude, les teneurs suivantes en ETM ont été mesurées (en 2005) en aval et en amont d'un site maraicher, en saison pluvieuse et en saison sèche :

- aval :
  - ✓ en saison pluvieuse : 264 µg/l Pb^{2+}, 122 µg/l Cd^{2+}, 0.33 mg/l Cr^{2+}, 0.09 mg/l Co^{2+}, 0.22 mg/l Ni^{2+}/l et 1.8 mg/l Cu^{2+}
  - ✓ en saison sèche : 239 µg/l Pb^{2+}, 132 µg/l Cd^{2+}, 0.26 mg/l Cr^{2+}, 0.07 mg/l Co^{2+}, 0.31 mg /l Ni^{2+} et 1.6 mg/l Cu^{2+}

- amont :
  - ✓ en saison pluvieuse : 347 µg/l Pb^{2+}, 184 µg/l Cd^{2+}, 0.26 mg/l Cr^{2+}, 0.10 mg/l Co^{2+}, 0.29 mg/l Ni^{2+} et 1.5 mg/l Cu^{2+}
  - ✓ En saison sèche : 162 µg/l Pb^{2+}, 108 µg/l Cd^{2+}, 0.24 mg/l Cr^{2+}, 0.06 mg/l Co^{2+}, 0.27 mg/l Ni^{2+} et 1.7 mg/l Cu^{2+} (Kifuani, 2009).

Les limites des concentrations en ETM fixées pour l'usage de l'eau aux fins d'irrigation à long terme sont : 0.065 mg /l Pb, 0.01 mg /l Cd, 0.55 mg /l Cr, 0.05 mg /l Co, 1.4 mg/l Ni, 0.017 mg /l Cu (FAO/OMS, 2014, cité par Diouf, 2016). Tenant compte de cela, l'eau de la N'djili n'est pas conforme pour l'irrigation puisque ses teneurs en Cd, Co et Cu, sont trop élevées.

- ❖ la concentration en ETM dans l'eau brute prélevée à la station de la REGIDESO sur la rivière N'djili, à quelques km en amont de notre site d'étude, était comme suit en mai 2010 (fin de la saison pluvieuse), dans les échantillons filtrés ou non (marge d'erreur de ± 20%) :
- échantillons filtrés : 5.9 µg/l Zn, 2.0 µg/l As, 1.6 µg/l Pb, < 1 µg/l pour Cr, Co, Ni, Cu, Cd, Hg et Se
- échantillons non-filtrés : 6.8 µg/l Zn, 2.1 µg/l As, 1.5 µg/l Pb, < 1 µg/l pour Cr, Co, Ni, Cu, Cd, Hg et Se (Partow, 2011).

Les valeurs guides des ETM dans l'eau de boisson sont les suivantes : 0.01 mg /l As, 0.003 mg /l Cd, 0.05 mg /l Cr, 2 mg /l Cu, 0.006 mg /l Hg inorganique, 0.07 mg /l Ni, 0.01 mg/l Pb et 0.04 mg /l Se (OMS, 2017). A première vue, on conclurait que les riverains de la N'djili qui utilisent directement cette eau pour la boisson ne risquent aucune intoxication en ETM sur base de ces résultats.

Mais les résultats diffèrent selon les sites, car dans une étude sur un autre tronçon de la rivière N'djili, la concentration en Pb dans l'eau atteignait jusqu'à 3,17 mg/l (Lumbuenamo et al., 2008), ce qui dépasse largement la limite donnée ci-haut pour cet élément dans l'eau de boisson.

De même, certains ETM se retrouveraient plus dans les sédiments que dans l'eau de N'djili. C'est le cas de mercure dont la teneur, dans un travail était faible dans l'eau mais équivalait à 0,5 mg/kg dans les sédiments (Tshibanda et al., 2014). Dans ce cas, le risque d'une contamination de l'eau en Hg et de l'intoxication des consommateurs dans l'avenir, n'est pas écarté.

1.2.2.2.2. Origines de la pollution en ETM

Les origines probables des ETM dans l'eau de N'djili sont présentées ci-dessous :

- ❖ l'accroissement de l'érosion dans le bassin versant de la N'djili suite au changement d'occupation du sol, et le dépôt des sédiments dans la rivière N'djili : Il a été montré, en effet, que la perte en terre annuelle dans la rivière N'djili est passée de 17,3 t/ha/an en 1995 à 21,5 t/ha/an en 2005 et 39,5 t/ha/an en 2013. En même temps, la turbidité de l'eau de N'djili a augmenté entre ces périodes de mesure (Ndolo, 2015 ; Lemba, 2013). Les ETM contenus dans les sédiments déposés dans la rivière N'djili peuvent se solubiliser plus ou moins facilement, en fonction notamment de leur indice de transport soluble (voir figure 17) (UNEP/WHO, 1996).

- l'évacuation des boues d'épuration par l'usine de traitement d'eau installée sur la rivière N'djili, dans la même rivière (Bipendu et al., 2017) : L'effet de ces rejets sur la teneur en ETM n'avait pas été mesuré, mais ils restent quand même une source potentielle de pollution.

- le déversement d'effluents industriels non traités (Gizanga et al., 2016), des déchets domestiques (Mindele, 2016) et des déchets hospitaliers (Ilunga et al., 2013 ; Kasuku et al., 2016), dans les rivières

- le mélange des eaux de la N'djili avec celles du fleuve Congo, qui au niveau du pool malebo, sont polluées en Hg, Pb et Cd (Nsimanda et al., 2015).

- l'apport des intrants, notamment les pesticides, par des paysans : Cette source est moins probable pour plusieurs raisons. Les seuls produits que les paysans du pool malebo utilisent qui puissent être potentiellement dangereux, sont le fongicide manèbe, contenant le Mn $(C_4H_6MnN_2S_4)_n$ et le sulfate de Cu (source de cuivre) (Muzingu, 2010 ; Boland et al., 2004). Mais les quantités apportées sont très faibles : les dépenses des maraichers relatifs aux pesticides sont à peine de 5 dollars/are/an, alors que ces produits coûtent très cher à Kinshasa (Kasongo et Yumba, 2009).

- la minéralisation des plantes poussant dans les marécages : dans les zones humides, la végétation naturelle peut s'enrichir en ETM par bioaccumulation, ainsi la décomposition de ces plantes peut libérer les éléments accumulés dans l'environnement (Singh et al., 2017).

- les précipitations atmosphériques: à Kinshasa, l'air contient des quantités importantes de certains métaux et métalloïdes qui peuvent se retrouver dans l'eau des pluies. Une étude réalisée entre juillet et octobre 2009 avait mesuré dans l'air ambiant pendant 24 h, respectivement, les teneurs en As, Cd, Pb et Ni ci-après le long des routes (et sites résidentiels entre parenthèses) : 0.9-6.0 ng/m^3 (0.4-2.8 ng/m^3), 2.5-5.9 ng/m^3 (1.2-3.5 ng/m^3), 166.2-1422.5 ng/m^3 (72.0-1685.0 ng/m^3) et 48.7-482.0 ng/m^3 (42.0-117.6 ng/m^3) (Kabamba et al., 2016).

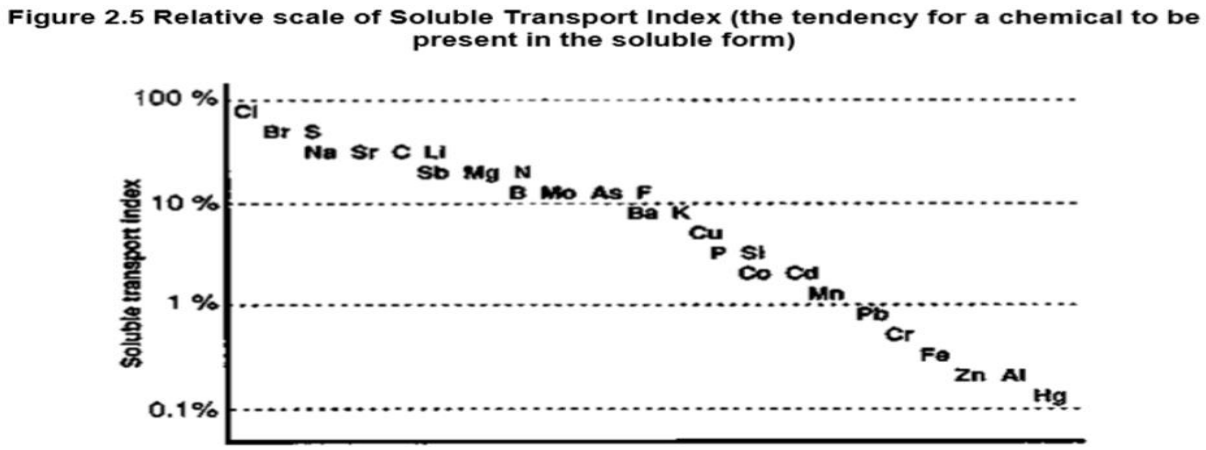


Figure 17 : Indice de transport soluble des différents éléments (UNEP/WHO, 1996)

1.2.2.2.3. Conséquences établies et probables de la pollution en ETM de la rivière N'djili

Du fait de la pollution de la rivière N'djili en ETM, les conséquences ci-après peuvent en découler :

- la contamination des poissons dans la rivière N'djili, comme c'est le cas au pool malebo sur le fleuve, en Pb et en Cd (Nsimanda et al. 2015), et pouvant même aboutir à la mort des poissons (Muteba et al., 2011)

- la contamination des sols des parcelles rizicoles ETM au moment des crues, et celles des cultures de riz exposées à ces éléments (Vernoux et al., 2010 ; Patel et al., 2016)

- la contamination de l'eau des puits en ETM : Dans le site du pool malebo évoqué dans les pages précédentes, où l'eau de la N'djili était analysée en 2005, les teneurs en ETM dans deux types de puits situés non loin de la rivière et utilisés par les maraichers, ont été les suivantes, en saison pluvieuse et en saison sèche (entre parenthèses) (Kifuani, 2009) :

- pour le puits aménagé :
  - ✓ saison pluvieuse : 279 µg/l Pb^{2+}, 276 µg/l Cd^{2+}, 0.21 mg/l Cr^{2+}, 0.04 mg/l Co^{2+}, 0.30 mg/l Ni^{2+} et 2.3 mg/l Cu^{2+}
  - ✓ saison sèche : 182 µg/l Pb^{2+}, 109 µg/l Cd^{2+}, 0.26 mg/l Cr^{2+}, 0.04 mg/l Co^{2+}, 0.43 mg/l Ni^{2+} et 1.7 mg/l Cu^{2+}
- pour le puits non-aménagé :
  - ✓ saison pluvieuse : 411 µg/l Pb^{2+}, 387 µg/l Cd^{2+}, 0.24 mg/l Cr^{2+}, 0.09 mg/l Co^{2+}, 0.32 mg/l Ni^{2+} et 2.2 mg/l Cu^{2+}.
  - ✓ saison sèche : 182 µg/l Pb^{2+}, 103 µg/l Cd^{2+}, 0.25 mg/l Cr^{2+}, 0.08 mg/l Co^{2+}, 0.32 mg/l Ni^{2+} et 1.6 mg/l Cu^{2+}.

On peut se poser la question de savoir si c'est la nappe qui a contaminé la rivière ou plutôt la rivière qui contamine. Nous pensons que ces ETM dans les puits proviendraient de la rivière, puisqu'en 2009, Ndembo (2009) qui avait analysé 22 éléments traces dans les eaux souterraines à Kinshasa, soit 20 métaux (Li, Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Cs, Ba, P, U) et 2 métalloïdes (As et B), concluait que les éléments traces se retrouvaient en des concentrations négligeables au sein de la nappe. Et selon lui, le fond géochimique de ces éléments serait d'origine naturelle et son niveau ne préjudicierait pas la qualité de l'eau. Donc, si la teneur en ETM dans les puits est élevée, la source est potentiellement la rivière. En effet, l'eau de rivière peut polluer celle des nappes (Vernoux et al., 2010).

- l'intoxication humaine suite à l'ingestion de cette eau ou un contact cutané avec elle (Elenge-Molayi et al., 2011), et l'accroissement des coûts de traitements pour la REGIDESO, dont une station de traitement important utilise l'eau de N'djili (Ndolo, 2015 ; Lemba, 2013)

- la contamination en ETM des sols arrosés avec l'eau de N'djili (Amlan et al., 2011), et celle des légumes cultivés sur ces sols sujets à l'accumulation des ETM (Mihali et al., 2012). En ce qui concerne l'accumulation des ETM dans le sol, les inquiétudes peuvent se fonder sur l'analyse des matériaux argileux dans un site inondable par la rivière N'djili, situé en face de notre zone d'étude, et qui fait l'objet d'une exploitation artisanale d'argiles. Ces matériaux avaient dosé, lors

d'une étude en 2012 : jusqu'à 230 mg de Cu/kg, 490 mg de Co/kg, 890 mg de Pb/kg et 960 mg de Zn/kg (Wetshondo, 2012).

- l'intoxication des consommateurs des légumes (Mpundu et al., 2013b) ou des poissons contaminés (Peyer et al., 2014). Ces personnes pourraient souffrir, notamment de cancer, d'obésité et des maladies cardiovasculaires) (Diallo et al. 2013).

CHAPITRE DEUX : MATERIEL ET METHODES

2.1. ECHANTILLONAGE

Pour réaliser ce travail sur le transfert des ETM issus de la rivière N'djili, les échantillons de sol, d'eau et de produits végétaux ont été collectés en deux campagnes correspondant à la période sèche d'une part, et à la saison pluvieuse d'autre part. Le choix de ces deux périodes se justifie par le fait que la qualité de l'eau varie, notamment en fonction des cycles hydrologiques (UNEP/WHO, 1996). Les deux moments choisis correspondent, respectivement à l'étiage et à la crue de la rivière N'djili.

2.1.1. Collecte des échantillons d'eau

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans les sites suivants lors des deux saisons : 5 puits à buse sur une dizaine répartie dans le bloc maraicher, le principal canal de drainage des eaux des rizières vers la rivière N'djili, un tronçon de la rivière N'djili autour des sites d'érosion sur les berges (sites par lesquels les eaux de la rivière passent vers les rizières lors des crues), 3 puits à buse sur une dizaine creusés dans les rizières. Le choix de tous ces sites était guidé par le souci de représentativité de toutes les sources d'eau disponibles sur le site que nous avons évoquées au point 2.1.3.1.2., à savoir les puits à buse (figures 10, 11 et 13), le canal de drainage (figure 12) et la rivière N'djili (figure 14). Dans le bloc maraicher tout comme dans les rizières, le choix des puits à échantillonner parmi la dizaine, s'est fait de manière aléatoire. Il en a été de même des sites d'échantillonnage sur la rivière et dans le canal.

Les échantillons ont été collectés aux mois de septembre 2017 (pour le compte de la saison sèche) et avril 2018 (pour la saison pluvieuse). Pour la période sèche, du fait que certains échantillons ont été perdus lors de leur transport de Kinshasa à Bruxelles, une autre campagne était organisée au mois de juillet 2018 (milieu de la saison sèche) pour combler les manques. Les échantillons ont été filtrés ou pas, et placés dans des flacons hermétiquement fermés.

Figure 18 : Prélèvement des échantillons d'eau dans la rivière N'djili

2.1.2. Collecte des échantillons de sol

La collecte des échantillons de sol a été réalisée en fonction des points d'eau concernés par l'étude. En saisons sèche et pluvieuse, le sol était prélevé dans :

- 5 plates-bandes du bloc maraicher : c'est-à-dire une planche située à côté de chaque puits à buse concerné par l'échantillonnage d'eau
- 2 plates-bandes localisées au bord du canal de drainage
- 3 rizières équipées de puits: c'est-à-dire dans chaque rizière dont l'eau de puits était prélevée
- 2 rizières sans puits

Le prélèvement avait porté sur le sol de surface (jusqu'à 20 cm), parce que c'est la partie colonisée par les racines des plantes, dont les teneurs en ETM devaient être corrélées à celles des sols.

2.1.3. Collecte des échantillons végétaux

La collecte des échantillons végétaux a porté sur les pieds d'amarante et les épis de riz prêts à la récolte, dans tous les sites où le sol a été prélevé. Ce, en deux campagnes pour les légumes (saisons sèche et pluvieuse) et une seule pour le riz (saison pluvieuse). Pour les légumes, la récolte a consisté à arracher entièrement la plante avec ses racines. Nous nous sommes limités à un seul légume pour rendre le travail moins complexe, car la phyto-disponibilité des ETM et leurs mécanismes de transfert vers la plante, diffèrent selon la rhizosphère de chaque espèce légumière (Bidar et al., 2017). Il en de même de la capacité de tolérance de ces différentes plantes à l'intoxication du sol en ETM (Clemens, 2001).

Il convient de signaler qu'il n'y avait pas de culture de riz en saison sèche 2017, ni à celle de l'année 2018, ce qui explique une seule collecte des grains de riz dans les rizières (saison pluvieuse 2018). Toutefois, en septembre 2017, les échantillons de grains de riz ont été collectés sur les aires de séchage de ce site agricole (surement récoltés lors de la saison pluvieuse 2017), pour servir de témoins. De même, lors de la saison sèche 2018, nous avions repris le prélèvement des légumes pour remplacer les échantillons collectés en septembre 2017, car ils ont été mal conservés durant le voyage. En effet, les échantillons d'eau et de sol, les tissus végétaux ont été conditionnés dans des récipients en plastique et transportés en Belgique pour l'analyse au laboratoire.

Un tableau résumé des échantillons prélevés ainsi que les coordonnées géographiques y relatives, est présenté ci-dessous :

Tableau 4 : Synthèse sur les échantillons prélevés

ECHANTILLON	**SITE DE PRELEVEMENT**	**COORDONNEES GPS**	**SAISONS**	
			SECHE	**PLUVIEUSE**
Eau de puits à buse 1	Puits 1, Bloc maraicher	277 m ; S 04°21'49.5'' E 015°22'04.1''	✓	✓
Sol Plate-bande 1 + amarante 1	Planche près de Puits 1			
Eau de puits à buse 2	Puits 2, Bloc maraicher	280 m ; S 04°21'52.0'' E 015°22'03.6''	✓	✓
Sol Plate-bande 2 + amarante 2	Planche près de Puits 2			
Eau de puits à buse 3	Puits 3, Bloc maraicher	283 m ; S 04°21'52.2'' E 015°22'04.9''	✓	✓
Sol Plate-bande 3 + amarante 3	Planche près de Puits 3			
Eau de puits à buse 4	Puits 4, Bloc maraicher	279 m ; S 04°21'51.4'' E 015°22'01.7''	✓	✓
Sol Plate-bande 4 + amarante 4	Planche près de Puits 4			

Eau de puits à buse 5	Puits 5, Bloc maraicher	279 m; S 04°21’49.8’’ E 015°21’59.9’’	✓	✓
Sol Plate-bande 5 + amarante 5	Planche près de Puits 5			
Eau de canal	Canal de drainage	278 m ; S 04°21’47.2’’ E 015°22’08.1’’	✓	✓
Sol Plate-bande 6 + amarante canal 1	Planche 1 près du canal	277 m ; S 04°21’47.0’’ E 015°22’03.0’’	✓	✓
Sol Plate-bande 7 + amarante canal 2	Planche 2 près du canal	276 m ; S 04°21’47.0’’ E 015°22’02.0’’	✓	✓
Eau de rivière 1	Rivière N’djili 1	275 m ; S 04°21’32.5’’ E 015°22’05.0’’	✓	✓
Eau de rivière 2	Rivière N’djili 2	277 m ; S 04°21’26.9’’ E 015°22’10.6’’	✓	✓
Eau de rivière 3	Rivière N’djili 3	280 m ; S 04°21’26.2’’ E 015°22’10.8’’	✓	✓
Eau de puits à buse 6	Puits 6, Rizière à puits 1	278 m ; S 04°21’44.8’’ E 015°22’34’’	✓	✓
Sol Rizière à puits 1	Dans Rizière à puits 1			
Grains de riz 1				✓
Eau de puits à buse 7	Puits 7, Rizière à puits 2	279 m ; S 04°21’31.8’’ E 015°22’44’’	✓	✓
Sol Rizière à puits 2	Dans Rizière à puits 2			
Grains de riz 2				✓
Eau de puits à buse 8	Puits 8, Rizière à puits 3	281 m ; S 04°21’43.4’’ E 015°22’03.6’’	✓	✓
Sol Rizière à puits 3	Dans Rizière à puits 3			
grains de riz 3				✓
Sol Rizière sans puits 1 + grains de riz 4	Dans Rizière sans puits 1	278 m ; S 04°21’35.9’’ E 015°22’12’’		✓
Sol Rizière sans puits 2 + grains de riz 5	Dans Rizière sans puits 2	280 m ; S 04°21’38.2’’ E 015°22’12.1’’		✓
Grains de riz 6	Aire de séchage du site			✓

2.2. ANALYSES DE LABORATOIRE

Les ETM dans les échantillons d’eau et de sol, ont été extraits par l’eau régale. Pour les végétaux, en revanche, la solution nitro-perchlorique a été utilisée pour ce fait. Le dosage était réalisé par spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS) pour les échantillons d’eau et de sol, et par spectrophotométrie d’absorption atomique (modèle Varian 200) en ce qui concerne les échantillons végétaux. Les normes utilisées pour l’analyse de l’eau et des sols, sont respectivement, ISO 17294-1 : 20004 et ISO 22036 : 2008. Le sol et l’eau ont été analysés dans le Laboratoire des Ressources hydriques

à Arlon, tandis que l'extraction et le stockage des ETM dans les échantillons végétaux ont été faits au Laboratoire d'échanges eau-sol-plantes à Gembloux Agro-Bio Tech.

2.2.1. Echantillons de sol et d'eau

Pour l'extraction des ETM dans le sol, près de 2 g de sol était placé dans une fiole et attaqué avec 10 ml d'eau régale, c'est-à-dire le mélange composé de 1/3 d'acide nitrique et de 2/3 d'acide chlorhydrique purs. Puisque le sol n'était pas séché avant l'attaque acide, la teneur en matière sèche de chaque échantillon avait été évaluée pour être prise en compte lors du calcul final (Noubissie, 2015). Le récipient était couvert de verre de montre et le mélange fut laissé au repos pendant plus de 12 heures. Ce temps devait permettre l'extraction d'une grande partie d'ETM contenue dans la phase solide. L'extraction d'ETM réalisée est dite pseudo-totale, car suite à cette attaque acide, une partie des silicates, qui sont des minéraux dominants dans la plupart des sols, n'est pas dissoute. Ainsi, pour certains éléments comme le plomb, les valeurs obtenues peuvent être plus faibles que celles totales (Baize, 2009).

Ensuite, les fioles ont été placées dans des tubes en téflon hermétiquement fermés et chauffés dans un four micro-onde, pendant 2 heures. Après refroidissement, l'échantillon était récupéré en rinçant à l'eau distillée tout en transvasant dans une fiole de 100 ml, à travers du papier filtre. La filtration est justifiée par le fait que la minéralisation n'était pas totale. Pour finaliser, le volume était porté au trait à l'eau distillée, et les fioles furent conservées à 4°C en attendant l'analyse (Affholder, 2013).

En ce qui concerne l'eau, les échantillons préalablement filtrés avaient avant tout été mélangés à de l'acide nitrique HNO_3 jusqu'à l'obtention d'un pH inférieur ou égal à 2, puis conservés (El Ghali, 2015).

Les limites de détection de l'ICP-MS ont été de :

- 1 µg/l pour le Cr, le Co, l'As, le Se et le Pb
- 25 µg/l pour le fer
- 0,25 µg/l pour le Cd
- 2 µg/l pour le Ni et le Cu
- 15 µg/l pour le Zn

Les résultats produits par l'ICP-MS ont été donnés en µg/l, puis convertis en mg/l (cas des échantillons d'eau), en les divisant par 1000. Pour ce qui est des sols, la conversion des résultats en mg/kg était réalisée en appliquant la formule suivante :

Valeur en mg/kg = [valeur mesurée x volume de dilution] / [poids de sol x %MS x 10]

2.2.2. Echantillons végétaux

L'extraction des ETM dans les échantillons végétaux était, comme pour les sols, réalisée en deux jours. Les manipulations suivantes ont été faites au cours de chacun :

- Premier jour :

- Prélever et peser 2 à 5 g de végétaux séchés et broyés de façon homogène
- Mélanger ces échantillons avec 30 ml d'une solution composée de 50% d'acide nitrique (65%) et 50% d'acide perchlorique (70%), et laisser reposer
- Agiter légèrement le mélange, homogénéiser et laisser reposer durant 16h

❖ Deuxième jour :

- Porter le mélange à ébullition et ajouter doucement 5 ml d'acide chlorhydrique (10%) quand le résidu est totalement déshydraté
- Quand le mélange HCl et résidu est refroidi : récupérer l'échantillon dans une fiole de 25 ml, porter au trait à H_2O distillée et agiter
- Filtrer l'échantillon et récupérer le filtrat dans un récipient de 50ml.

Il convient de signaler que faute de temps, l'analyse des échantillons végétaux n'avait porté que sur 4 éléments, à savoir Zn, Pb, Cd et Pb. Les résultats ont été fournis en mg d'ETM/kg de matière sèche (MS), alors que les normes sont exprimées en mg d'ETM/kg de matière fraiche (MF). Ainsi, les teneurs trouvées ont été converties comme suit :

Valeur d'ETM/kg de MF = [valeur d'ETM/kg de MS X (100-% humidité)]/100

2.3. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES

Le traitement et l'analyse des données saisies dans un tableur Excel, ont été réalisés par le logiciel JMP Pro 13. Après vérifications des hypothèses de distribution normale des données et de l'égalité des variances, nous avons résolu de transformer toutes les données en recourant au Log 10, et procédant à la suppression des valeurs aberrantes. Il convient de signaler que l'égalité des variances a été vérifiée en nous basant soit sur le test de Welch, soit sur celui de Levenne, car la plupart des données satisfaisaient à l'un ou à l'autre. Quelques données d'analyse de l'eau n'obéissaient à aucun ajustement ou n'ont été disponibles que pour un seul échantillon pour l'ensemble des sites, ainsi elles n'ont pas été utilisées.

Nous avons ensuite procédé à l'analyse de la variance, en ressortant pour chaque site et par saison, la moyenne et l'écart-type. Pour juger si les moyennes ont été significativement différentes au seuil de probabilité de 5%, le test de comparaison des moyennes HSD de Tukey a été utilisé. Les matrices de corrélation avaient aussi été générées, pour étudier les interactions entre différents paramètres. Mais du fait que dans les matrices certaines valeurs élevées des coefficients de corrélation sont parfois exagérées (Baize et al., 2007), nous avons vérifié toutes les valeurs de $r \geq 7$ en réalisant des corrélations deux à deux entre les variables.

CHAPITRE TROIS : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. PRESENTATION DES RESULTATS

3.1.1. Eau

Les résultats d'analyse des échantillons d'eau lors de deux saisons de l'étude, sont présentés dans les tableaux 5 et 6.

Tableau 5 : Moyenne ± écart-type d'éléments dans les échantillons d'eau (mg/l) en saison sèche

Eléments	**Moyenne et écart-type d'éléments par sites**				**Standards***
	Bloc maraicher	**Canal de drainage**	**Rivière**	**Rizières**	
Cr (mg/l)	0,0014 ± 0,0004	0,0022		0,0011 ± 0,0001	0,55
Zn (mg/l)	0,018 ± 0,0087		0,044 ± 0,043		0,2
Mg (mg/l)	4,1 ± 1,9	4,5	1,48 ± 0,91	3,33 ± 1,3	
K (mg/l)	19,4 ± 9,13	33,1	6,63 ± 2,95	19,5 ± 4	

Tableau 6 : Moyenne et écart-type d'éléments dans les échantillons d'eau (mg/l) en saison pluvieuse

Eléments	**Moyenne ± écart-type d'éléments par sites**				**Standards***
	Bloc maraicher	**Canal de drainage**	**Rivière**	**Rizières**	
Zn (mg/l)	0,026 ± 0,009	0,019		0,045 ± 0,029	0,2
Mg (mg/l)	4,22 ± 1,94	0,5	0,3	0,86 ± 0,32	
K (mg/l)	19,04 ± 9,6	3,4	1,96 ± 0,11	3,5 ± 2,7	

*FAO/OMS, 2014, cité par Diouf, 2016

Les ETM qui ne figurent pas dans les tableaux 5 et 6 sont ceux trouvés dans un seul échantillon par site, ou dont les valeurs sont en deçà des limites de détection de l'ICP-MS. Des tableaux ci-haut, il ressort que la teneur en ETM des différentes sources d'eau est faible par rapport aux valeurs limites de la FAO pour les eaux destinées à l'irrigation à long terme, qui sont de 0,55 mg/l pour le Cr et 0,2 mg/l pour le Zn. Ces valeurs ne sont pas non plus différentes au seuil de probabilité de 5% entre les sites au courant d'une même période, et d'une saison à l'autre pour un même site. Ces eaux sont aussi pauvres en éléments majeurs, Mg et K étant les 2 métaux particulièrement détectés.

Les matrices de corrélation contenant les valeurs des coefficients de Pearson (r) entre les éléments présents dans l'eau, pour les différentes saisons, sont présentées dans les tableaux 7 et 8. Ils révèlent

qu'en saison sèche, des corrélations significatives positive, entre Cr et Zn (r=0,47), et négative, entre Zn et K (r=-0,41), ont été observées. En saison pluvieuse, la corrélation entre Zn et K (r=-0,59) était significative et négative.

Tableau 7 : matrice de corrélation des éléments présents dans l'eau en saison sèche

		Eléments traces métalliques		**Eléments majeurs**	
		Cr	Zn	Mg	K
Eléments traces métalliques	Cr	1			
	Zn	0,4747	1		
Eléments majeurs	Mg	0,2195	-0,0642	1	
	K	0,2940	-0,4138	0,8730	1

Tableau 8 : matrice de corrélation des éléments présents dans l'eau en saison pluvieuse

		Elément trace métallique	**Eléments majeurs**	
		Zn	Mg	K
Elément trace métallique	Zn	1		
Eléments majeurs	Mg	-0,2792	1	
	K	-0,5969	0,9348	1

3.1.2. Sols

Les résultats d'analyse des échantillons de sol pendant les deux saisons de l'étude consignés dans les tableaux 9 et 10, révèlent que les teneurs en tous les ETM analysés, sont en déca des valeurs seuils.

Tableau 9 : Moyenne et écart-type d'éléments dans les échantillons de sol (mg/kg) en saison sèche

Eléments	**Moyenne ± écart-type d'éléments par sites**			**Standards***
	Bloc maraicher	**Autour du Canal de drainage**	**Rizières**	
Cr (mg/kg)	8,0 ± 1,9	7,87 ± 0,62	11,84 ± 4,47	100
Co (mg/kg)	0,53 ± 0,2	0,59 ± 0,15	0,83 ± 0,3	50
Ni (mg/kg)	1,53 ± 0,65	1,87 ± 0,18	2,26 ± 0,9	50
Cu (mg/kg)	7,5 ± 2,48	5,9 ± 1,72	4,16 ± 1,4	100
Zn (mg/kg)	37,2 ± 14,4	40,7 ± 14	31,33 ± 13,6	300
As (mg/kg)	0,31 ± 0,1	0,29 ± 0,05	0,44 ± 0,16	20
Se (mg/kg)	0,23 ± 0,06	0,18 ± 0,012	0,39 ± 0,18	10
Cd (mg/kg)	0,1 ± 0,04	0,08 ± 0,02	0,1 ± 0,05	3
Pb (mg/kg)	11,8 ± 6	11,55 ± 4,5	17,12 ± 10	100
Na (mg/kg)	164,8 ± 35	159,1 ± 35,4	139,6 ± 25,7	
Mg (mg/kg)	233,8 ± 80	174,2 ± 20,2	241,2 ± 115	
K (mg/kg)	283,3 ± 56,5	233,7 ± 60,5	285,5 ± 160	
Ca (mg/kg)	1874,1 ± 810,3	1005,8 ± 343,2	931,9 ± 350,2	
Fe (mg/kg)	2855,9 ± 1399,6	2974,9 ± 471	4606,1 ± 1787,7	

Mn (mg/kg)	0,37 ± 0,16	0,24 ± 0,04	0,42 ± 0,13	
Al (mg/kg)	3310,1 ± 891,4	3927,5	4344,7 ± 481,8	

Le tableau précédent montre que les différents ETM trouvés dans le sol en saison sèche peuvent être classées selon l'ordre décroissant ci-après de leurs teneurs dans tous les 3 sites : Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Co > As > Se > Cd.

Tableau 10 : Moyenne et écart-type d'éléments dans les échantillons de sol (mg/kg) en saison pluvieuse

Eléments	**Moyenne ± écart-type d'éléments par sites**			**Standards**
	Bloc maraicher	**Autour du Canal de drainage**	**Rizières**	
Cr (mg/kg)	11,23 ± 1,8	8,79 ± 0,17	19,29 ± 14,1	100
Co (mg/kg)	0,51 ± 0,11	0,39 ± 0,017	1,26 ± 0,87	50
Ni (mg/kg)	1,68 ± 0,45	1,11 ± 0,07	3,64 ± 3,04	50
Cu (mg/kg)	8,81 ± 1,83	3,13 ± 0,35	5,96 ± 5,05	100
Zn (mg/kg)	30,75 ± 7,3	18,75 ± 4,75	42,58 ± 41,02	300
As (mg/kg)	0,38 ± 0,09	0,21 ± 0,04	0,74 ± 0,62	20
Se (mg/kg)	0,37 ± 1,23	0,22 ± 0,05	1,19 ± 1,24	10
Cd (mg/kg)	0,11 ± 0,02	0,05 ± 0,0089	0,24 ± 0,28	3
Pb (mg/kg)	13,58 ± 3	7,45 ± 1,2	19,27 ± 12	100
Na (mg/kg)	130,36 ± 48	81,3 ± 1,15	82,5 ± 11,7	
Mg (mg/kg)	348,48 ± 141,7	140,0 ± 20,3	461,22 ± 399,2	
K (mg/kg)	449,5 ± 171,7	192,15 ± 69,0	515,78 ± 441	
Ca (mg/kg)	3396,4 ± 3313,6	562,6 ± 236,1	1145,5 ± 1056	
Fe (mg/kg)	3023,05 ± 417,3	2246,4 ± 148,7	6052 ± 4148,9	
Mn (mg/kg)	0,4 ± 0,05	0,2 ± 0,021	0,92 ± 0,87	
Al (mg/kg)	5857,2 ± 1337,8	4360,3 ± 1343,7		

***** FAO/OMS, 2014, cité par Diouf, 2016

Du tableau ci-haut, il apparait que les teneurs en différents ETM trouvés dans le sol en saison pluvieuse peuvent être classées d'après l'ordre décroissant ci-après selon les sites :

- Bloc maraicher : Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Co > As > Se > Cd
- Autour du canal de drainage et dans les rizières : Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > Co > Se > As > Cd.

Les matrices de corrélation entre les éléments présents dans le sol, sont représentées dans les tableaux 11 et 12. A la lumière du tableau 11, il apparait qu'en saison sèche, les interactions entre les différents ETM sont en général significatives et positives, sauf dans quelques cas où on observe des corrélations non-significatives.

Au cours de cette même période, les corrélations entre les ETM et les éléments majeurs de l'écorce terrestre, sont significatives (positives ou négatives) ou non. Les interactions négatives concernent Al avec Cr, Cu et Pb. Les corrélations non-significatives, par contre, sont les plus observées pour Ca et Na d'une part, et les ETM d'autre part.

En saison pluvieuse, le tableau 12 renseigne que les interactions entre ETM sont toutes significatives et positives. De même, il n'y a pas d'interactions négatives entre les ETM et les éléments majeurs, les corrélations étant soit positives, soit non-significatives.

Tableau 11 : matrice de corrélation des éléments dans le sol en saison sèche

		Eléments traces métalliques									**Eléments majeurs**						
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb	Na	Mg	K	Ca	Fe	Mg	Al
Eléments traces métalliques	Cr	1															
	Co	0,8	1														
	Ni	0,6	0,6	1													
	Cu	0,0	0,0	0,1	1												
	Zn	0,3	0,3	0,6	0,6	1											
	As	0,7	0,5	0,7	0,2	0,5	1										
	Se	0,9	0,7	0,6	0,0	0,3	0,7	1									
	Cd	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	0,5	0,5	1								
	Pb	0,7	0,7	0,6	0,4	0,6	0,8	0,6	0,5	1							
Eléments majeurs	Na	0,1	0,0	0,2	0,4	0,3	0,0	0,2	0,3	0,2	1						
	Mg	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,2	1					
	K	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5	0,1	0,7	1				
	Ca	0,0	0,0	0,2	0,5	0,6	0,2	0,1	0,6	0,2	0,2	0,7	0,5	1			
	Fe	0,7	0,6	0,7	0,1	0,5	0,9	0,7	0,6	0,7	0,0	0,7	0,4	0,1	1		
	Mn	0,4	0,4	0,5	0,2	0,4	0,5	0,4	0,6	0,6	-0,3	0,7	0,4	0,4	0,6	1	
	Al	-0,6	-0,3	0,6	-0,5	0,1	0,5	0,0	0,4	-0,5	-0,6	0,0	-0,4	-0,4	0,9	0,4	1

Tableau 12 : matrice de corrélation des éléments dans le sol en saison pluvieuse

		Eléments traces métalliques									**Eléments majeurs**						
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb	Na	Mg	K	Ca	Fe	Mg	Al
Eléments traces métalliques	Cr	1															
	Co	0,7	1														
	Ni	0,9	0,9	1													
	Cu	0,6	0,4	0,6	1												
	Zn	0,8	0,6	0,8	0,7	1											
	As	0,9	0,8	0,9	0,6	0,8	1										
	Se	0,9	0,8	0,9	0,4	0,6	0,9	1									
	Cd	0,9	0,8	0,9	0,5	0,9	0,9	0,8	1								
	Pb	0,7	0,7	0,7	0,5	0,6	0,8	0,7	0,6	1							
Eléments majeurs	Na	0,5	0,4	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,2	1						
	Mg	0,7	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,7	0,8	0,4	0,7	1					
	K	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,9	1				
	Ca	0,4	0,2	0,4	0,6	0,6	0,4	0,2	0,5	0,1	0,8	0,7	0,7	1			
	Fe	0,9	0,9	0,9	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,8	0,5	0,8	0,7	0,3	1		
	Mn	0,8	0,7	0,8	0,4	0,5	0,8	0,9	0,7	0,5	0,5	0,7	0,7	0,3	0,8	1	
	Al	0,0	0,6	0,4	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	-	0,0	0,7	0,7	0,4	0,2	0,5	1

3.1.3. Echantillons végétaux

Les teneurs en quelques ETM analysés dans les échantillons végétaux, sont présentées dans les tableaux 13 et 14.

Tableau 13 : Moyenne et écart-type d'ETM dans les échantillons végétaux (mg/Kg de MF) en saison sèche

Eléments	Moyenne ± écart-type d'éléments par sites		Standards*
	Bloc maraicher (amarante)	Autour du Canal de drainage (amarante)	
Cu (mg/kg MF)	1,37 ± 0,16	1,19 ± 0,07	73
Zn (mg/kg MF)	13,6 ± 6,9	19,49 ± 1,32	100
Pb (mg/kg MF)	1,39 ± 0,42	0,71 ± 0,12	0,3
Cd (mg/kg MF)	0,034 ± 0,013	0,035 ± 0,007	0,2

Tableau 14 : Moyenne et écart-type d'ETM dans les échantillons végétaux (mg/Kg de MF) en saison pluvieuse

Eléments	Moyenne ± écart-type d'éléments par sites				Standards
	Bloc maraicher (amarante)	Autour du Canal de drainage (amarante)	Rizières (grains de riz)	Aire de séchage (grains de riz)	
Cu (mg/kg de MF)	1,42 ± 0,33	1,08 ± 0,155	3,18 ± 0,77	1,9 ± 0,25	73
Zn (mg/kg de MF)	13,6 ± 12,58	22,01 ± 8,06	19,98 ± 1,87	20,84 ± 1,47	100
Pb (mg/kg de MF)	0,8 ± 0,28	0,335 ± 0,134	0,24 ± 0,085	0,19 ± 0,14	0,3
Cd (mg/kg de MF)	0,08 ± 0,04	0,06 ± 0,028	0,13 ± 0,081	0,05 ± 0,025	0,2

*Commission Européenne, 2006

Les teneurs en Pb des échantillons d'amarante pendant les deux saisons, dépassent les seuils fixés pour cet ETM dans les produits végétaux (0,3 mg Pb/kg de MF). En ce qui concerne les grains de riz, les concentrations en Pb et Cd sont quelques fois élevées mais restent dans les limites fixées.

Les teneurs en ETM des échantillons végétaux dans tous les sites et lors de deux saisons, suivent l'ordre décroissant ci-après : Zn > Cu > Pb > Cd. Au seuil de probabilité de 5%, les teneurs en Pb sont plus importantes dans l'amarante prélevée dans le bloc maraicher, tandis que la concentration la plus importante en Cu s'observe dans grains de riz collectés dans les rizières. Les grains de riz, bien que récoltés sur des sites et années différents, ont des concentrations similaires en ETM, excepté le Cu. En outre, l'amarante est plus riche en Pb en saison sèche et sa concentration en Cd la plus élevée est

observée en saison pluvieuse. Toutes ces différences sont illustrées dans les figures 19 à 22 ci-dessous, et les résultats du test de Tukey en annexe.

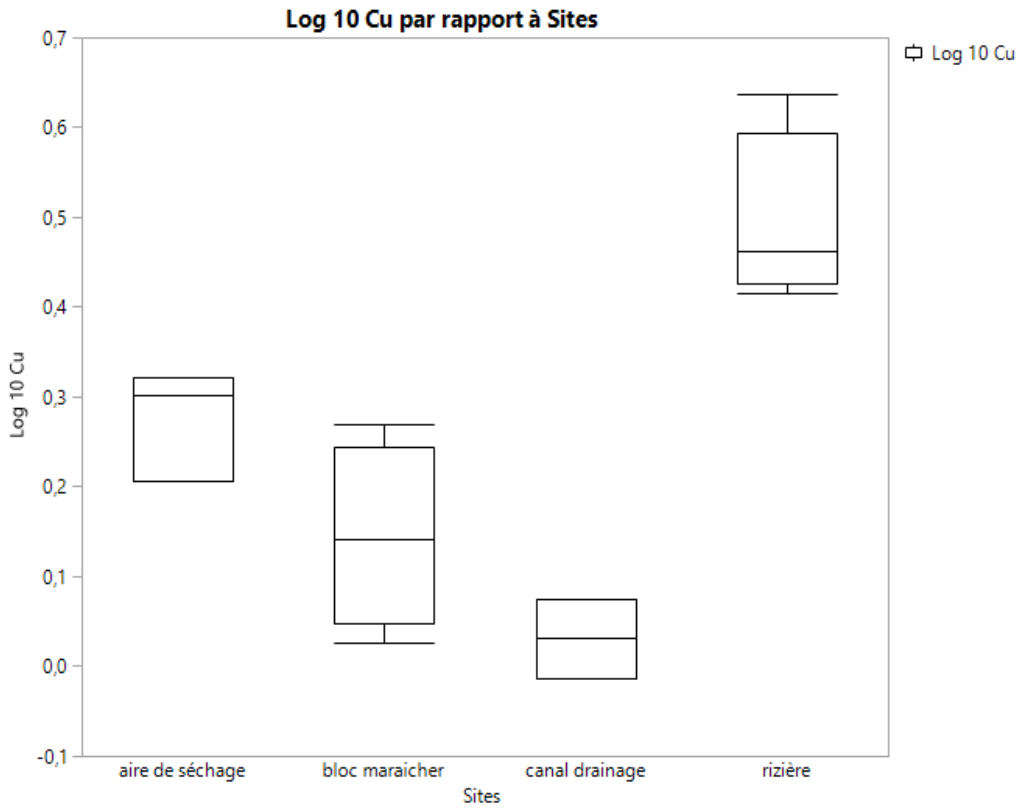


Figure 19 : Teneur en Cu dans l'amarante (bloc maraicher, aire de séchage) et le riz (aire de séchage, rizière)

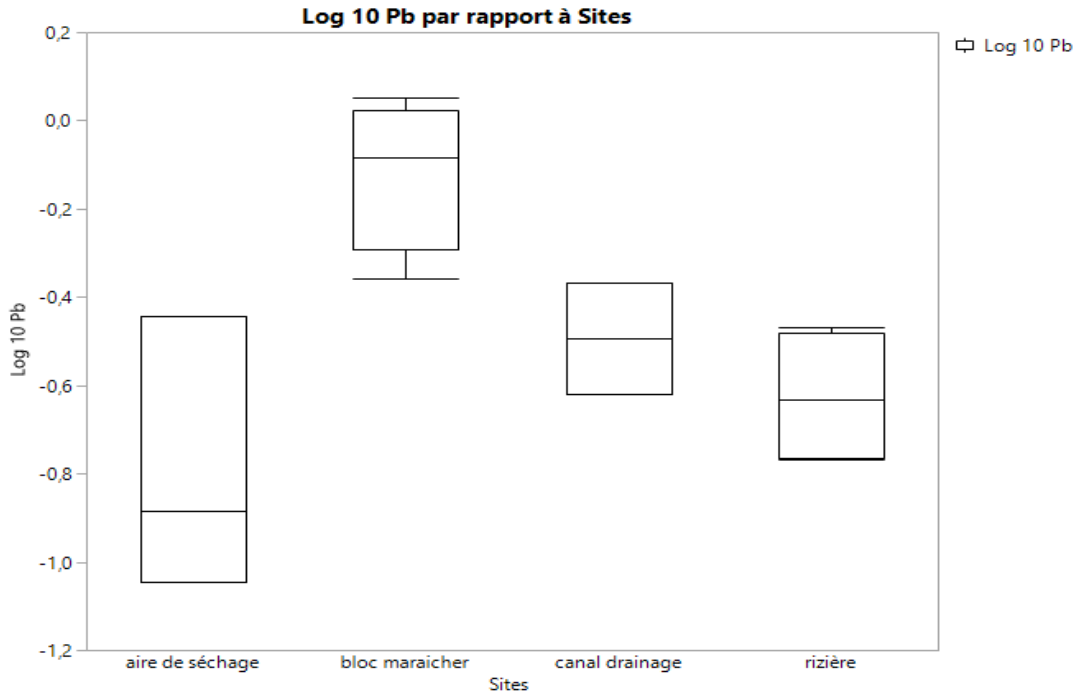


Figure 20 : Teneur en Pb dans l'amarante (bloc maraicher, aire de séchage) et le riz (aire de séchage, rizière)

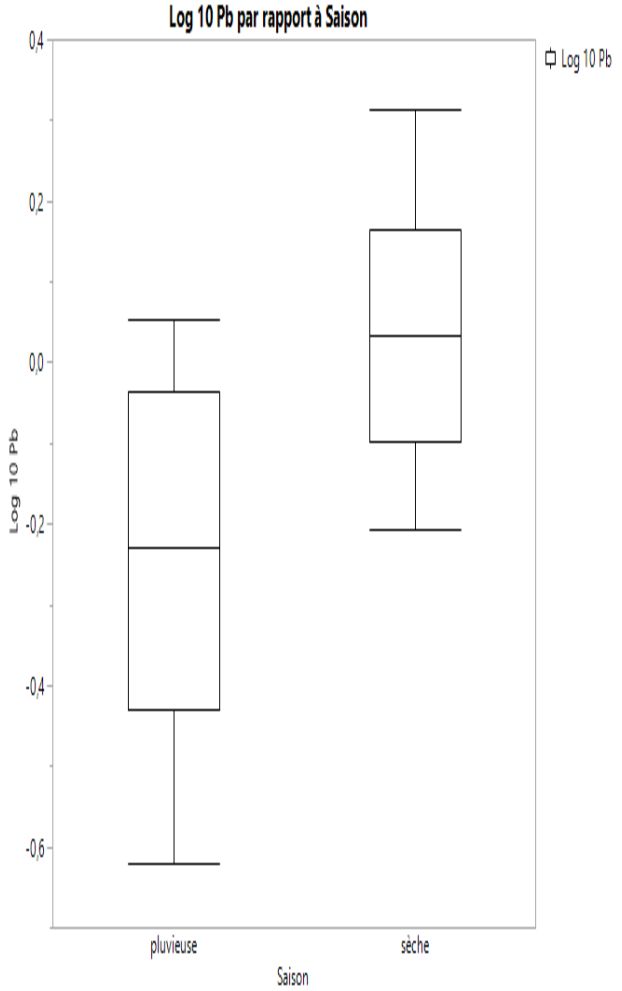


Figure 21 : Teneur en Pb dans l'amarante selon les saisons

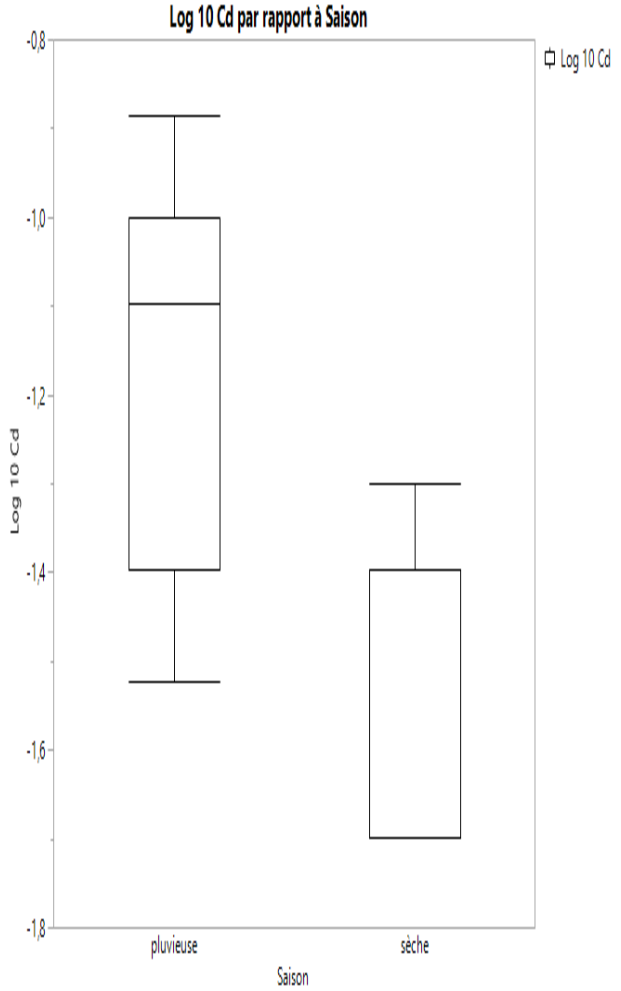


Figure 22 : Teneur en Cd dans l'amarante selon les saisons

A la lumière du tableau 15, les corrélations suivantes sont observées en saison sèche pour l'amarante : interactions positive entre Pb et Cu (r=0,42) et négative entre Pb et Zn (r=-0,48).

Les tableaux 16 à 18 renseignent qu'en saison pluvieuse, les interactions significatives entre ETM dans l'amarante, sont Cu/Pb (r=0,61), Cu/Cd (r=0,65) et Pd/Cd (r=0,75). Pour les grains de riz récoltés dans les rizières, les éléments concernés sont Zn et Cu (r=0,77), Cu et Pb (r=0,58), Cu et Cd (r=0,91), Zn et Pb (r=0,9), Zn et Cd (r=0,64), Cd et Pb (r=0,61). Quant aux grains de riz prélevés sur l'aire de séchage, on y observe les interactions négatives entre Pb et Cu (r=-0,9), Cd et Zn (r=-0,99).

Tableau 15 : matrice de corrélation des ETM dans l'amarante en saison sèche

		Eléments traces métalliques			
		Cu	Zn	Pb	Cd
Eléments traces métalliques	Cu	1			
	Zn	-0,25	1		
	Pb	0,42	-0,48	1	
	Cd	-0,04	0,31	0,16	1

Tableau 16 : matrice de corrélation des ETM dans l'amarante en saison pluvieuse

		Eléments traces métalliques			
		Cu	Zn	Pb	Cd
Eléments traces métalliques	Cu	1			
	Zn	-0,37	1		
	Pb	0,61	-0,19	1	
	Cd	0,65	0,33	0,64	1

Tableau 17 : matrice de corrélation des ETM dans les grains de riz échantillonnés dans les rizières en saison pluvieuse

		Eléments traces métalliques			
		Cu	Zn	Pb	Cd
Eléments traces métalliques	Cu	1			
	Zn	-	1		
	Pb	0,58	-	1	
	Cd	-	0,64	0,61	1

Tableau 18 : matrice de corrélation des ETM dans les grains de riz prélevés sur l'aire de séchage en saison sèche

		Eléments traces métalliques			
		Cu	Zn	Pb	Cd
Eléments traces métalliques	Cu	1			
	Zn	-0,3	1		
	Pb	-	-0,12	1	
	Cd	0,34	-0,99	0,07	1

3.2. DISCUSSION DES RESULTATS

3.2.1. ETM dans l'eau

Les faibles teneurs en ETM dans les différents points d'eau analysés (tableaux 5 et 6), peuvent être liées à la dilution de ces éléments dans la rivière N'djili, entre les sources de pollution et notre site d'étude. En effet, ces sources sont notamment les déchets non-traités de deux grands hôpitaux, rejetés dans la rivière à quelques km en amont de notre site. Ces effluents hospitaliers contenaient jusqu'à 20,1 µg de Cd/l (Kasuku et al., 2016), ainsi leur déversement dans la rivière expliquerait qu'à proximité des zones de rejet, les teneurs en cadmium, cobalt, nickel, cuivre et chrome dans l'eau soient supérieures, respectivement, à 0.1 mg/l, 0.05 mg/l, 0.02 mg/l, 1mg/l et 0.2 mg/l, en 2005 (Kifuani, 2009). Mais la dilution des contaminants semble forte de l'amont en aval, puisque dans autre bief de la rivière n'djili, seulement 0,46 mg de Hg et 48,84 mg de Zn ont été mesurés par kg de sédiments (Ilunga et al., 2013).

On pourrait aussi comprendre les faibles valeurs en certains ETM dans les différentes sources d'eau, comme la conséquence de leur accumulation possible dans les sédiments, vu l'affinité de ces éléments avec la phase solide. En effet, parmi les 9 ETM analysés, l'indice de transport soluble est faible pour 6 d'entre eux, soit inférieur à 1% pour Zn, Cr et Pb, et en deçà de 10% pour Cu, Co et Cd (voir figure 7) (UNEP/WHO, 1996). D'où l'intérêt de procéder également à l'analyse des sédiments lors des travaux à venir, car ils contiennent souvent des quantités importantes d'ETM qui peuvent migrer dans l'eau (Luoma et Rainbow, 2008, cités par Tessier, 2012).

3.2.2. ETM dans les sols

Les teneurs en ETM observées dans notre travail sont faibles, mais ces valeurs sont supérieures aux limites de détection de l'ICP-MS. Ce, contrairement à un site inondable par la rivière et à faible fond géochimique au Nigéria, où les teneurs en Cd, Cr et As n'ont été pas détectables (Ayinde, 2015). Ainsi, il s'avère quand même important de suivre la dynamique d'accumulation des ETM sur notre site au fil des ans, car dans un sol irrigué pendant plusieurs années par les eaux usées, au Nigéria, la teneur pseudo-totale en Cd avait un moment dépassé la valeur seuil (4 mg/kg vs 3 mg/kg) (Abdu, 2010).

Nous pensons que ces faibles teneurs en ETM dans les sols sont essentiellement influencées par la composition chimique des sources d'eau apportées. La contribution du sol est déconsidérée d'autant plus que le fond géochimique est jugé négligeable (Ndembo, 2009). De même, la profondeur du sol analysé, le pH et la mobilité des éléments peuvent aussi justifier les teneurs mesurées. En effet, le pH des sols superficiels que nous avons prélevés (0-20 cm), est théoriquement de 4,8 (Arénosols) à 5 (Histosols) (Baert et al., 2009). A ces pH acides, certains éléments sont très mobiles (Noubissie, 2015), et peuvent être absorbés par les cultures ou migrer dans les horizons profonds, vu la texture sableuse des sols.

Le Zn et le Cd sont lors de deux saisons, respectivement, l'élément le plus et le moins abondant dans le sol (tableaux 9 et 10), et nos observations sont similaires à celles de Zhang et al. (2010) dans un sol marécageux en Chine. Ce fait peut être lié à la composition chimique des eaux apportées, influencée par celle des sources de pollution (sédiments et déchets hospitaliers, pour notre cas). En effet, le Zn est l'un des ETM les plus abondants dans le sol (150-5000 mg/kg), tandis que le Cd est le moins présent (0,10-345 mg/kg) (Wuana et Okieimen, 2011). De même, la teneur en Zn des déchets hospitaliers est importante, puisque beaucoup de produits utilisés dans les hôpitaux contiennent ce métal. Il s'agit par exemple d'antibiotiques, d'antidotes, d'antifongiques et d'antiinflammatoires (Kim, 2005).

3.2.3. ETM dans les échantillons végétaux

L'ordre Zn > Pb > Cu > Cd dans les échantillons végétaux, est le même que celui observé dans tous les sols. Cela tient au fait que la teneur en ETM des plantes est principalement influencée par leur concentration dans le sol (Noubissie, 2015). Mais la teneur en ETM du sol n'explique pas tout, car les concentrations en Pb dans l'amarante dépassent les standards fixés pour les légumes feuilles, alors que son accumulation dans les sols était en deçà des valeurs limites (voir tableaux 9 et 10). De plus, l'amarante est plus riche en Pb en saison sèche, et plus concentrée en Cd en période pluvieuse, malgré que la teneur en ces ETM dans le sol reste inchangée d'une saison à l'autre.

Ce qui montre qu'en plus de la teneur en ETM des sols, d'autres facteurs ont influencé l'accumulation de Pb dans l'amarante. Il pourrait s'agir, notamment, des interactions négatives entre d'une part Pb, et d'autre part Fe^{2+}, Zn^{2+} et Ca^{2+} dans ces sols carencés en éléments majeurs (Affholder, 2013 ; Baert et al., 2009) ; de l'existence des formes disponibles d'ETM, par exemple Pb lié à la matière organique (Adriano et al., 2004) ; des aptitudes d'accumulation des éléments métalliques par les plantes (Noubissie, 2015) et le stockage préférentiel de certains ETM dans les feuilles plutôt que dans les graines (Kadem, 2005) ; de la compétition de Pb à l'endroit de Ca^{2+} et K^{+} dans la plante; de la diminution possible de la teneur en Zn et Cu au cours de la croissance des légumes (Noubissie, 2015) ; et de la compétition entre Cu et Zn dans la plante (Reichman, 2002).

L'accumulation de Pb dans les cultures d'amarante peut ralentir la croissance des plantes et réduire le rendement, tel qu'observé par Mpundu et al. (2013b) dans un sol de Lubumbashi (RD Congo). De même, les consommateurs de ces produits végétaux pourraient souffrir, notamment de cancer, d'obésité et des maladies cardiovasculaires (Diallo et al., 2013).

Pour le Zn qui est un oligo-élément pour les végétaux, les valeurs élevées mais inférieures aux seuils, peuvent au contraire se révéler avantageuses pour la production végétale (Fageria et al., 2002). Aussi, l'accumulation dans les grains de riz de cet ETM très bénéfique pour la nutrition humaine, est à favoriser, puisque plusieurs habitants de Kinshasa font partie d'au moins 30% de la population mondiale carencée en Zn (Kennedy et al., 2003).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le présent travail avait l'objectif de mesurer la teneur en ETM de l'eau de N'djili et d'autres points d'eau, ainsi que celle des sols et de quelques produits de récolte au site masina rail 1 (pool malebo) ; et de comparer les valeurs obtenues aux standards fixés. Ce, dans le but de vérifier l'existence de la pollution en ETM de la rivière N'djili, des sols et des cultures sur ce site.

Les résultats de l'étude révèlent que les teneurs en ETM dans les sources d'eau et les sols exploités sur ce site, sont soit inférieures aux limites de détection de l'ICP-MS, soit faibles par rapport aux valeurs seuils. Pour les échantillons d'eau, nous avons justifié les faibles concentrations obtenues, par la dilution de ces éléments dans la rivière N'djili, entre les sources de pollution et notre site d'étude. Ce, d'autant plus que les publications antérieures ont mis en exergue une réduction notable de la teneur en ETM, lorsqu'on s'éloigne des sites de rejet des effluents hospitaliers sur la rivière N'djili. De plus, nous avons suggéré l'analyse des sédiments lors des travaux ultérieurs, car les quantités importantes d'ETM qu'ils contiennent généralement, peuvent migrer progressivement dans l'eau et la polluer.

Quant aux faibles teneurs en ETM des sols, elles ont été expliquées essentiellement par la composition chimique des sources d'eau apportées. Quant au fond géochimique pouvant approvisionner le sol en ETM, il est considéré négligeable. Les concentrations dans le sol sont certes faibles, mais témoignent peut-être d'une accumulation lente des ETM. Ainsi avons-nous proposé de suivre la dynamique de cette accumulation au fil des ans. De même, nous avons jugé important que les sols des horizons profonds soient aussi analysés dans les études ultérieures, car certains ETM que nous n'avions pas dosés en surface, ont peut-être été lixiviés, dans ces sols à texture sableuse.

Alors que le niveau d'accumulation des ETM n'était inquiétant dans aucun sol, les teneurs en Pb des échantillons d'amarante dépassent les valeurs standards. Dans les grains de riz, par contre, les concentrations en tous les éléments analysés sont en-dessous des limites fixées. Selon nous, ces teneurs en Pb dans l'amarante sont dus à la conjonction de plusieurs facteurs ayant influencé l'accumulation de cet ETM, notamment, des interactions négatives entre Pb, et d'autres éléments dans le sol et dans la plante, l'existence des formes disponibles de cet ETM dans le sol, une bonne aptitude d'accumulation de cet élément par l'amarante et son stockage préférentiel dans les feuilles.

Pb étant toxique pour les plantes et les humains, son accumulation dans l'amarante peut réduire la productivité de cette culture et intoxiquer les consommateurs de ces produits maraichers. D'où l'intérêt de mieux comprendre les facteurs qui influencent l'absorption de cet ETM par l'amarante, afin de limiter sa phytodisponibilité.

Pour les grains de riz, en revanche, une teneur élevée en zinc est bénéfique à la nutrition humaine, et participe aux objectifs du programme Harvest Plus, de lutte contre la carence en ce nutriment. De ce fait, des études peuvent entrevoir les possibilités de favoriser une plus grande accumulation de cet ETM dans les grains de riz récoltés sur le site masina rail 1.

BIBLIOGRAPHIE

Abdu, N. (2010). *Availability, transfer and balances of heavy metals in urban agriculture of West Africa*. Doctoral Thesis, University of Kassel, 158p.

Adriano, D. C., Wenzel, W. W., Vangronsveld, J., & Bolan, N. S. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, *122*, 121–142.

Affholder, M. (2013). *Approche des mécanismes de tolérance du romarin aux éléments traces métalliques et métalloïdes : perspectives pour une phytostabilisation des sols méditerranéens pollués*. Thèse de Doctorat, Aix-Marseille Université, 358p.

Amlan, K. G., Bhatt, M. A., & Agrawal, H. P. (2012). Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *184* (2), 1025–1036. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2018-6

Ayinde, A. E. (2015). Economic Analysis of Heavy Metals Pollution on Soil , River and Rice Production in Nigeria. *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences (JETEMS)*, *6* (8), 363–366.

Baert, G., Ranst, E. V. A. N., Ngongo, M. L., Kasongo, E. L., Verdoodt, A., Mujinya, B. B., & Mukalay, J. M. (2009). *Guide des Sols en R.D. Congo. Tome II : Description et Données Physico-Chimiques de Profils Types*. UGent, Hogent, UNILU (Ed.), 282p.

Baize, D. (2009). 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.

Baize, D., Deslais, W., & Saby, N. (2007). *Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France*. *Résultats d'une collecte de données à l'échelon national. Rapport ADEME, 49p*. https://doi.org/www.gissol.fr

Bangata, B. M., Ngbolua, K. N., Ekutsu, E., & Kalonji-Mbuyi, A. (2013). Comportement de quelques lignées de riz NERICA en culture de bas–fond dans la région de Kinshasa, République Démocratique du Congo [RDC]. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *7* (1), 25–32.

Bidar G., Waterlot C., Sahmer K., Pelfrêne A., Pourrut B., Schwartz C., D. F. (2017). *Phytodisponibilité des ETM pour les plantes potagères et extrapolations dans la quantification de l'exposition des consommateurs*. Rapport ADEME, 204p.

Bipendu, M. N., Lukanda, M. V., Musibono, E. A. D., & Pwema, K. V. (2017). Effets de rejets industriels de l'usine de traitement d'eau de Kinshasa (REGIDESO) sur la qualité physico-chimique et biologique des eaux des rivières Matete et N'djili , RD Congo. International Journal of Innovation and Scientific Research, *29* (2), 96–109.

Boland, J., Koomen, I., van Lidth de Jeude, J., & Oudejans, J. (2004). *Les pesticides: composition, utilisation et risques*. *Agrodok 29*, Fondation Agromisa, Wageningen, 11p.

Burnol, A., Duro, L., & Grive, M. (2006). *Eléments traces métalliques - guide méthodologique : recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines*. *Rapport d'étude INERIS, 138p.* https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, *212* (4), 475–486. https://doi.org/10.1007/s004250000458

Colinet, G. (2003). *Elements traces métalliques dans les sols. Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en region limoneuse belge. Introduction - première partie*. Thèse de Doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 139p.

Commission Européenne. (2006). Règlement (CE) N° 1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires. Rapport, 29p.

Convention de Ramsar sur les zones humides. (2016). Les zones humides : une protection naturelle contre les catastrophes. *Fiche Technique 9.1*, 2 p.

Diallo, Y., Gueye, M. T., Sakho, M., Gbaguidi Darboux, P., Kane, A., Barthelemy, J. P., & Lognay, G. (2013). Importance nutritionnelle du manioc et perspectives pour l'alimentation de base au Sénégal (synthèse bibliographique). *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, *17* (4), 634–643.

Diouf, A. (2016). *Effect of organic ammendments on heavy metal distribution and uptake in vegetable gardens in Senegal*. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 117p.

El Ghali, B. (2015). *Validation d'une méthode d'analyse des traces métalliques par ICP-MS*. Mémoire de Master, Centre de recherche Réminex (Marrakech), 53p.

Elenge-Molayi, M., Aubry, J.-C., Jacob, L., & De Brouwer, C. (2011). Quantification of Metal in the Hair of Copper Miners in Katanga Province, Democratic Republic of Congo. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, *01* (04), 1–6. https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000114

Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2002). Micronutrients in Crop Production. *Advances in Agronomy*, *77*, 185–268. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6

Faisal, B. M. R., Majumder, R. K., Uddin, M. J., & Halim, M. A. (2014). Studies on heavy metals in industrial effluent , river and groundwater of Savar industrial area , Bangladesh by Principal Component Analysis. International Journal of Geomatics and Geosciences, *5* (1), 182–191.

FAO/OMS. (2014). Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants: Seventy-seventh Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.

FAO. (2016). *Acidification du sol*. Poster présenté à la Journée Internationale des Sols 2016, 2p.

Gizanga, V. R., Musibono, E. A. D., Aleke, A. L., & Milau, E. F. (2016). Contribution à l'évaluation de la qualité des effluents industriels et de leurs impacts sur les milieux récepteurs (ville de Kinshasa - République Démocratique du Congo, RDC). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, *21* (2), 360–366.

Hooda, P. S. (Ed.). (2010). *Trace elements in soils*. *John Wiley and Sons, Ltd.* (Blackwell), 618p.

IGIP. (2007). Plans d'actions pour l'assainissement de la Ville de Kinshasa. Rapport R5, Chap.3.

Ilunga, J. M., Devarajan, N., Le Faucheur, S., Mputu, J. K., Atibu, E. K., Sivalingam, P., Prabakar, K., Mpiana, P .T., Wildi, W., & Poté, J. (2013). Effects of untreated hospital effluents on the accumulation of toxic

metals in sediments of receiving system under tropical conditions: Case of south india and Democratic Republic of Congo. *Chemosphere*, *93* (6), 1070–1076.

Kabamba, M., Basosila, N., Mulaji, C,. Mata, H., & Tuakuila J. (2016). Toxic Heavy Metals in Ambient Air of Kinshasa, Democratic Republic Congo. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, *3* (2), 3–6.

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants* (Vol. 3th). CRC Press LLC, 403p. https://doi.org/10.1201/b10158-25

Kadem, D-El-D. (2005). *Évaluation et comportement des métaux lourds (Cd – Cr – Cu – Ni – Pb – Zn et Mn) dans les sols à vocation agricole et à végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique (EL-Hadjar – Annaba – Est Algérien). Influence de la végétation sur la dynamique de ces métaux*. Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 76p.

Kasongo, L. M. E., & Yumba, G. K. (2009). *Rapport d'étude sur l'agriculture périurbaine (maraichage) de Kinshasa*. Action Contre la Faim, 87p.

Kasuku, W., Bouland, C., De Brouwer, CH., Mareschal, B., Mulaji, C., Malumba, M., Monama, O., Epumba B., & Kitambala, A. (2016). Etude de l'impact sanitaire et environnemental des déchets hospitaliers dans 4 éblissements hospitaliers de Kinshasa en RDC. *Déchets, Sciences et Techniques*, 71, 25–33.

Kennedy, G., Nantel, G., & Shetty, P. (2003). The scourge of "hidden hunger": global dimensions of micronutrient deficiencies. *Food Nutrition and Agriculture*, *32*, 8–16.

Kifuani, K. M. (2009). *Wastewater Use and Urban Agriculture in Kinshasa, DR Congo*. In: *Agriculture in Urban Planning, pp. 147-165*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Kim, N. (2005). *Cadmium accumulation in Waikato soils*. *Environment Waikato Technical Report 2005/51,* Hamilton East, 143p.

Lateef, A. S. A., Fernandez-Alonso, M., Tack, L., & Delvaux, D. (2010). Geological constraints on urban sustainability, Kinshasa City, Democratic Republic of Congo. *Environmental Geosciences*, *17* (1), 17–35. https://doi.org/10.1306/eg.04080908007

Lemba, S. D. (2013). *Assessment of land use dynamics of the N'djili catchment in DR Congo: Implication for catchment planning*. Master Thesis, University of Zimbabwe, 81p.

Liénard, A., & Colinet, G. (2018). Transfert en cadmium et zinc vers l'orge de printemps en sols contaminés et non contaminés de Belgique: Évaluation et prédiction. *Cahiers Agricultures*, *27* (2), 1–10 p. https://doi.org/10.1051/cagri/2018008

Lokakao, T. I., & Shamba, E. N. (2015). *Monographie de l'eau de la ville de Kinshasa. Water-Megacities and Global Change, 16p*.

Luboya, J-D. K. M. (2002). *Etude systémique du bassin versant de la rivière N'djili à Kinshasa*. Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures, Ecole Régionale Post-Universitaire d'Amenagement et de gestion Integrés des Forêts et Territoires Tropicaux (ERAIFT), 219p.

Lumbuenamo, S., Ngomba, N., & Milau, E. (2010). Pollution au plomb de la rivière N'djili. *Annales de La Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa (UNIKIN)*, *5* (3), 37–48.

Luoma, S.N., & Rainbow P.S. (2008). Metal contamination in aquatic environment. Science and lateral

management, Cambridge, 573p.

McBride, M. B., & Cherney, J. (2004). Molybdenum, Sulfur, and Other Trace Elements in Farm Soils and Forages after Sewage Sludge Application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *35* (3–4), 517–535.

Mihali, C., Michnea, A., Oprea, G., Gogoaşa, I., Pop, C., Senilă, M., & Grigor, L. (2012). Trace element transfer from soil to vegetables around the lead smelter in Baia Mare, NW Romania. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, *10* (1), 828–834.

Mindele, L. U. (2016). *Caractérisation et tests de traitement des déchets ménagers et boues de vidange par voie anaérobie et compostage pour la ville de Kinshasa*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, 313p.

Monsembula I. R. J. C., Liyandja, T., & Stiassny, M. L. J. (2013). Fishes of the N'sele River (Pool Malebo, Congo basin, Central Africa): A list of species collected in the main channel and affluent tributaries, Kinshasa Province, Democratic Republic of Congo. *Check List*, *9* (5), 941–956.

Mpundu, M. M., Useni, S. Y., Mwamba, M., Kateta, M. G., Mwansa, M., Ilunga, Kamengwa, K. C., Kyungu, K., & Nyembo, K. L. (2013b). Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de jardins potagers en Lubumbashi et risques de contamination des cultures. *Journal of Applied Biosciences*, *65*, 4957–4968.

Muteba , L. J-P., Kitoko, N. F., Moma, T. T. B., & Mande, S. M. (2011). *La pollution de la rivière Kafubu (Mayi ni uzima)*. *Plateforme des organisations pour la promotion et la défense des droits économiques, sociaux et culturels (DESC/RDC), Rapport d'enquête, 95p*.

Musibono, D. E., Biey, E. M., Kisangala, M., Nsimanda, C.I., Munzundu, B.A., Kekolemba, V., & Palus, J. J. (2011). Agriculture urbaine comme réponse au chômage à Kinshasa, République Démocratique du Congo. VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], 11 (1).

Muyaya, K. B., Konunga, M. G., Muamba, M. P., Mutambwe, S., Lumbuenamo, S. R., & Rudant, J. P. (2017). Evaluation par télédétection , de l'impact spatial des activités agricoles et de pêche dans les zones humides situées autour du pool malebo dans la ville de Kinshasa en République Démocratique du Congo. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, *4* (3), 85–95.

Muzingu, N. (2010). *Les sites maraîchers coopérativisés de Kinshasa en RD Congo : contraintes environnementales et stratégies des acteurs*. Thèse de Doctorat, Université Catholique de Louvain, 199p.

Nangah, K. Y., Angui, K. T. P., Kouakou, Y. K. N., Rusu, E., Yao-Kouame, A., & and Savané I. (2013). Teneurs en éléments traces métalliques (ETM) dans quelques sols manganésifères dérivés de matériaux volcano-sédimentaires de Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, *2* (4), 372–383.

Nazih, I., Fekhaoui, M., Blidi, S. EL., Abidi, A. EL., & Serghini, A. (2009). Approche méthodologique de la mise en évidence des éléments traces métalliques biodisponibles dans les rizières de la plaine du Gharb. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie, *31* (2), 115–121.

Ndembo, J. L. (2009). *Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont Amba (Kinshasa / République Démocratique du Congo)*. Thèse de Doctorat, Académie d'Aix

Marseille- Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Université de Kinshasa-Faculté des Sciences Agronomiques, 203p.

Ndolo, P. G. (2015). *Gis-Based Soil Erosion Modeling and Sediment Yield of the N'Djili River Basin, Democratic Republic of Congo*. Master Thesis, Colorado State University, 220p.

NEPAD-FAO. (2006). *Réhabilitation des périmètres rizicoles prioritaires. Appui à la mise en œuvre du NEPAD–PDDAA TCP/DRC/2908 (I) (NEPAD Ref. 05/40 F), Volume III de IV. Profil de projet d'investissement bancable, 33p*.

Ngongo, M., Ranst, E. V. A. N., Baert, G., Lenge, E. K., Verdoodt, A., Mujinya, B. B., & Mukalay, J. (2009). *Guide des Sols en R.D. Congo.Tome I : Etude et Gestion*. UGent, HoGent, UNILU (Ed.), 282p.

Nguelieu, R. C. (2017). *Évaluation des risques de contamination en éléments traces métalliques (Pb , Cd , Zn) des sites maraîchers urbains de Yaoundé (Cameroun)*. Mémoire de Master, Université de Liège / Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT), 59p.

Noubissie, E. (2015). *Spéciation des composés organométalliques (Hg, Sn, Pb) dans les sols des cultures maraîchères et dans trois espèces de plantes cultivées à Ngaoundéré (Cameroun)*. Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour Ecole, 255p.

Nsimanda, I. C., Musibono, E. D., Basosila, L. N., & Wanga, B. M. B. (2015). Etude préliminaire de la contamination au Cadmium et au Plomb de *Distichodus fasciolatus*, *Mormyrops anguilloides* et *Schilbe mistus* au Pool Malebo (Fleuve Congo- Kinshasa/RD Congo) à Kinsuka. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, *10* (1), 176–183 p.

OMS. (2017). *Directives de Qualité pour l'Eau de Boisson*. Génève, 564p.

Pain, M. (1984). *Kinshasa: la ville et la cité.* Editions de l'ORSTOM/Etudes Urbaines, 269p.

PARRSA-RD Congo (Projet d'Appui à la Réhabilitattion et la Relance du Secteur Agricole en RDC). (2009). *Cadre de Politique de Réinstallation (CPR)*, Rapport Final, 114p.

Partow, H. (2011). *Problématique de l'Eau en République Démocratique du Congo: Défis et Opportunités*. PNUE, Rapport Technique, 98p.

Patel, K. S., Sahu, B. L., Ramteke, S., & Bontempi, E. (2016). Contamination of Paddy Soil and Rice with Arsenic. *Journal of Environmental Protection*, *7*, 689–698.

Phanzu, G. (2016). *Cadastres Fonciers et Prévention des Catastrophes Naturelles A Kinshasa*. In: Les Erosions en Pupublicue Democratique du Congo, Les Catastrophes Naruelles et Artificielles en R.d.congo (8418). FIG Working Week 2016, Christchurch (New Zealand), 25p.

Reichman, S. M. (2002). *The Responses of Plants to Metal Toxicity : A review focusing on Copper , Manganese and Zinc*. The Australian Minerals & Energy Environment Foundation, Occasional Paper No.14, 54p.

République Démocratique du Congo. (2013). *Stratégie Nationale de Développment de la Riziculture (SNDR)*. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, 41p.

République Démocratique du Congo. (2009). *Etude du secteur agricole. Rapport préliminaire. Bilan – Diagnostic et Note d'orientation. Ministère de l'Agriculture, Pèche et Élevage, 337p.*

Shomba K. S., Mukoka N. F., Olela N. D., T.M. Kaminar, T. M., & Mbalanda W. (2015). *Monographie de la ville de Kinshasa*. ICREDES-CRDI, 105p.

Singh, N., Kaur, M., & Katnoria, J. K. (2017). Analysis on bioaccumulation of metals in aquatic environment of Beas River Basin: A case study from Kanjli wetland. *GeoHealth*, *1* (3), 93–105.

Spencer-Jones, C. L. (2015). *Novel Concepts Derived From Microbial Biomarkers In The Congo System : Implications For Continental Methane Cycling*. Doctoral Thesis, Newcastle University, 249p.

Tembeni, J.M., Micha, J.C., Mbomba, B.NS., Vandewalle P. & Mbadu V. Z. (2014). Biologie de la reproduction d'un poisson chat Africain *Euchilichthys guentheri* (Schilthuis, 1891) (Mochokidae, Siluriformes) au Pool Malebo, Fleuve Congo (République Démocratique du Congo). *TROPICULTURA*, *32* (3), 121–129.

Tessier, E. (2012). *Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la rade de toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité*. Thèse de Doctorat, Université du Sud Toulon VAR, 292p.

Thieme, M., Shapiro, A., Colom, A., Schliewen, U., Sindorf, N., & Toham, A. K. (2008). *Inventaire Rapide des Zones Humides Représentatives en République Démocratique du Congo*. Institut Congolais pour la Conservation de la Nature, 60p.

Tshibanda, J. B., Devarajan, N., Birane, N., Mwanamoki, P. M., Atibu, E. K., Mpiana, P. T., Prabakar, K., Ilunga, J. M., Wildi, W., & Poté, J. (2014). Microbiological and physicochemical characterization of water and sediment of an urban river: N'Djili River, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, *3* (May), 47–54.

UNEP/WHO. (1996). *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. Jamie Bartram and Richard Ballance (Ed.), 348p. https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111

Vernoux, J. F., Lions, J., Petelet-Giraud, E., Seguin, J. J., & Stollsteiner, P. (2010). *Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE*. Rapport Final BRGM/RP-57044-FR, 235p.

Wetshondo, O. D. (2012). *Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo)*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, 341p.

Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, *2011*, 1–20.

Zhang, H., Cui, B., Xiao, R., & Zhao, H. (2010). Heavy metals in water, soils and plants in riparian wetlands in the Pearl River Estuary, South China. *Procedia Environmental Sciences*, *2* (5), 1344–1354.

ANNEXES

Les annexes du travail comprennent les tableaux et figures ci-après :

- Comparaison de la teneur en Cr dans le sol selon les saisons, dans le bloc maraicher (Tukey)
- Comparaison de la teneur en Se dans le sol selon les saisons, dans le bloc maraicher (Tukey)
- Comparaison de la teneur en Ni dans le sol selon les saisons, dans le bloc maraicher (Tukey)
- Comparaison de la teneur en Cu des échantillons végétaux (Tukey)
- Comparaison de la teneur en Pb des échantillons végétaux (Tukey)
- Comparaison de la teneur en Pb de l'amarante selon les saisons (Tukey)
- Comparaison de la teneur en Cd de l'amarante selon les saisons (Tukey)

Annexe 1 : Comparaison de la teneur en Cr dans le sol selon les saisons, dans le bloc maraicher (Tukey)

Comparaisons de moyennes

Comparaisons pour toutes les paires en utilisant le HSD de Tukey-Kramer

Quantile de confiance

q*	Alpha
2,30598	0,05

Matrice de seuil HSD

Abs(Dif)-HSD

	pluvieuse	sèche
pluvieuse	-0,12725	0,01936
sèche	0,01936	-0,12725

Les valeurs positives montrent des paires de moyennes qui sont significativement différentes.

Annexe 2 : Comparaison de la teneur en Se dans le sol selon les saisons, dans le bloc maraicher (Tukey)

Comparaisons de moyennes

Comparaisons pour toutes les paires en utilisant le HSD de Tukey-Kramer

Quantile de confiance

q*	Alpha
2,30598	0,05

Matrice de seuil HSD

Abs(Dif)-HSD

	pluvieuse	sèche
pluvieuse	-0,15430	0,06224
sèche	0,06224	-0,15430

Les valeurs positives montrent des paires de moyennes qui sont significativement différentes.

Annexe 3 : Comparaison de la teneur en Ni dans le sol selon les saisons, autour du canal (Tukey)

Comparaisons de moyennes

Comparaisons pour toutes les paires en utilisant le HSD de Tukey-Kramer

Quantile de confiance

q*	Alpha
4,30265	0,05

Matrice de seuil HSD

Abs(Dif)-HSD

	sèche	pluvieuse
sèche	-0,15818	0,06517
pluvieuse	0,06517	-0,15818

Les valeurs positives montrent des paires de moyennes qui sont significativement différentes.

Annexe 4 : Comparaison de la teneur en Cu des échantillons végétaux (Tukey)

Matrice de seuil HSD

Abs(Dif)-HSD

	rizière	aire de séchage	bloc maraicher	canal drainage
rizière	-0,19657	0,00504	0,15347	0,22215
aire de séchage	0,00504	-0,22698	-0,07964	-0,00823
bloc maraicher	0,15347	-0,07964	-0,19657	-0,12788
canal drainage	0,22215	-0,00823	-0,12788	-0,27799

Les valeurs positives montrent des paires de moyennes qui sont significativement différentes.

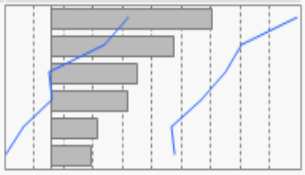
Rapport de connexion de lettres

Niveau			Moyenne
rizière	A		0,49405269
aire de séchage		B	0,27669172
bloc maraicher		B	0,14401987
canal drainage		B	0,03115935

Les niveaux non connectés par la même lettre sont significativement différents.

Rapport des différences ordonnées

Niveau	- Niveau	Différence	Erreur standard de la différence	Limite de contrôle inférieure	Limite de contrôle supérieure	P-value
rizière	canal drainage	0,4628933	0,0771170	0,222149	0,7036377	0,0009*
rizière	bloc maraicher	0,3500328	0,0629658	0,153466	0,5465997	0,0016*
aire de séchage	canal drainage	0,2455324	0,0812885	-0,008234	0,4992992	0,0582
rizière	aire de séchage	0,2173610	0,0680108	0,005044	0,4296775	0,0447*
aire de séchage	bloc maraicher	0,1326718	0,0680108	-0,079645	0,3449884	0,2741
bloc maraicher	canal drainage	0,1128605	0,0771170	-0,127884	0,3536049	0,4952



Annexe 5 : Comparaison de la teneur en Pb des échantillons végétaux (Tukey)

Matrice de seuil HSD

Abs(Dif)-HSD

	bloc maraicher	canal drainage	rizière	aire de séchage
bloc maraicher	-0,45711	-0,18452	0,05147	0,18026
canal drainage	-0,18452	-0,64646	-0,42659	-0,29146
rizière	0,05147	-0,42659	-0,45711	-0,32832
aire de séchage	0,18026	-0,29146	-0,32832	-0,52783

Les valeurs positives montrent des paires de moyennes qui sont significativement différentes.

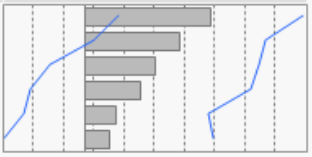
Rapport de connexion de lettres

Niveau			Moyenne
bloc maraicher	A		-0,1178358
canal drainage	A	B	-0,4931602
rizière		B	-0,6264196
aire de séchage		B	-0,7918372

Les niveaux non connectés par la même lettre sont significativement différents.

Rapport des différences ordonnées

Niveau	- Niveau	Différence	Erreur standard de la différence	Limite de contrôle inférieure	Limite de contrôle supérieure	P-value
bloc maraicher	aire de séchage	0,6740014	0,1581586	0,180261	1,167742	0,0093*
bloc maraicher	rizière	0,5085838	0,1464264	0,051469	0,965698	0,0295*
bloc maraicher	canal drainage	0,3753243	0,1793350	-0,184525	0,935173	0,2262
canal drainage	aire de séchage	0,2986771	0,1890357	-0,291455	0,888810	0,4349
rizière	aire de séchage	0,1654176	0,1581586	-0,328323	0,659158	0,7284
canal drainage	rizière	0,1332594	0,1793350	-0,426589	0,693108	0,8773



Annexe 6 : Comparaison de la teneur en Pb de l'amarante selon les saisons (Tukey)

Comparaisons de moyennes

Comparaisons pour toutes les paires en utilisant le HSD de Tukey-Kramer

Quantile de confiance

q*	Alpha
2,20098	0,05

Matrice de seuil HSD

Abs(Dif)-HSD

	sèche	pluvieuse
sèche	-0,49731	0,03262
pluvieuse	0,03262	-0,53716

Les valeurs positives montrent des paires de moyennes qui sont significativement différentes.

Annexe 7 : Comparaison de la teneur en Cd de l'amarante selon les saisons (Tukey)

Comparaisons de moyennes

Comparaisons pour toutes les paires en utilisant le HSD de Tukey-Kramer

Quantile de confiance

q*	Alpha
2,17882	0,05

Matrice de seuil HSD

Abs(Dif)-HSD

	pluvieuse	sèche
pluvieuse	-0,23121	0,07809
sèche	0,07809	-0,23121

Les valeurs positives montrent des paires de moyennes qui sont significativement différentes.

RESUME

Le transfert des éléments traces métalliques (ETM) de l'environnement vers la chaine alimentaire est une source importante d'inquiétude au niveau global. Nous avons abordé cette problématique autour du pool malebo, à Kinshasa (RD Congo), dans le site agricole masina rail 1. Il s'agissait de vérifier l'existence de la pollution en ETM de la rivière N'djili, des sols et des cultures au site masina rail 1 (pool malebo).

Pour ce, des échantillons d'eau, de sol, d'amarante et de grains de riz ont été prélevés en saisons sèche et pluvieuse. L'extraction des ETM a été réalisée grâce à l'eau régale (pour les échantillons de sol et d'eau) ou par minéralisation Nitro-perchlorique. Leur dosage fut réalisé par ICP-MS (pour l'eau et le sol) ou par spectrophométrie d'absorption atomique (pour les échantillons végétaux), en Belgique (laboratoires de Sciences hydriques à Arlon, et d'échanges eau-sol-plantes à Gembloux Agro-Bio Tech). Les données recueillies ont été analysées par le logiciel JMP Pro 13.

Les résultats montrent que les teneurs en ETM dans l'eau, sont soit faibles par rapport aux valeurs seuils (pour Cr et Zn), soit inférieures aux limites de détection de l'ICP-MS (Pb, Cd, Cu, As, Se, Ni, Co). De même, les concentrations en ETM des sols ont toutes été en-dessous des standards.

Par contre, les teneurs en Pb (> 0,3 mg/kg) dans l'amarante excèdent les limites fixées, alors que dans les grains de riz, le seuil n'était dépassé pour aucun ETM analysé. Cela montre que malgré une faible accumulation lente du Pb dans le sol, certains facteurs favoriseraient sa phytodisponibilité pour l'amarante. Il est donc important de les étudier pour limiter la concentration en cet élément dans les légumes, car il est susceptible de réduire la productivité agricole et intoxiquer les consommateurs.

Pour les grains de riz en revanche, des études doivent être menées pour renforcer l'accumulation de Zn, qui est un oligo-élément important pour la nutrition humaine et dont beaucoup de consommateurs à Kinshasa, sont carencés.

Mots clés : pollution, rivière N'djili, pool malebo, site agricole masina rail 1, éléments traces métalliques