UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Impact de l’accumulation en certains métaux lourds (cuivre, zinc et plomb) dans les amarantes irriguées de la ville de Bujumbura

Niyomutoni, Astérie; Sous la direction de : Pr. Dr. Ir Niyukuri Jonathan

2025-08
UB, EANSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2203

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

EAST AFRICAN NUTRITIONAL SCIENCES INSTITUTE (EANSI)

MASTER EN SCIENCES DES ALIMENTS ET NUTRITION

IMPACT DE L'IRRIGATION SUR LA CONCENTRATION EN METAUX LOURDS DES AMARANTES IRRIGUES DE LA VILLE DE BUJUMBURA : cas du CUIVRE, ZINC ET PLOMB.

Par

NIYOMUTONI Astérie

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue d'obtention d'un Diplôme de Master en Sciences des Aliments et Nutrition

Spécialité : Technologie et Qualité des Aliments

Sous la direction de :

Pr. Dr. Ir NIYUKURI Jonathan

Bujumbura, Août 2025

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Président du jury	: Pr. Dr. Ir. NZIGAMASABO Aloys
Secrétaire du jury	: Dr. Ir. KARIKURUBU Jean Félix
Membre	: Pr. Dr. Ir. NIYUKURI Jonathan

DEDICACE

A Dieu tout Puissant ;

A mon regretté Père ;

A ma regretté mère ;

A mes frères et sœurs ;

A toute la promotion de l'EANSI en Master II : 2ème cohorte en Sciences des Aliments et Nutrition ;

A tous ceux qui me sont chers ;

A ceux qui se préoccupent de la qualité des aliments ;

A vous chers lecteurs ;

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour le don de la vie, la santé et la force qu'il m'a accordé afin de mener ce travail à son aboutissement.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, mes sincères remerciements vont au Prof. Dr. Ir. NIYUKURI Jonathan, Directeur de mémoire, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'Université du Burundi pour son appui technique dans la réalisation de cette étude. Mes remerciements s'adressent aussi à la Banque Africaine de Développement (BAD), à travers le gouvernement du Burundi, pour le soutien financier qui a facilité mes études de master.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma famille pour son soutien inconditionnel et ses encouragements constants.

Enfin, je tiens à témoigner ma profonde gratitude à tous mes enseignants, depuis l'école primaire jusqu'à la fin de mon cycle de master, pour leur engagement et leur dévouement à l'éducation. Leur influence a été déterminante dans ma formation. Mes pensées vont également à mes camarades étudiants, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables et enrichissants tout au long de cette aventure académique.

Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail trouvent ici mes sentiments de satisfaction et de reconnaissance.

NIYOMUTONI Astérie

RESUME

Les métaux lourds, tels que le mercure, le chrome, le cadmium, l'arsenic et le plomb, sont des éléments toxiques qui s'accumulent dans la chaîne alimentaire, nuisant aux organismes vivants même à faibles concentrations. Dans la ville de Bujumbura, l'utilisation d'eaux usées pour irriguer les parcelles d'amarante entraîne une contamination, ce qui peut provoquer des maladies chez les consommateurs. L'objectif général de la présente étude est d'évaluer la contamination par les métaux lourds dans les amarantes cultivées à Bujumbura, en analysant les niveaux de concentration de ces contaminants. L'étude a été menée dans quatre zones de la Mairie de Bujumbura telles que Buterere, Buyenzi, Musaga où les cultivateurs des amarantes utilisent des eaux usées pour l'irrigation, et un site témoin au campus de Mutanga utilisant l'eau du robinet. Les métaux lourds analysés incluent Cu, Pb, Zn et. Cette étude souligne l'impact de l'eau d'irrigation dans la contamination des cultures. La collecte des données a été commencée par la préparation des champs témoins dans la serre de campus MUTANGA suivi de la collecte des feuilles d'amarantes dans les quatre zones d'étude y compris site témoin. Des échantillons de 500 g de feuilles d'amarante ont été prélevés en triplicata. L'analyse des éléments minéraux a été effectuée par méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme à l'ISABU et l'analyse des données a été réalisée à l'aide le logiciel SPSS version 2021.

L'analyse physicochimique montre que le niveau des métaux lourd varie selon le site de culture et selon la qualité de l'eau d'irrigation utilisée. Les teneurs variaient de Mutanga en Cu=4,55mg/kg, Pb=9,83mg/kg, Zn=38,96mg/kg respectivement pour le Cu, Pb, Zn pour les échantillons témoins ; 7,42mg/kg, Pb=11,66mg/kg, Zn=67,68mg/kg respectivement pour le Cu, Pb, Zn pour les échantillons en provenance de Buyenzi ; 5,60mg/kg, Pb=11,42mg/kg, Zn=80,91mg/kg respectivement pour le Cu, Pb, Zn pour les échantillons en provenance de Buterere Cu=6,75mg/kg, Pb=14,42mg/kg, Zn=61,00mg/kg respectivement pour le Cu, Pb, Zn pour les échantillons en provenance de Musaga. Ces résultats soulignent l'impact de l'eau d'irrigation sur la contamination par les métaux lourds. Les sites d'échantillonnages présentent une contamination à métaux lourds plus élevées par rapport au site témoin MUTANGA suite à la qualité de l'eau d'irrigation.

Mots clés : Métaux lourds, Amarantes, Eaux usées, Contamination, Santé humaine.

ABSTRACT

Heavy metals, such as mercury, chromium, cadmium, arsenic, and lead, are toxic elements that accumulate in the food chain, harming living organisms even at low concentrations. In the city of Bujumbura, the use of wastewater to irrigate amaranth plots leads to contamination, which can cause illness among consumers. The overall objective of this study is to assess heavy metal contamination in amaranth cultivated in Bujumbura, by analyzing the concentration levels of these contaminants. The study was conducted in four areas of Bujumbura City Hall such as Buterere, Buyenzi, Musaga where amaranth farmers use wastewater for irrigation, and a control site at the Mutanga campus using tap water. The heavy metals analyzed include Cu, Pb, Zn, and Cd. This study highlights the impact of irrigation water on crop contamination. Data collection began with the preparation of control fields in the MUTANGA campus greenhouse, followed by the collection of amaranth leaves in the four study areas, including the control site. Samples of 500 g of amaranth leaves were collected in triplicate. Mineral element analysis was performed using flame atomic absorption spectrophotometry at ISABU, and data analysis was carried out using SPSS version 20 software. Physicochemical analysis shows that heavy metal levels vary depending on the growing site and the quality of the irrigation water used. The levels ranged from Mutanga to Cu=4.55 mg/kg, Pb=9.83 mg/kg, Zn=38.96 mg/kg, and Cd≤0.1 mg/kg, respectively, for Cu, Pb, Zn, and Cd in the control samples; 7.42mg/kg, Pb=11.66mg/kg, Zn=67.68mg/kg, Cd≤0.1mg/kg respectively for Cu, Pb, Zn and Cd for samples from Buyenzi; 5.60mg/kg, Pb=11.42mg/kg, Zn=80.91mg/kg respectively for Cu, Pb, Zn and Cd for samples from Buterere and Cd≤0.1mg/kg and Cu=6.75mg/kg, Pb=14.42mg/kg, Zn=61.00mg/kg and Cd≤0.1mg/kg respectively for Cu, Pb, Zn and Cd for samples from Musaga. These results highlight the impact of irrigation water on heavy metal contamination. The sampling sites exhibited higher levels of heavy metal contamination compared to the MUTANGA control site, due to the quality of the irrigation water.

Keywords: Heavy metals, Amaranth, Wastewater, Contamination, Human health.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACE ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ..... **ix**
LISTE DES FIGURES ..... **x**
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **xi**
AVANT-PROPOS ..... **xii**
CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE **1**
I.1.Contexte et justification de l'étude 1
I.2. Problématique de recherche 3
I.3. Questions de recherches 4
I.4. Hypothèses 4
I.5. Objectif de l'étude 4
I.5.1. Objectif global 4
I.5.2. Objectifs spécifiques 4
PREMIERE PARTIE : REVUE DE LA LITTERATURE **6**
CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES METAUX LOURDS **6**
II. 0. Introduction 6
II.1. Définitions des mots clés 6
II.2. Sources et contamination des métaux lourds aux amarantes 9
II.3. Effets des métaux lourds sur la santé humaine 10
II.4. Classification des métaux lourds 11
II.5. Réglementations sur les métaux lourds dans les légumes à feuilles d'Amaranthus sp. 12
II.6. Qualité de l'eau d'irrigation et impact sur l'agriculture 13
II.7. Les sources anthropiques 13
II.8. Distribution des métaux lourds dans l'environnement 14

II.8.1. Contamination des sols 14
II.8.2. Le processus de transfert 15
II.8.3. Répartition des métaux lourds dans les sols 15
II.9. Phytotoxicité et résilience des plantes aux métaux lourds 16
II.9.1. Contamination des plantes par les métaux lourds 16
II.9.2. Tolérance des plantes 17
II.9.3. Absorption racinaire 17
II.10. EFFETS DES METAUX LOURDS SUR LA SANTE HUMAINE 18
CHAPITRE III : GENERALITES SUR LA CULTURE DES AMARANTES 19
III.0. Introduction 19
III.1. Description Variétale de la marante au Burundi 20
III.2. Fertilisation 21
III.3. Irrigation 21
III.4. La récolte 21
III.5. Composition chimiques des amarantes 22
III.6. Utilisation 22
III.6.1. Alimentation humaine 22
III.6.2. Médecine 22
DEUXIEME PARTIE : EXPERIMENTATION 23
CHAPITRE IV. MATERIEL ET METHODES 23
IV.1. Les matériels. 23
IV.2. Les techniques et les outils de collecte 23
IV.3. La méthode d'échantillonnage 24
IV.4. Analyse physicochimique 25
IV.4.1. Préparation de l'échantillon 25
IV.4.2. Détermination des éléments minéraux 26
IV.4.3. Analyse de l'échantillon 26
CHAPITRE V: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 28
V.1. Teneurs en eau, cuivre et plomb de l'échantillon témoin 29
V.2. Teneurs en eau, Cuivre, Zn et plomb des amarantes récoltées à BUYENZI 30
V.3. Teneurs en eau, Cuivre, Zn et plomb des amarantes récoltées à MUSAGA 31

V.3.1. Teneurs en eau, Cuivre, Zn et plomb des amarantes récoltées à BUTERERE 32
V.3.2. Analyse de la significativité des niveaux de contamination entre les sites.....33
V.3.3. Teneurs en eau.....34
V.3.4. Teneurs en zinc.....34
V.3.5. Teneurs en cuivre 35
V.3.6. Teneurs en Plomb.....35
CHAPITRE VI. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 36
VI.1 CONCLUSION 36
VI.2 RECOMMANDATIONS.....37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....38
ANNEXES.....41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Origines industrielles et agricoles des metaux dans l'environnement 14
Tableau 2 : Concentrations naturelles de certains elements traces dans les sols.....16
Tableau 3 : Materiel utilise au laboratoire physicochimique 25
Tableau 4 : Analyse des teneurs en eau, cuivre et plomb des amarantes recoltes a mutanga dans la serre.....29
Tableau 5 : Analyse des teneurs en eau, cuivre, zn et plomb des amarantes recoltes a buyenzi dans les champs.....31
Tableau 6 : Analyse des teneurs en eau, cuivre et plomb des amarantes recoltes a musaga dans les champs 32
Tableau 7 : Analyse des teneurs en eau, cuivre et plomb des amarantes recoltes a buterere dans les champs 33
Tableau 8 : Test de significativite des parametres analysés.....34

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Production des amarantes pour le temoin a la serre du campus Mutanga 23
Figure 2 : Broyage des feuilles d'amarantes a l'aide d'un broyeur pour avoir une farine.....26

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ANOVA : Analyse de Variance
AOR : Adjusted Odds Ratio
As : Arsenic
AUC : Area Under Curve
BBN : Bureau Burundais de Normalisation
Cd : Cadmium.
Cr : Chrome
EANSI : East African Nutritional Sciences Institute
ETM : Éléments Trace Métalliques
FACAGRO : Faculté des Sciences Agronomiques
FAO : Food and Agriculture Organization
Fe : Fer –
Hg : Mercure
ISABU : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi
LASPA : Laboratoire d'analyse du sol et des produits alimentaires
Mn : Manganèse.
Ni : Nickel
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ONG : Organisation Non Gouvernementale
Pb : Plomb
ROS : Reactive Oxygen Species
SAA : spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme
SPSS : Statistical Package for the Social Sciences
Zn : Zinc

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire rentre dans le cadre de l'obtention du diplôme de master en Sciences des Aliments et Nutrition, Option : Technologie et Qualité des aliments. Nous avons choisi d'explorer un sujet d'actualité et d'une importance cruciale : 'Impacts de l'irrigation sur la concentration en métaux lourds des amarantes irrigues de la ville de Bujumbura : cas du Cuivre, Zinc et Plomb.'

L'irrigation est une pratique agricole essentielle, surtout dans des régions ou les ressources en eau sont limitées. Cependant, elle peut également avoir des conséquences néfastes sur la qualité des cultures, notamment en ce qui concerne l'accumulation de métaux lourds. Les amarantes, en tant que les plantes nutritives et largement consommées dans notre région, sont particulièrement sensibles à ces contaminants. A travers cette étude, nous espérons sensibiliser les agriculteurs et les décideurs sur l'importance de surveiller la qualité de l'eau d'irrigation et d'adopter des pratiques agricoles durables. La sante publique et la sécurité alimentaire dépendent en grande partie de la qualité des aliments que nous consommons, et il est impératif de garantir que nos cultures, en particulier celles riches en nutriments comme les amarantes, restent exemptes de contaminants nocifs.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, notamment nos encadrants, nos collègues et les agriculteurs de la région, dont les expériences et les connaissances ont été précieuses pour notre recherche.

CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE

I.1.Contexte et justification de l'étude

A l'échelle mondiale, l'agriculture est mise au défi de produire d'une manière durable des aliments suffisants, sûrs et sains pour une population mondiale croissante qui atteindra 9,5 milliards en 2050 (Gado, Guero, Dan-badjo, & Zakaria, 2018).

Le transfert des éléments polluants, notamment des métaux lourds, fait partie des problèmes graves de santé publique. La contamination des amarantes par des métaux nlourds, est une préoccupation sociétale majeure. En effet, de plus en plus de cultures sont implantées en milieu périurbain, et de ce fait, peuvent être impactées par des différents facteurs de contaminations en provenance des activités humaines. Cette problématique est à l'échelle mondiale. Les cultures maraichères sont produites dans toutes les régions du pays surtout au Sud ainsi qu'au Burundi, en zone urbaine et périurbaine et dans la vallée de l'Ouémé (Adorgloh-Hessou, 2006 ; Yéhouenou et al., 2013) jouent un rôle important dans l'approvisionnement en légumes des villes en pleine croissance démographique (Atidegla et al., 2011). A l'échelle mondiale, les légumes jouent un rôle primordial dans la plupart des programmes de nutrition, de sécurité alimentaire et de lutte contre la pauvreté. Ces légumes constituent une composante importante des régimes alimentaires quotidiens en Afrique cas d'amarante par exemple au Burundi (Chouti, Adanve, & Mama, 2019).

La contaminations des amarantes par des métaux lourds peuvent être liées à une pollution des sols, ou des eaux utilisées en irrigation (Kalonda et al., 2015) , lorsque l'eau des rivières est utilisée à des fins d'irrigation, il devient un moyen facile de modifier les propriétés physiques et chimiques du sol qui peut présenter un risque potentiel pour les activités agricoles et devenir nocif pour la croissance et le rendement de différentes cultures agricoles, en particulier sur les légumes à feuilles cas d'amarantes (Mohiuddin, Alam, Rahman, Islam, & Ahmed, 2016).

L'amarante est un légume feuille de grande consommation et à haute valeur nutritionnelle (vitamine A, vitamine C, fer, calcium et lysine) (Grubben, 1975 ; Wouyou et al. 2017). L'amarante à feuilles vertes est la variété la plus cultivée et la plus consommée aux différents pays du monde (Amaranthus cruentus) est un légume très apprécié pour ces valeurs nutritionnelles (Mensah et al., 2019).

Les amarantes sont cultivées pendant la saison pluvieuse et la saison sèche en utilisant la technique d'arrosage pour les rendre disponibles en saison sèche. Certains agriculteurs des amarantes irriguent leur champ avec de l'eau provenant de la rivière alors que d'autres utilisent des eaux usées pouvant contenir des éléments indésirables comme métaux lourds. L'étude de la contamination de l'environnement par les rejets Contenant des minéraux lourds a été largement abordée par plusieurs auteurs. Baize (1977) et Akujobi (2012) ont mis en évidence que l'augmentation des concentrations des métaux lourds de contamination est générée essentiellement par l'activité anthropique (Kalonda et al., 2015).

En effet, la présence de ces contaminants provenant de différentes sources (circulation routière, agriculture, industries, eaux usées) dans le sol pose des problèmes de toxicité dès lors que ces polluants migrent et se retrouvent dans la chaîne alimentaire ou entrent en contact avec l'Homme via son alimentation. L'amarante (Amarathus Hybridis) fait partie des nombreuses espèces végétales cultivées dans la vallée de ~~Gounti~~ Yéna polluée. Elles représentent une source de revenus non négligeable aux jardiniers étant donné qu'elles sont largement consommées par la population notamment dans les sauces (Gado et al., 2018).

L'eau d'arrosage que la majorité de la population cultivatrice des amarantes utilise pendant la saison sèche devient contaminée par l'élimination des égouts et des déchets municipaux, médicaux, les graisses de vidage pour les garages l'air et les industries. La plupart de ces effluents contiennent divers métaux dangereux comme l'As, le Cr, le Cd, le Pb, le Ni, le Fe, le Zn, le Mn, le Hg, etc., qui présentent des menaces potentielles pour l'être humain et l'environnement, même à l'état de traces. Les métaux lourds sont très nocifs en raison de leur nature non biodégradable (Mohiuddin et al., 2016).

Des études ont montré que les métaux traces sont l'un des polluants les plus graves dans notre environnement naturel en raison de leur toxicité, de leur persistance dans l'environnement et de leur bioaccumulation. Selon Karen (2005), les métaux lourds dans les eaux naturelles et leurs sédiments correspondants sont devenus un sujet de préoccupation important pour les scientifiques et les ingénieurs dans divers domaines liés à la qualité de l'eau, ainsi qu'une préoccupation du grand public.(Anhwange, Kagbu, Agbaji, & Gimba, 2009).

La consommation de ces légumes riches en métaux constitue un risque de santé publique telle que de violentes coliques, anémie, déficiences intellectuelles, enfants vulnérables (saturnisme). Elle peut aussi provoquer des crampes d'estomac ; des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie (Mensah et al., 2019).

I.2. Problématique de recherche

Les apports agricoles (ordures ménagères, fientes de porc, de volaille, graine de coton et de l'engrais minéral en excès) utilisés pour amender le sol et l'eau servant à l'arrosage des cultures peuvent contenir des métaux et des matières organiques qui peuvent nuire à la santé humaine. Or les métaux sont non biodégradables (Senou et al. 2012).

Par ailleurs, l'utilisation des eaux d'irrigation généralement infectées par des matières fécales et des composts non mûrs fait naître le soupçon que la consommation des cultures maraîchères peut être critique. Des eaux de mauvaise qualité physico-chimique et bactériologique peuvent effectivement favoriser la contamination des cultures maraîchères. Dans ces conditions, la consommation de tels aliments pourrait constituer un risque élevé de santé publique.

Cependant, les éléments traces, en raison des activités anthropiques, peuvent s'accumuler dans l'environnement et devenir toxiques. Parmi ces activités, on retrouve les retombées atmosphériques, l'épandage de boues issues des stations d'épuration, les activités industrielles et urbaines, le trafic routier, ainsi que l'agriculture et l'exploitation minière. Cette toxicité peut entraîner une accumulation des métaux lourds dans le réseau trophique, provoquant potentiellement des dysfonctionnements dans les organismes des animaux et des humains (Baise et Paquereau, 1997).

Les métaux lourds se déposent sur les organes des plantes, tels que les feuilles et les tiges, et peuvent pénétrer dans les stomates sous forme de particules, de composés gazeux (comme le mercure et l'arsenic), ou par dissolution dans les eaux de pluie ou d'irrigation. Une partie de ces dépôts peut être éliminée par lavage, mais une autre proportion est absorbée par les racines via la solution du sol. L'importance de ces deux voies d'exposition varie selon le type de métal lourd, la plante concernée, ainsi que la proximité d'une source de contamination, qu'il s'agisse d'émissions industrielles, urbaines ou de routes (Baise et Paquereau, 1997 ; Mihali et al. 2012).

Dans le cadre de cette étude sur les métaux lourds dans les amarantes cultivées à Bujumbura, il est crucial de comprendre ces mécanismes d'accumulation et d'absorption afin d'évaluer les risques pour la santé humaine et l'environnement.

I.3. Questions de recherches

-Les amarantes cultivées à Bujumbura présentent-elles des niveaux de contamination par des métaux lourds ?

-Quelles sont les concentrations spécifiques de métaux lourds détectées dans les amarantes cultivées à Bujumbura ?

I.4. Hypothèses

H1 : Les amarantes cultivées à Bujumbura présentent des niveaux significatifs de contamination par des métaux lourds en raison des activités anthropiques dans la région, telle que l'utilisation des eaux usées.

H2 : Les concentrations de métaux lourds détectées dans les amarantes cultivées à Bujumbura varient selon les zones de culture, et la qualité de l'eau d'irrigation.

I.5. Objectif de l'étude

I.5.1. Objectif global

L'objectif global de cette étude est d'évaluer la contamination par les métaux lourds dans les amarantes cultivées à Bujumbura, en analysant les niveaux de concentration de ces contaminants afin de fournir des recommandations pour garantir la sécurité alimentaire et la protection de la santé publique.

I.5.2. Objectifs spécifiques

La présente étude sur la contamination des amarantes cultivées à Bujumbura par des métaux lourds, s'avère essentielle. Elle a été menée afin de répondre aux objectifs spécifiques suivants :

1. Déterminer les niveaux de contamination par des métaux lourds des amarantes cultivées dans la ville de Bujumbura ;

2. Analyser les concentrations spécifiques de métaux lourds détectées dans les amarantes cultivées à Bujumbura ;

La raison de cette recherche est d'identifier et de quantifier les métaux lourds dans les amarantes consommées à Bujumbura notamment, cas du plomb, zinc et le cuivre, nuisibles pour la santé humaine, la santé environnementale et la qualité des aliments, afin de proposer des solutions durables pour assurer la sécurité alimentaire en tant que cette sorte de légumes est la plus consommables dans notre pays pendant toutes les saisons.

PREMIERE PARTIE : REVUE DE LA LITTERATURE

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES METAUX LOURDS

II. 0. Introduction

L'étude des métaux lourds revêt une importance croissante dans le contexte de l'agriculture moderne et de la sécurité alimentaire. Les métaux lourds, en raison de leurs propriétés persistantes et de leur toxicité, peuvent contaminer les cultures, notamment les amarantes cultivées à Bujumbura. Ce chapitre vise à explorer les connaissances existantes concernant la contamination des légumes par les métaux lourds. Cette revue de la littérature permet de mieux comprendre les enjeux liés à la présence de métaux lourds dans l'agriculture et d'éclairer les conséquences pour la santé publique.

II.1. Définitions des mots clés

i) Métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments métalliques présentant un poids atomique élevé, tels que le mercure, le chrome, le cadmium, l'arsenic et le plomb. Ils peuvent nuire aux organismes vivants à faibles concentrations et ont tendance à s'accumuler dans la chaîne alimentaire. De même (Jean-Michel Gerin 2018) le terme "métal lourd" n'a pas de définition scientifique précise, mais est généralement associé à des éléments métalliques ayant une masse volumique supérieure à 5 g/cm³. Certains métaux, comme le cadmium, le mercure et le plomb, sont spécifiquement suivis en raison de leur toxicité (Michel Gerin 2018). De plus, ils englobent l'ensemble des métaux et métalloïdes présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement. Les métaux lourds les plus souvent considérés comme toxique pour l'homme sont : le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. D'autres comme le cuivre, le zinc, le chrome, pourtant nécessaires à l'organisme en petites quantités, peuvent devenir toxiques à doses plus importantes (Clemens et al. 2006).Les métaux qui sont au moins 5 fois plus denses que l'eau sont également définis comme métaux lourds (Abdallaoui, 2014).Les métaux pour lesquels des mesures de contrôle et de réduction des émissions dans l'ensemble des compartiments air, eau, sols ont été mises en place aux niveaux international, européen et national, regroupent un ensemble de composés métalliques reconnus pour leurs effets toxiques (Gado et al., 2018).

Dans le cadre de la chimie, les métaux lourds sont généralement définis sur la base de leurs propriétés physico-chimiques. En science du sol, il est convenu de parler "d'éléments trace métalliques" qui désignent des composés minéraux présents à très faible concentration. En toxicologie, ils peuvent être définis comme des métaux à caractère cumulatif ayant essentiellement des effets très néfastes sur les organismes vivants (Rizert, Chartentier, 2000). En nutrition et en agronomie, ils peuvent même être assimilés à des oligo-éléments indispensables à certains organismes, en particulier par leur action catalytique au niveau du métabolisme (Guignard, 2011). Les métaux sont naturellement présents dans la croute terrestre. Ce sont des éléments métalliques naturels, de densité supérieure à 5 g/cm3 et tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du sodium (Z=11). Ils sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais généralement à l'état de traces. Les éléments naturellement présents dans les sols dont certains sont indispensables aux plantes, font partie des oligo-éléments et des éléments Traces. On utilise également l'expression métaux lourds, qui correspond à une définition physique (masse volumique supérieure à 5 g/cm3) ou bien oligoéléments. Les éléments tracent les plus connus pour leur dangerosité sont le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn). (Kalonda et al., 2015)

Le cadmium, le mercure et le plomb n'ont pas de telles fonctions et sont toxiques à très faibles doses. Au-delà d'une certaine concentration, la plupart des métaux deviennent toxiques. Certains métaux peuvent être cancérigènes (arsenic par exemple) et dégrader les systèmes immunitaires et reproductifs (mercure par exemple). Il est à noter que les impacts santé sont différents selon la forme chimique sous laquelle le métal se retrouve dans l'environnement. L'impact dépend de leurs concentrations, de leur biodisponibilité et de leur capacité à entrer dans la chaîne alimentaire (Gado et al., 2018).Les métaux lourds dans la biosphère sont largement étudiés pour leur persistance, leur toxicité et leur accumulation dans l'environnement, les organismes et la santé humaine. L'accumulation excessive de métaux lourds dans les sols agricoles peut entraîner une absorption élevée de métaux lourds par les cultures, ce qui peut affecter la qualité et la sécurité alimentaires

A l'état de traces, ils sont nécessaires voire indispensables aux êtres vivants. A concentration élevée, en revanche, ils présentent une toxicité plus ou moins forte. La présence de métaux lourds dans l'environnement résulte de causes naturelles et des activités humaines. Elle pose un problème particulier, car les métaux lourds s'accumulent et ils ne sont pas biodégradables dans l'environnement. Ces métaux lourds ne présentent pas tous les mêmes risques en raison de leurs

effets sur les organismes, leurs propriétés chimiques, physico-chimiques et biologiques. Leur toxicité est très variable et leur impact sur l'environnement très différent (Guignard, 2011).

Les métaux sont des polluants particulièrement toxiques pour la santé humaine. L'analyse des légumes feuilles a prouvé que selon les normes du Codex Alimentarius, ces légumes sont fortement contaminés en plomb et en zinc et constituent un risque de santé publique.

La consommation de ces légumes riches en métaux constitue un risque de santé publique telle que de violentes coliques, anémie, déficiences intellectuelles, enfants vulnérables (saturnisme) (FAO, 1999). Elle peut aussi provoquer des crampes d'estomac ; des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie.(Mensah et al., 2019).

ii) Amarantes

Les amarantes, appartenant à la famille des Amaranthaceae, sont reconnues pour leurs feuilles comestibles et leurs graines nutritives. Selon Duke (1983) dans son ouvrage Handbook of Edible Weeds, ces plantes sont valorisées pour leur apport nutritionnel et leur utilisation dans diverses cuisines à travers le monde.

Food and Agriculture Organization (FAO, 1999) souligne également l'importance des amarantes en tant que cultures vivrières essentielles dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales. Dans leur rapport sur les cultures sous-utilisées, la FAO met en avant leur rôle crucial pour la sécurité alimentaire et la nutrition dans les zones rurales.

De plus, Norton et al. (2010) notent que les amarantes sont des plantes polyvalentes, appréciées tant pour leurs feuilles que pour leurs graines, qui sont riches en protéines, vitamines et minéraux. Ces auteurs soulignent également la résistance des amarantes aux conditions climatiques difficiles.

Enfin, Kauffman et al. (2011) mettent en évidence que les amarantes sont des plantes à croissance rapide, capables de s'adapter à divers types de sols. Leur culture est souvent encouragée en raison de leurs qualités nutritives et de leur potentiel économique.

iii) Santé humaine

Selon l'Organisation mondiale de la santé (WHO, 2020), la santé humaine est décrite comme un état de bien-être complet, physique, mental et social, dépassant l'idée d'une simple absence de maladie ou d'infirmité. Cette définition met en lumière l'importance d'une alimentation saine et

d'un environnement libre de contaminants, tels que les métaux lourds, qui peuvent nuire à la santé des populations.

Dans ce contexte, Baker et al. (2019) soulignent que l'exposition aux métaux lourds, même à faibles concentrations, peut entraîner des effets néfastes sur la santé humaine, y compris des troubles neurologiques, des maladies rénales et des cancers. Ils insistent sur la nécessité de surveiller les niveaux de contamination dans les cultures alimentaires pour protéger la santé publique.

De plus, Zhang et al. (2021) mettent en avant que la consommation de plantes contaminées par des métaux lourds, comme les amarantes, peut avoir des conséquences graves sur la santé, en particulier pour les populations vulnérables, telles que les enfants et les femmes enceintes.

Enfin, Kumar et al. (2022) abordent le lien entre la contamination des cultures par des métaux lourds et les problèmes de santé publique dans leur revue sur la sécurité alimentaire. Ils appellent à des stratégies de gestion pour réduire l'exposition aux contaminants et protéger la santé des consommateurs. Ensemble, ces contributions soulignent l'importance cruciale de la santé humaine dans le contexte de l'exposition aux métaux lourds à travers la consommation d'aliments cultivés dans des environnements contaminés.

II.2. Sources et contamination des métaux lourds aux amarantes

Avec l'augmentation de la pression anthropique sur les milieux de culture, les problèmes de contamination des amarantes en métaux lourds se font de plus cruciaux. La présence de ces contaminants provenant de différentes sources telle que : (circulation routière, agriculture, industries, eaux usées) dans le sol pose des problèmes de toxicité dès lors que ces polluants migrent et se retrouvent dans la chaîne alimentaire ou entrent en contact avec l'Homme via son alimentation (Martin-Garin et al, 2004). Ils contaminent les sols et les eaux souterraines qui, plus tard, auront une incidence sur la santé humaine (Krishna et Govil, 2007).

Les métaux toxiques, dans une large mesure, sont dispersés dans l'environnement par les effluents industriels, les déchets organiques, la combustion des déchets, le transport et la production d'électricité (Rizert, Chartentier, 2000). Ils peuvent être transportés à des endroits éloignés des sources par le vent, selon qu'ils sont sous forme gazeuse ou sous forme de particules (Rizert, Chartentier, 2000). Les polluants métalliques sont finalement emportés de l'air vers la terre ou la surface des voies d'eau (Rizert, Chartentier, 2000). Ainsi l'air est aussi une voie pour la pollution

de l'environnement (Rizert, Chartentier, 2000). Les effluents industriels métalliques constituent une source majeure de pollution métallique de l'hydrosphère.(Guignard, 2011). Plusieurs métaux lourds, tels que le plomb, le cadmium et le mercure, se retrouvent dans l'environnement principalement en raison des activités humaines (Rizert, Chartentier, 2000). Cette pollution peut entraîner une exposition des animaux à des concentrations élevées de ces substances nocives (Kalay et Canh, 2000).

Les métaux lourds s'accumulent dans les organismes vivants, affectant leur santé et leur fonctionnement. Cette accumulation peut avoir des conséquences directes, notamment des troubles neurologiques, des déficiences immunitaires et des problèmes de reproduction. De plus, les métaux lourds peuvent être transférés aux produits d'origine animale, tels que le lait, la viande, les œufs et même le miel, compromettant ainsi la sécurité alimentaire (Oued, 2022).

L'absorption de ces métaux lourds par les animaux peut également perturber les chaînes alimentaires, impactant les prédateurs et, finalement, les humains qui consomment ces produits.

Par conséquent, la surveillance des niveaux de contamination des aliments d'origine animale est essentielle pour protéger la santé publique. Des efforts doivent être entrepris pour réduire les sources de pollution et minimiser l'exposition des animaux à ces métaux toxiques(Oued, 2022)

II.3. Effets des métaux lourds sur la santé humaine

En général, les humains peuvent être exposés aux métaux lourds par ingestion (via l'alimentation ou l'eau) ou inhalation (par la respiration). Travailler ou résider à proximité d'un site industriel utilisant ces métaux contribue également à cette exposition(Fang, 2016).

La consommation de légumes contaminés par des métaux toxiques peut entraîner leur accumulation dans les reins et le foie, provoquant ainsi diverses maladies (Mata et al. 2020). Parmi celles-ci figurent le cancer, l'anémie, ainsi que des affections cardiovasculaires, rénales et pulmonaires. De plus, l'exposition peut déstabiliser le système nerveux et entraîner des problèmes d'infertilité masculine (FAO/WHO, 2003 ; 2004; Ngweme et al. 2021a ; 2021b).

Il est donc crucial et fortement recommandé de privilégier la consommation de légumes non contaminés par des polluants organiques et inorganiques, tels que les métaux toxiques, afin de réduire les risques pour la santé humaine (Mensah et al., 2019).

II.4. Classification des métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments métalliques caractérisés par leur densité élevée et leur toxicité potentielle pour les organismes vivants, y compris les humains. Voici les principales composantes et caractéristiques des métaux lourds :

- ✓ Le plomb (Pb) est physiologique et neurologique toxique pour les humains. L'empoisonnement aigu au Pb peut entrainer le dysfonctionnement du rein, du système reproducteur, du foie et le cerveau entraînant la maladie et la mort (Mudgal et al., 2010).
- ✓ Mercure : L'exposition au mercure peut avoir des effets nocifs sur le système diovasculaire automobile, Cloques dans le haut du tube digestif tractus, vomissements, douleurs abdominales, constipation et gastrite. Toxicité rénale des formes organiques exprimées par glomérulonéphrite avec protéinurie (glomérulaire et tubulaire) et syndrome néphritique (Mudgal et al., 2010).
- ✓ Le Cadmium : Le cadmium s'accumule dans le corps humain affectant négativement plusieurs organes : foie, rein,poumon, os, placenta, cerveau et système nerveux central (Castro-González et MéndezArmenta, 2008 ; Parui et al., 2023). Le cadmium est un toxique cumulatif et cancérigène qui affecte les reins, génère divers effets toxiques dans le corps, perturbe le métabolisme osseux et déforme également l'appareil reproducteur comme système endocrinien (Mudgal, Madaan, Mudgal, Singh, & Mishra, 2010).
- ✓ L'arsenic est un métal lourd hautement toxique avec divers impacts sur la santé humaine. La gestion de son exposition est cruciale pour protéger la santé publique et l'environnement.
- ✓ Le cuivre (Cu) est un oligo-élément essentiel. Avec le plomb, mercure, cadmium, etc. il est classé comme un membre du groupe des métaux lourds. Carence en cuivre et inversement présence de quantités excessives dans le corps dans les deux situations sont préjudiciables à la santé humaine. La Toxicité aiguë du cuivre prédispose à diverses conditions pathologiques et peut causer décès dans les cas graves. L'exposition chronique au cuivre produit hépatotoxicité et problèmes neurologiques (Mudgal et al., 2010) :
- ✓ L'aluminium (Al) est un métal léger et résistant, classé parmi les éléments du groupe 13 du tableau périodique. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2021), il est largement utilisé dans diverses industries, notamment l'emballage, l'architecture et l'automobile, en raison de ses propriétés physiques avantageuses. Cependant, une exposition prolongée à l'aluminium

peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine, notamment des troubles neurologiques et des maladies osseuses (Exley, 2018).

- ✓ Le manganèse (Mn) est un élément chimique essentiel, classé parmi les métaux de transition du tableau périodique. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2021), le manganèse est nécessaire à divers processus biologiques, notamment la formation des os et le métabolisme des acides aminés, des cholestérols et des glucides.

II.5. Réglementations sur les métaux lourds dans les légumes à feuilles d'Amaranthus sp.

Amaranthus sp possède une valeur calorifique significative dans les graines et contient des niveaux importants de minéraux tels que le cuivre, le fer, le phosphore, le zinc, le manganèse, le magnésium et la vitamine C dans les feuilles (Sadeghi, 2010). Ces plantes sont principalement cultivées en maraîchage périurbain dans des conditions tropicales, notamment dans les pays d'Asie du Sud et d'Afrique subsaharienne, sur des terrains potentiellement contaminés par des métaux lourds (Sadeghi, 2010).

Une étude menée sur la réglementation des métaux lourds, a démontré quel'exception du cuivre (Cu), les métaux toxiques tels que le chrome (Cr), le cobalt (Co), le zinc (Zn), l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le plomb (Pb) et le mercure (Hg) présentent des valeurs plusieurs fois supérieures aux normes de sécurité pour la consommation humaine établies par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Ces niveaux élevés de métaux toxiques dans les légumes à feuilles pourraient avoir un impact potentiel sur la santé humaine sur la consommation régulière. L'accumulation de métaux toxiques pourrait être due à l'utilisation d'eau d'irrigation contaminée, de produits chimiques utilisés pour combattre et prévenir les maladies des légumes, ainsi que des émissions de véhicules et de motocyclettes autour des champs (Georgette, 2017).

La valeur limite est de 0,2 mg/Kg cas du cadmium, Concernant le Plomb (Pb), les valeurs normales sont reparties de 0,30 mg/Kg pour les légumineuses (Feuilles de manioc et Amarante), Pour le Cuivre (Cu), la valeur limite acceptable est fixée à 100 mg/Kg, (Kalonda et al., 2015). Les limites permissives maximales de l'OMS/FAO (Cd - 0,2, Cr - 1,3, Fe - 425 mg/kg).

II.6. Qualité de l'eau d'irrigation et impact sur l'agriculture

La pénurie d'eau constitue une contrainte majeure pour le développement durable de l'agriculture, essentielle pour répondre aux besoins alimentaires d'une population en rapide croissance. La qualité des eaux d'irrigation varie, ce qui rend crucial l'évaluation de leur qualité (Singh & Su, 2022). Des contaminants tels que l'arsenic peuvent migrer de la phase solide vers les eaux souterraines. De plus, la réutilisation des eaux usées, ainsi que la présence de pesticides, de produits pharmaceutiques et d'autres contaminants émergents, pose un risque pour la qualité de l'eau utilisée en irrigation. Dans les pays en développement, environ 80 à 90 % des eaux usées restent non traitées, aggravant ainsi la situation. L'utilisation d'eaux municipales, industrielles ou agricoles polluées pour l'irrigation altère significativement la qualité du sol, augmente les niveaux d'oligo-éléments dans le sol et les plantes, et constitue une source de divers pathogènes nuisant à la sécurité alimentaire (Singh & Su, 2022). Les principales sources de contamination de l'eau par des métaux lourds incluent les eaux usées domestiques et industrielles, la production agricole, les polluants atmosphériques, et les anciennes décharges (Guignard, 2011). L'analyse des métaux lourds dans l'eau d'irrigation et dans les amarantes consommées à Bujumbura est cruciale pour identifier et atténuer les risques potentiels pour la santé humaine, l'environnement et l'agriculture.

II.7. Les sources anthropiques

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait, des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes. Les sources anthropiques sont les suivantes:

- Activités pétrochimiques
- Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment…)
- Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations)
- Incinération de déchets
- Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles

Tableau 1 : Origines industrielles et agricoles des métaux dans l'environnement (Guouas et al. 2002)

Utilisations	**Métaux**
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

II.8. Distribution des métaux lourds dans l'environnement

II.8.1. Contamination des sols

Tous les sols contiennent naturellement des éléments traces métalliques. La contamination d'un sol est définie par une teneur en éléments traces qui dépasse la concentration naturelle, sans toutefois altérer la qualité du sol (Alloway, 1995). La concentration naturelle d'un élément trace dans le sol provient de son évolution à partir de la roche d'origine. On parle de pollution des sols lorsque la

présence d'un élément trace atteint des niveaux pouvant menacer l'activité biologique ou les fonctions du sol.

Les contaminations diffuses, qui touchent les couches superficielles des sols, peuvent résulter de phénomènes naturels comme les retombées atmosphériques d'aérosols volcaniques, ainsi que d'activités humaines, qu'elles soient intentionnelles ou non. Cela inclut les poussières et dépôts atmosphériques, l'utilisation de fertilisants minéraux (comme le cuivre présent dans les phosphates), les pesticides, les lisiers et fumiers, les boues issues des stations d'épuration, les activités minières, les déchets industriels ou urbains, ainsi que le transport (Guassart et al. 2001).

II.8.2. Le processus de transfert

Les précipitations et l'irrigation constituent les principales sources d'eau pour les sols. Une partie de cette eau est évacuée par évaporation ou ruissellement de surface, tandis qu'une autre pénètre dans le sol, se dirigeant vers les racines des plantes ou, par gravité, vers les horizons profonds et les nappes phréatiques. Au cours de ce processus, l'eau se charge en éléments traces dissous (Catherine et al. 1997).

II.8.3. Répartition des métaux lourds dans les sols

L'analyse de la répartition d'un élément trace métallique parmi les composants solides du sol est appelée spéciation, qui est généralement réalisée par une technique nommée « extraction séquentielle ». La solubilité du métal est la variable clé déterminant cette répartition :

Si le métal est soluble, il peut migrer vers les nappes phréatiques ou être absorbé par les plantes.

S'il est insoluble, il reste dans le sol. La solubilité dépend de plusieurs facteurs, dont l'acidité du sol est le plus déterminant :

Un sol acide favorise la mobilisation des métaux lourds, qui ne s'accumulent pas et peuvent être transférés vers les nappes phréatiques ou les rivières, ou absorbés par les plantes, ce qui présente un risque pour la santé.

Un sol calcaire immobilise certains métaux, bien que certains éléments, comme l'arsenic, soient plus mobiles dans ce type de sol. Cela ne pose pas de risque immédiat pour la santé, mais le sol est durablement contaminé, et la concentration en métaux lourds peut augmenter avec le temps. Ces métaux peuvent être rélargis si l'environnement change.

Les risques associés aux sols varient, notamment en ce qui concerne le transfert vers les nappes phréatiques, la biodisponibilité et l'écotoxicité, et dépendent principalement de la spéciation, qui inclut le degré d'oxydation et le mode de complexation avec les macromolécules organiques et les constituants minéraux du sol (Conseil National Économique et Social, 2000).

Tableau 2 : Concentrations naturelles de certains éléments traces dans les sols (faurie et al. 2003)

Métaux Lourds	Valeurs Extrêmes dans les Roches (mg/kg)	Apports Anthropiques (mg/kg)
Cadmium (Cd)	2 - 4 – 5	0.2 – 46
Cobalt (Co)	3 – 2	23 - 100 – 200
Chrome (Cr)	1 – 2	100 - 200 - 1500 – 3000
Cuivre (Cu)	3 - 4 – 5	45 - 70 - 80 – 150
Nickel (Ni)	3	80 – 2000
Plomb (Pb)	1 - 2 - 3 - 4 - 5 – 6	13 - 16 – 30
Zinc (Zn)	3 - 4 - 5 – 6	70 - 132 – 12

II.9. Phytotoxicité et résilience des plantes aux métaux lourds

II.9.1. Contamination des plantes par les métaux lourds

Les plantes peuvent être contaminées par des éléments traces métalliques (ETM) par plusieurs voies :

- ✓ Transfert sol/plante : absorption par les racines.
- ✓ Transfert air/plante : dépôt de particules sur les parties aériennes.
- ✓ Éclaboussures : projections de sols contaminés sur les parties aériennes lors de pluies.

Le premier impact des métaux lourds sur les plantes est une inhibition de la croissance, souvent accompagnée de divers signes de dysfonctionnement, tels que la chlorose foliaire, des lésions nécrotiques importantes, le jaunissement progressif, ainsi que le repliement ou le dessèchement des

feuilles. Les bases moléculaires de ces perturbations résultent généralement d'un stress oxydatif causé par la production d'espèces réactives de l'oxygène, communément appelées « Reactive Oxygen Species » (ROS) (Devi et Prasad, 1999 ; Dietz et al. 1999).

II.9.2. Tolérance des plantes

La tolérance aux métaux lourds désigne la capacité d'une plante à survivre et à se reproduire sur des sols contaminés ou dans des conditions défavorables dues à la contamination métallique (Macnair et al. 2000). Chez les plantes supérieures, le terme « résistance » fait référence à la manière dont une plante réagit face au stress métallique pour assurer sa survie et sa descendance. Deux stratégies principales sont impliquées dans cette résistance :

- ✓ Stratégie d'évitement : les plantes limitent leur absorption pour se protéger du stress métallique.
- ✓ Stratégie de tolérance : les réactions internes permettent de réduire les effets nocifs des métaux sur l'organisme.

II.9.3. Absorption racinaire

Suivant le végétal et l'élément, le prélèvement peut être localisé soit au niveau de la région racinaire apicale, soit sur toute la surface racinaire, une partie des éléments arrivant à la racine est adsorbée sur les parois, au niveau de l'épiderme et ne pénètre pas directement dans les cellules. (Chaignon et al, 2001). La voie principale d'absorption des ETM se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme (voie apoplastique). Le transport se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de concentration) par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines. Cependant, une partie des ions peut être adsorbés par les charges négatives de surface de l'acide polygalacturonique des pectines (Briat et Lebrun, 1999). On considère de nos jours que le plomb et le nickel sont absorbés passivement via certaines protéines du type porine (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). Par ailleurs, certains cations toxiques (Cd, Pb ou Cr) sont des compétiteurs potentiels vis-à-vis des cations essentiels. Par exemple, le cadmium semble être un compétiteur connu du calcium en empruntant les canaux calciques membranaires (Greger et al. 1999 ; Sanita di Toppi and Gabbrielli, 1999) et 70% du Cd entrerait dans la racine par ce biais-là et une partie des métaux apoplastiques peut donc rejoindre la voie symplastique puis le xylème par les plasmodermes (Greger et al. 1999). II.1.5.4. Translocation Après leur absorption, le transport des éléments dans le xylème de la plante vers les parties aériennes, appelé « translocation », peut nécessiter ou non la prise en charge des éléments

par des agents complexants, tels que les acides organiques, les acides aminés et divers peptides (Alloway et al., 1997); ainsi, une partie du nickel est chélaté par un acide polyamino-poly carboxylique (Foy et al., 1978); le cadmium peut même être transporté sous forme libre (Greger et al., 1999).

II.10. Effets des métaux lourds sur la santé humaine

En général, les humains peuvent être exposés aux métaux lourds par ingestion (via l'alimentation ou l'eau) ou inhalation (par la respiration). Travailler ou résider à proximité d'un site industriel utilisant ces métaux contribue également à cette exposition (Fang, 2016).

La consommation de légumes contaminés par des métaux toxiques peut entraîner leur accumulation dans les reins et le foie, provoquant ainsi diverses maladies. Parmi celles-ci figurent le cancer, l'anémie, ainsi que des affections cardiovasculaires, rénales et pulmonaires. De plus, l'exposition peut déstabiliser le système nerveux et entraîner des problèmes d'infertilité masculine (FAO/WHO, 2003 ; 2004 ; Mata et al. 2020 ; Ngweme et al. 2021a ; 2021b).

Il est donc crucial et fortement recommandé de privilégier la consommation de légumes non contaminés par des polluants organiques et inorganiques, tels que les métaux toxiques, afin de réduire les risques pour la santé humaine (Mensah et al., 2019).

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LA CULTURE DES AMARANTES

III.0. Introduction

Amaranthus spp, plantes qui a des familles des Amaranthaceae, originaires des régions tempérées et tropicales. Plantes herbacées annuelles cultivées comme plantes potagères. L'espèce la plus cultivée dans le monde (Amaranthus cruentus L.), a une croissance rapide avec de larges feuilles. L'amarante fait partie des cinq premiers légumes feuilles cultivés et consommés au Bénin. Elle est cultivée sur les sites maraîchers en milieu urbain et péri-urbain de manière intensive. Les amarantes constituent une importante source d' éléments nutritifs : protéines, glucides, lipides ; vitamines : A, B et C ; minéraux : calcium, potassium, phosphore, fer, zinc, Magnésium (Legba et al., 2021).

L'Amarante (Amaranthus spp.), une espèce originaire des régions tempérées, tropicales et subtropicales du globe appartient à la grande famille des Amarantacées. Le genre Amaranthus comprend au moins 17 espèces à feuilles comestibles et trois espèces cultivées pour leurs graines. Bien que plusieurs espèces soient souvent considérées comme des espèces sauvages, les amarantes (plantes herbacées annuelles) sont cultivées comme plante potagère toute l'année. Les amarantes sont parmi les légumes-feuilles les plus importants en Afrique. Il s'agit d'une culture à croissance rapide qui pousse facilement sur de nombreux types de sols et dans une large gamme de conditions climatiques. Les températures idéales pour la culture de l'amarante se situent entre 25 et 30°C. Les amarantes peuvent être cultivées jusqu'à 1500 mètres d'altitude.

Différents types d'amarante sont cultivés comme le type indien (Tampala spinach, A. tricolor), le type africain (A. hybridus) et le type antillais (A. viridis L., A. dubius Mart.). L'amarante africaine a de grandes feuilles lisses et des inflorescences ramifiées vertes ou rouges. Les graines sont très petites. Les amarantes se distinguent les unes des autres par la couleur des tiges et des feuilles. Ainsi, on retrouve des amarantes à feuilles et tiges rouges, à feuilles et tiges vertes (forme la plus cultivée) puis enfin à feuilles vertes et tiges rouges.(GOOD, 2015)

Les feuilles sont consommées cuites. Elles sont utilisées comme ingrédient pour préparer des sauces. Au Niger, l'amarante n'est jamais préparée seule pour faire une sauce. Elle est le plus souvent associée avec la courge, l'oseille et la pâte d'arachide ou elle peut être préparée avec des graines d'agoussi (coloquinte - Citrullus colocynthis), la pâte d'arachide et l'huile de palme (rouge).

L'amarante est un légume très apprécié pour sa valeur nutritive élevée par rapport aux légumes exotiques. Les feuilles d'amarante sont riches en protéines, en acides aminés essentiels et en minéraux comme le calcium, le magnésium, le fer, le phosphore et le potassium. Elles contiennent également des quantités élevées de vitamines A, C et B. L'amarante est également une bonne source de composés antioxydants. L'amarante est une plante à croissance rapide. Tout comme la laitue, l'amarante est appréciée par les producteurs compte tenu de son cycle court (récolte 20 à 25 jours après semis) et un apport régulier de revenu.

L'amarante résiste à la sécheresse et à la chaleur. Sa tolérance aux différentes conditions climatiques et son cycle de production court font de l'amarante un légume d'une grande importance économique.("Fiche technique Pratiques des producteurs pour la culture de l ' amarante," 2023)

Dans le souci d'augmenter la production agricole, la loi n° 1/08 du 23 Avril 2012 portant organisation du secteur semencier prévoit en son article 13 un Catalogue National des Espèces et Variétés dans lequel sont inscrites les espèces et variétés agricoles exploitées au Burundi. Celui-ci permet d'éviter qu'une variété ait des appellations différentes et protège l'utilisateur. Ce dernier est ainsi assuré de l'identité de la semence qu'il achète (Pérez Dávila, 2020).

III.1. Description Variétale de la marante au Burundi

Nom botanique : Amaranthus. L

Nom commun : Amarante

Nom de la variété : Makamba

Type variétal : population composite

Nom en kirundi : Makamba

Centre d'origine: (local Burundi)

Code d'origine: Makamba

Obtenteur : ISABU

Mainteneur : ISABU

Année de diffusion : 2012

Date d'inscription de la variété : 17/12/2015

N° d'enregistrement : 73

Service qui a effectué l'examen : DHVRS/ONCCS

Station et lieux d'examen : Gihanga (Imbo-Centre)

Période d'examen : Du 03 décembre 2014 au 3 mars 2015

Zone de culture : 800 à 2300 m d'altitude

Rendement potentiel : 20 à 30 T/ha

Cycle végétatif : 30jours(Pérez Dávila, 2020)

Il y a une autre variété d'amarante à l'ISABU appelle MADIRA1 mais sur le marché on rencontre la première variété MAKAMBA plus abondante.

III.2. Fertilisation

L'amarante est grande consommatrice de minéraux. Elle répond bien à des doses élevées d'engrais organiques. En cas de coupe, les producteurs apportent du compost ou du fumier, plus rarement de l'urée après chaque coupe. Un compost à base de fiente de volaille permet un apport plus important d'azote qui stimule le développement végétatif et retarde la floraison (1kg/m^2 après chaque coupe).("Fiche technique Pratiques des producteurs pour la culture de l ' amarante," 2023)

III.3. Irrigation

Un déficit en eau provoque une floraison précoce, ce qui réduit le rendement et la qualité commerciale. Les producteurs de Niamey arrosent une fois par jour en saison sèche froide et deux fois par jour, matin et soir, en saison chaude("Fiche technique Pratiques des producteurs pour la culture de l ' amarante," 2023)

III.4. La récolte

La production de l'amarante peut s'étaler en moyenne sur quatre (04) mois lorsque l'entretien est bien assuré et en fonction de la variété : La première récolte des feuilles survient généralement trois à quatre (3 à 4) semaines après le repiquage et est faite à 10-15 cm du collet de la plante. Il est souvent conseillé de ne pas arroser les 48 heures qui suivent une coupe afin de permettre la cicatrisation de la blessure occasionnée par la coupe. En fonction des variétés et de l'entretien, on peut effectuer jusqu'à 5 coupes (GOOD, 2015).

III.5. Composition chimiques des amarantes

L'amarante a deux types morphologiques décrits comme des formes rouges et vertes. Des études antérieures ont caractérisé de manière approfondie l'amarante de forme rouge en ce qui concerne ses propriétés morphologiques et chimiques, notamment l'activité antioxydante, la teneur en minéraux et la composition immédiate. Cependant, il existe peu d'informations sur l'amarante de forme verte. Par conséquent, la présente étude a évalué 12 génotypes de forme verte pour leur composition immédiate, leur activité antioxydante, leurs pigments antioxydants et leurs minéraux.

L'amarante de forme verte s'est avérée contenir des glucides, des fibres alimentaires et des protéines en abondance. Il a trouvé des niveaux notables de minéraux inorganiques, notamment du potassium, du calcium, du magnésium, du fer, du manganèse, du cuivre et du zinc. On a également quantifié les antioxydants, notamment les composés phénoliques totaux, les équivalents totaux des favonoïdes et la vitamine C, ainsi que les pigments antioxydants que sont les caroténoïdes, les chlorophylles et les bétalaïnes. Ces données ont indiqué que quatre génotypes de forme verte pouvaient être considérés comme enrichis en termes de profils antioxydants. L'amarante de forme verte pourrait être une source potentielle de composants nutritionnels et de composés photochimiques antioxydants dans l'alimentation humaine, offrant ainsi la possibilité de remédier aux carences en nutriments minéraux et de fournir un aliment riche en antioxydants (Sarker, Hossain, & Oba, 2020).

III.6. Utilisation

III.6.1. Alimentation humaine

La consommation des feuilles d'amarantes en sauce légumes est très recommandée aux enfants, aux femmes allaitantes et aux personnes souffrantes de la malnutrition (Legba et al., 2021).

III.6.2. Médecine

Les amarantes interviennent dans le traitement du cancer du côlon, l'hémorragie, l'anémie, l'obésité, les maladies cardiovasculaires, la régulation de la pression artérielle et le taux de cholestérol dans le sang, la constipation, la diarrhée, l'insuffisance rénale chronique et les douleurs musculaires. Ses racines broyées, mélangées au miel est très laxatif pour les enfants. Les cendres des tiges sont utilisées pour le pansement des plaies (Legba et al., 2021).

DEUXIEME PARTIE : EXPERIMENTATION

CHAPITRE IV. MATERIEL ET METHODES

IV.1. Les matériels.

a) Matériel Biologique

Un échantillon témoin a été cultivé avec des grains d'amarante dans des pots situés dans la serre du campus Mutanga. L'arrosage des amarantes a été effectué quotidiennement pendant une période de deux mois, jusqu'à la récolte, à l'aide d'un arrosoir.

Pour cet échantillon témoin, nous avons utilisé de l'eau du robinet fournie par la Regideso. En revanche, les autres échantillons ont été irrigués avec des eaux usées provenant des caniveaux, ainsi qu'avec des eaux stagnantes situées à proximité de leurs champs, notamment dans les zones de Buterere, Musaga et Buyenzi.



Figure 1 : Production des amarantes pour le témoin à la serre du campus Mutanga

IV.2. Les techniques et les outils de collecte

L'échantillonnage des feuilles d'amarante dans les champs a été réalisé entre août 2023 et avril 2024. Pour chaque site, des échantillons ont été prélevés en triplicata auprès de quatre cultivateurs sélectionnés au hasard dans la même zone. Chaque échantillon était constitué d'environ 500 g de feuilles d'amarante, qui ont ensuite été homogénéisées pour former un échantillon composite. Après le prélèvement, les échantillons ont été placés dans un sachet et transportés immédiatement au

laboratoire de l'Institut Scientifique Agronomique du Burundi à Bujumbura, plus précisément au laboratoire d'analyse du sol et des produits alimentaires, pour des traitements préliminaires, incluant un lavage à l'eau et une pesée. Suite à ces traitements, les échantillons ont été séchés et broyés afin d'obtenir de la farine, qui a ensuite été utilisée pour l'analyse des métaux lourds, tant en identification qu'en quantification.

IV.3. La méthode d'échantillonnage

Cette recherche a été menée dans trois sites situés dans différentes communes dont NTAHANGWA, MUKAZA et MUHA en Mairie de Bujumbura, qui est la capitale économique du Burundi. Les trois sites ont été sélectionnés sur la base des recommandations d'études antérieures suite à quelques paramètres d'identification (Mukeba, Ngweme, & Poté, 2021).

Il s'agit des sites présents dans chaque commune : le site de la commune NTAHANGWA (Buterere), celui de la commune MUKAZA (Buyenzi) et enfin le site de la commune MUHA (Musaga), la raison pour laquelle nous avons choisi ces trois sites d'échantillonnage est que nous sommes convaincus que les propriétaires des champs d'amarante utilisent des eaux usées situées à proximité de leurs cultures. La raison d'inclure un cas témoin au sein de la serre de l'Ex Facagro est de pouvoir contrôler l'eau d'arrosage. J'ai utilisé de l'eau du robinet afin de comparer les niveaux de métaux lourds avec ceux provenant de différents sites. Les feuilles d'amarante cultivées dans ces sites proviennent de divers sites au sein de chaque commune. L'échantillonnage des feuilles d'amarante a été effectué du 25 août au 25 novembre 2024. Pour chaque site, des échantillons ont été prélevés en triplicata auprès de 4 cultivateurs choisis au hasard. Chaque réplique est d'environ 500 g de feuilles d'amarante, qui sont ensuite homogénéisées pour former un échantillon composite de 1kg.

Tableau 3 : Matériel utilisé au laboratoire physicochimique

Appareils	Réactifs
- Balance analytique - Etuve à 105°c - Dessiccateur - Broyeur - Bécher - Burette graduée 10ml - Papier filtre watman n°41 - Entonnoir - Fiole jaugés 50ml, 100ml - PH mètre - Plaque chauffante - Creuset en porcelaine - Spatule - Essuies tout, Hotte ….	- Eau distillée - Acide chlorhydrique 1N - Acide chlorhydrique 0,05N - Solution de chlorure de lanthane.

IV.4. Analyse physicochimique

IV.4.1. Préparation de l'échantillon

Après la collecte des feuilles d'amarante, nous les avons transportées vers l'ISABU au LASPA pour effectuer des analyses physicochimiques, en particulier l'analyse des métaux lourds. Ces feuilles ont d'abord subi des prétraitements conformes à la norme AOAC 922.02, 21st Edition, 2019. Une fois arrivés au Laboratoire de l'ISABU, nous avons lavées les feuilles et prélevées un échantillon de quelques feuilles pour déterminer la teneur en eau de chaque échantillon en fonction du site de collecte. Les autres feuilles ont été séchées dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures. Ce séchage avait pour objectif d'éliminer l'eau libre présente dans les feuilles afin de les conserver sans altération. Ensuite, nous les avons broyées à l'aide d'un broyeur pour obtenir une farine facilitant l'analyse.

Selon la méthode AOAC 930.04 ; 21st Edition, 2019, la formule utilisée au LASPA pour déterminer la teneur en eau est la suivante :

H = poids de l ′ échantillon sec/ poids de l ′échantillon frais $*$ 100.



Figure 2 : Broyage des feuilles d'amarantes à l'aide d'un broyeur pour avoir une farine

Source : Auteur 2024

IV.4.2. Détermination des éléments minéraux

L'analyse des éléments minéraux a été effectuée par méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme à l'ISABU en 4 grandes étapes selon la méthode AOAC 975.03, 21st Edition, 2019 :

- ✓ Le pesage des échantillons ;
- ✓ La calcination ;
- ✓ La minéralisation et la lecture au SAA avec logiciel winlab32AAFlamme.

IV.4.3. Analyse de l'échantillon

Après le séchage et le broyage des feuilles d'amarante, nous avons d'abord pesé des échantillons de 10,2291 g, 10,3828 g, 10,5509 g et 10,4895 g, respectivement pour les sites suivants : la serre du campus Mutanga, Buyenzi, Musaga et Buterere, à l'aide d'une balance analytique dans un creuset en porcelaine. Les échantillons ont ensuite été placés dans un four à moufle à 450 °C pendant 24 heures pour procéder à leur calcination. Après refroidissement à température ambiante dans un dessiccateur, nous avons ajouté 10 ml de HCl 1N pour chaque 10 gramme de l'échantillon

initialement pesé. Le mélange a été chauffé sur une plaque sous hotte jusqu'à ébullition, puis nous avons ajouté encore 10 ml de HCl 0,05N. Après cela, nous avons laissé refroidir sous la hotte, ce qui constitue le procédé de minéralisation.

Nous avons ensuite filtré le mélange à l'aide d'un papier filtre dans une fiole jaugée de 50 ml, en rinçant le creuset contenant l'échantillon et le papier filtre avec du HCl 0,05N. La fiole jaugée a été complétée jusqu'au trait de jauge avec du HCl 0,05N. Nous avons pipeté 1/10 de la solution filtrée (en fonction de la fiole jaugée choisie) et l'avons versée dans une fiole de 100 ml, puis nous avons complété à volume après avoir ajouté du $LaCl_3$ pour éviter les interférences.

Nous avons ensuite préparé des étalons. À partir d'une solution standard de 1000 ppm de cuivre, zinc, cadmium et plomb, nous avons préparé une solution de 100 ppm en pipetant 10 ml dans une fiole jaugée de 100 ml, que nous avons portée à volume avec de l'acide chlorhydrique. Nous avons pipeté exactement 0, 0,2, 0,5, 1 et 2 ml pour le zinc à 10 ppm ; 0, 2, 5, 10, 15 et 20 ml pour le plomb à 100 ppm ; 0, 0,2, 0,5, 1 et 2 ml pour le cadmium ; et 0, 0,1, 0,2, 0,5, 1 et 2 ml pour le cuivre. Ces solutions ont été versées dans une série de fioles de 50 ml, auxquelles nous avons ajouté 10 ml de $LaCl_3$ à 10 %. Nous les avons ensuite portées à volume avec de l'acide chlorhydrique.

Enfin, nous avons procédé à la lecture au spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA), où l'absorption est mesurée par une flamme générée par la combustion d'un mélange air/acétylène à 2500 °C. La concentration de chaque élément minéral (en ppm) pour le plomb, le cuivre, le zinc et le cadmium est déterminée selon la relation suivante : ZYV/100 X 100/X = ZYV/X, D'où X : poids de l'échantillon pesé (g)

V : volume après filtration (ml)

Y : Dilution

Z : Concentration de la prise d'essai (mg/kg)

Formule de dilution : $V_1 = V2 \text{ X } C_2/C_1$, avec $C_1 = 100ml$, $V2 = 10ml$, $C_2 = 10ml$

CHAPITRE V: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Dans cette section, nous présenterons les résultats de l'évaluation des concentrations de métaux lourds dans les échantillons d'amarante cultivés dans différents sites de la ville de Bujumbura. Les métaux lourds analysés incluent le zinc, le cuivre et le plomb, dont les niveaux sont essentiels pour évaluer la sécurité alimentaire.

Les données collectées sont présentées sous forme de tableaux et d'analyses descriptives, ce qui permet une comparaison claire des concentrations observées dans les différents sites : Serre du campus Mutanga, Buyenzi, Musaga et Buterere. Nous avons également déterminé la teneur en eau des échantillons, un facteur pouvant influencer la biodisponibilité des nutriments et des contaminants.

Les résultats fourniront un aperçu de l'état de contamination des cultures d'amarante dans cette région, mettant en lumière les préoccupations potentielles liées à la santé publique et identifiant les zones nécessitant une attention particulière pour minimiser les risques associés à l'exposition aux métaux lourds.

Les analyses physicochimiques concernant les métaux lourds ont été réalisés par spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (SAA) a donné des résultats suivants :

- Pour l'échantillon témoin, les résultats étaient 4,55mg/kg, 9,83mg/kg, 38,96mg/kg respectivement pour le Cu, le Pb, le Zn.
- Pour les échantillons en provenance de BUYENZI, les résultats étaient : 7,42mg/kg, 11,66mg/kg, 67,68mg/kg et ≤0,1mg/kg respectivement pour le Cu, le Pb, le Zn.
- Pour les échantillons en provenance de Buterere, les résultats étaient : 5,60mg/kg, 11,42mg/kg, Zn=80,91mg/kg respectivement pour le Cu, le Pb, le Zn.
- Pour les échantillons en provenance Musaga, les résultats étaient : 6,75mg/kg, 14,42mg/kg, Zn=61,00mg/kg respectivement pour le Cu, le Pb, le Zn.

Ces résultats illustrent la variabilité des métaux lourds présents dans les feuilles d'amarante cultivées dans la mairie de Bujumbura, selon les différentes zones de culture mentionnées ci-dessus. En comparant la concentration de métaux lourds des sites d'échantillonnage avec celle du site témoin, les résultats obtenus par analyse au spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme révèlent que les sites d'échantillonnage de Buyenzi, Buterere et Musaga affichent des niveaux de contamination par les métaux lourds plus élevés que ceux du site témoin de Mutanga.

Les résultats de l'analyse montrent également que les niveaux de cuivre (4,55 mg/kg, inférieur à la norme de 40 mg/kg), de zinc (38,96 mg/kg, inférieur à la norme de 100 mg/kg) présents dans les feuilles d'amarante du site témoin sont relativement inférieurs aux normes internationales recommandées par la FAO. En revanche, le niveau de plomb (9,83 mg/kg) dépasse la norme internationale, qui est de 0,3 mg/kg. Pour les autres sites d'échantillonnage, la concentration en métaux lourds est généralement inférieure à la norme internationale, à l'exception du plomb, dont le niveau est supérieur aux recommandations de la FAO et de l'OMS.

V.1. Teneurs en eau, cuivre et plomb de l'échantillon témoin

Les résultats présentés dans le tableau 4 (site témoin) indiquent que la teneur en eau varie entre 85 % et 88,6 %, ce qui est relativement stable et peut influencer la disponibilité des métaux lourds dans le sol. Les concentrations de cuivre montrent une légère fluctuation, allant de 4,2 mg/kg à 5 mg/kg. Par ailleurs, les niveaux de zinc varient de 37,6 mg/kg à 40,3 mg/kg, également inférieurs aux concentrations observées dans d'autres zones de culture. Cela pourrait suggérer que les échantillons de la serre du campus Mutanga, en tant que site témoin, sont moins affectés par la pollution. Les niveaux de plomb oscillent entre 8,86 mg/kg et 10,06 mg/kg.

Les résultats du test de Tukey révèlent que la teneur en eau présente une valeur p de 0,742 (voir annexe), supérieure au seuil de 0,05, ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats de trois jours d'échantillonnage. Les moyennes des trois jours sont donc statistiquement similaires (soit 88,5a). En revanche, selon le même test de Tukey, une différence significative est observée pour le cuivre et le zinc, tandis qu'aucune différence significative n'est constatée pour le plomb tout au long de la période d'échantillonnage (voir tableau 4).

Tableau 4 : Analyse des teneurs en eau, cuivre et plomb des amarantes récoltés à Mutanga dans la serre (cas témoin).

Date d'échantillonnage	**Teneur en eau (en%)**	**Cuivre (en mg/kg)**	**Zinc (en mg/kg)**	**Plomb (en mg/kg)**
Août	88,5±0,29^{a}	5±0,39^{a}	40,3±1,25^{a}	10,06±0,62^{a}
Novembre	88±0,29^{a}	4,87±0,39^{a}	38,5±1,25^{b}	9,1±0,62^{a}
Avril	88±0,29^{a}	4,2±0,39^{b}	37,6±1,25^{b}	8,8±0,62^{a}

V.2. Teneurs en eau, Cuivre, Zn et plomb des amarantes récoltées à BUYENZI

Les résultats présentés dans le tableau 5 indiquent que les niveaux de teneur en eau varient de 83,2 % à 88,7 %. Ces teneurs en eau relativement élevée peuvent favoriser l'absorption des nutriments, mais également celle des contaminants. Lors de l'analyse de la significativité à l'aide du test de Tukey, le niveau de teneur en eau du site Buyenzi affiche une valeur p de 0,092, tandis que le test de Duncan présente une valeur p de 1,000 (voir annexe 3.B). Cela démontre qu'il existe une différence significative concernant la teneur en eau sur les trois jours d'échantillonnage.

Les concentrations de cuivre varient entre 6,89 mg/kg et 8,3 mg/kg, et ces niveaux sont significativement ($p<0,05$) différents ($p<0,05$) tout au long de la période d'échantillonnage. Ils sont également nettement plus élevés que ceux observés à Mutanga, ce qui suggère une contamination potentiellement liée à des activités anthropiques dans la zone de culture. En ce qui concerne le zinc, les niveaux montrent une tendance à la baisse, passant de 71,91 mg/kg à 62,49 mg/kg, avec une différence significative entre les valeurs d'août 2023 et celles d'avril 2024 (voir tableau 5). Bien que ces valeurs soient élevées, elles indiquent une variation qui pourrait être influencée par des facteurs environnementaux. Les concentrations de plomb varient de 9,6 mg/kg à 12 mg/kg, avec un pic observé en avril 2024. Ces niveaux de plomb sont préoccupants et dépassent ceux relevés au site témoin de Mutanga, ce qui pourrait indiquer une exposition plus importante à la pollution.

Les niveaux élevés de cuivre, de zinc et de plomb à Buyenzi soutiennent l'hypothèse selon laquelle les amarantes cultivées à Bujumbura présentent des niveaux significatifs de contamination par des métaux lourds en raison des activités anthropiques. De plus, les variations observées dans les niveaux de zinc et de plomb à Buyenzi renforcent l'idée que la qualité de l'eau d'irrigation peut influencer les niveaux de contamination.

Tableau 5 : Analyse des teneurs en eau, Cuivre, Zn et plomb des amarantes récoltés à BUYENZI dans les champs

Date d'échantillonnage	**Teneur en eau (en%)**	**Cuivre (en mg/kg)**	**Zinc (en mg/kg)**	**Plomb (en mg/kg)**
Août	88,7±2,49^{b}	8,3±0,57^{b}	71,9±4,72^{a}	12±1,22^{a}
Novembre	84,6±2,49^{c}	7,2±0,57^{c}	68,1±4,72^{b}	11,4±1,22^{a}
Avril	83,2±2,49^{c}	6,89±0,57^{c}	62,4±4,72^{c}	9,6±1,22^{b}

V.3. Teneurs en eau, Cuivre, Zn et plomb des amarantes récoltées à MUSAGA

Les résultats présentés dans le tableau 6 montrent que les niveaux de teneur en eau varient de manière significative selon les dates d'échantillonnage, avec des valeurs de 93,3 % pour août 2023, 88,7 % pour novembre 2023 et 87,8 % pour avril 2024. Ces résultats montrent également que le niveau de cuivre varie de manière significative selon les dates d'échantillonnage, avec des concentrations de 7,4 mg/kg, 5,5 mg/kg et 3,9 mg/kg. En ce qui concerne le zinc, les deux premières valeurs (81 mg/kg) sont identiques, ce qui indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les niveaux mesurés ces deux jours-là. En revanche, la valeur du troisième jour (78,9 mg/kg) est inférieure à celles des deux premiers jours. Les niveaux de plomb sont significativement identiques entre août 2023 et novembre 2023, avec une valeur de 10,2 mg/kg, mais ils diffèrent significativement ($p<0,05$) de ceux d'avril 2024, qui est de 12,2 mg/kg. Cela montre que l'eau d'irrigation et le milieu de culture influencent la teneur en eau des plantes ainsi que les niveaux de cuivre, de zinc et de plomb.

Les résultats du site Musaga montrent des niveaux de contamination par des métaux lourds très élevés en comparaison avec le site témoin de Mutanga. Les niveaux de teneur en eau varient de 87,84 % à 93,37 %, atteignant un pic en août 2023. Les concentrations de cuivre présentent une tendance à la baisse, passant de 7,4 mg/kg en août 2023 à 3,9 mg/kg en avril 2024. Les niveaux de zinc restent constants à 81 mg/kg entre août 2023 et novembre 2023, puis diminuent légèrement à 78,9 mg/kg en avril 2024. Bien que ces niveaux soient élevés, leur stabilité suggère une certaine régularité dans la contamination. Les concentrations de plomb varient, passant de 10,2 mg/kg en août 2023 à 12,2 mg/kg en avril 2024, avec un pic observé en novembre. Les résultats obtenus à Musaga renforcent l'idée que la qualité de l'eau d'irrigation peut influencer les niveaux de

contamination, comme en témoignent les variations des niveaux de cuivre et de plomb au cours des trois jours d'échantillonnage.

Tableau 6 : Analyse des teneurs en eau, cuivre et plomb des amarantes récoltés à MUSAGA dans les champs

Date d'échantillonnage	**Teneur en eau (en%)**	**Cuivre (en mg/kg)**	**Zinc (en mg/kg)**	**Plomb (en mg/kg)**
Août	93,3± 2,63^{a}	7,4± 1,63^{a}	81± 1,06^{a}	10,2± 0,93^{a}
Novembre	88,7± 2,63^{b}	5,5± 1,63^{b}	81± 1,06^{a}	10,9± 0,93^{ab}
Avril	87,8± 2,63^{c}	3,9± 1,63^{c}	78,9± 1,06^{ab}	12,2± 0,93^{b}

V.3.1. Teneurs en eau, Cuivre, Zn et plomb des amarantes récoltées à BUTERERE

Les résultats présentés dans le tableau 4 mettent en évidence le niveau de significativité des variables étudiées. Les niveaux de teneur en eau sont presque identiques entre la date d'août 2023, avec des valeurs respectives de 87,4 mg/kg et 86,09 mg/kg, tandis qu'une différence significative est observée en avril 2024, avec un niveau de 82,9 mg/kg. En ce qui concerne le cuivre, les résultats de l'analyse comparative montrent des valeurs identiques en août 2023, avec un niveau de 7,3 mg/kg, tandis qu'une différence est constatée le troisième jour d'échantillonnage en avril, avec un niveau de 5,9 mg/kg. Les niveaux de zinc sont significativement ($p<0,05$) identiques entre les dates du 2 novembre et du 8 décembre 2024, avec une valeur de 61,9 mg/kg, tandis qu'une forte variation est observée le 1er octobre 2024, avec un niveau de 63,7 mg/kg. Les niveaux de plomb présentent des différences significatives sur les trois jours d'échantillonnage, avec une diminution notable entre avril 2024 et novembre 2023.

Les résultats montrent également que les niveaux de teneur en eau varient de 82,99 % à 87,41 %, ce qui indique une certaine stabilité. Les concentrations de cuivre fluctuent, passant de 7,0 mg/kg en novembre 2023 à 5,99 mg/kg en avril 2024, puis augmentant à 7,3 mg/kg en août 2023. Les niveaux de zinc diminuent progressivement, passant de 63,72 mg/kg à 60,9 mg/kg. Enfin, les concentrations de plomb varient entre 11,89 mg/kg et 15,31 mg/kg.

Tableau 7 : Analyse des teneurs en eau, cuivre et plomb des amarantes récoltés à BUTERERE dans les champs

Date d'échantillonnage	**Teneur en eau (en%)**	**Cuivre (en mg/kg)**	**Zinc (en mg/kg)**	**Plomb (en mg/kg)**
Août	87,4± 2,49[a]	7,3± 0,58[a]	63,7± 1,02[a]	15,3± 1,67[a]
Novembre	86,09± 2,49[a]	7,08± 0,58[a]	61,9± 1,02[b]	14,1± 1,67[b]
Avril	82,9± 2,49[b]	5,9± 0,58[b]	60,9± 1,02[b]	11,8± 1,67[c]

V.3.2. Analyse de la significativité des niveaux de contamination entre les sites

En examinant les variations des concentrations de métaux lourds selon les différents sites, nous cherchons à comprendre comment ces éléments environnementaux interagissent avec les processus biologiques et chimiques au sein des sols et des plantes. Les résultats de l'analyse des concentrations de métaux lourds dans les amarantes cultivées à Bujumbura révèlent des tendances préoccupantes en matière de sécurité alimentaire.

Le tableau 8 montre les valeurs des moyennes et des écart-types des différents sites de cultures. La comparaison entre les sites révèle des informations intéressantes sur les niveaux de contamination. La moyenne du teneur en eau est de 87,05%, avec un écart-type de 2,12, indiquant une variabilité relativement faible et suggérant des conditions du teneur en eau homogènes. Pour le cuivre, la moyenne est de 6,32 mg/kg avec un écart-type de 1,46, ce qui met en évidence une certaine dispersion, notamment avec Buyenzi ayant la concentration la plus élevée. Concernant le zinc, la moyenne est de 62,2 mg/kg dont l'écart-type est de 17,35, soulignant une variation marquée, particulièrement entre Buterere et Mutanga, ce qui pourrait indiquer des sources de contamination diverses. Enfin, les niveaux de plomb montrent une moyenne de 11,29 mg/kg et un écart-type de 1,75, ce qui révèle une cohérence dans la contamination entre les sites, avec Musaga affichant la concentration la plus élevée.

Au site témoin du campus Mutanga, les niveaux de teneur en eau et de métaux lourds sont relativement stables et inférieurs à ceux des sites d'études, témoignant une meilleure qualité de l'eau d'irrigation.

En revanche, les échantillons en provenance de Buyenzi présentent des concentrations de cuivre, de zinc et de plomb plus élevées, renforçant l'hypothèse selon laquelle les activités anthropiques,

comme l'utilisation d'eaux usées, influencent la contamination. Les échantillons en provenance de Musaga montrent également des niveaux alarmants, notamment en plomb, ce qui souligne une exposition accrue aux polluants. A Buterere, bien que les niveaux du teneur en eau restent stables, les fluctuations des métaux suggèrent des influences environnementales variées. Ces résultats indiquent que la qualité de l'eau et les pratiques agricoles sont des facteurs cruciaux affectant la contamination des amarantes cultivent dans les zones d'études.

Les résultats de l'analyse de la significativité avec le logiciel SPSS montrent que les teneurs en eau sont homogènes. En revanche, les niveaux de cuivre varient, les échantillons du site témoin affichant des concentrations significativement ($p<0,05$) plus basses que Buyenzi, Musaga et Buterere, qui sont similaires. Pour le zinc, des différences significatives sont observées entre tous les sites, particulièrement entre Buterere et Mutanga. Les niveaux de plomb montrent également des variations, avec Musaga présentant une contamination plus élevée, tandis que Mutanga, Buyenzi et Buterere sont comparativement similaires.

Tableau 8 : Comparaison entre les Sites d, échantionnage et Témoin cas du Plomb, Cuivre, Zinc et Teneur en Eau.

Nature	**Témoin**	**BUYENZI**	**BUTERERE**	**MUSAGA**	**MOYENNE**
Teneurs en eau (en%)	$87,2\pm36,41^{a}$	$85,5\pm34,55^{a}$	$90\pm35,52^{a}$	$85,5\pm33,94^{a}$	87,05±2,12
Teneurs en cuivre	$4,69\pm36,41^{b}$	7,49±34,55a	$5,68\pm35,52^{ab}$	$6,79\pm33,94^{a}$	6,32 ±1,45
Teneurs en eau Zinc	$38,8\pm36,41^{d}$	$67,5\pm34,55^{b}$	$80,3\pm35,52^{a}$	$62,2\pm33,94^{c}$	62,2±17,35
Teneur en plomb	$9,34\pm36,41^{b}$	$11\pm34,55^{b}$	$11,2\pm35,52^{b}$	$13,6\pm33,94^{a}$	11,285±1,75

V.3.3. Teneurs en eau

Les niveaux des teneurs en eau pour les sites sont respectivement de 87,2 % pour Mutanga, 85,5 % pour Buyenzi, 90 % pour Buterere et 85,5 % pour Musaga. Bien que Buterere présente le niveau du teneur en eau le plus élevé, lors de l'analyse de la variance montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre eux en termes du teneur en eau. Le teneur en eau dans les feuilles d'amarantes varie légèrement entre les sites, avec un maximum de 90 % à Buterere, ce qui favorise la disponibilité des nutriments mais peut également augmenter la biodisponibilité des contaminants.

V.3.4. Teneurs en zinc

Pour le zinc, le niveau de contamination est significativement ($p<0,05$) différent sur tous les sites de culture. L'analyse de la variance est donc significativement ($p<0,05$) différente. Le niveau de

plomb est significatif entre le site témoin, Buyenzi et Buterere mais une différence significative s'observe à Musaga.

La concentration de zinc est particulièrement élevée à Buterere (80,3 mg/kg), tandis que la serre Mutanga présente la plus faible concentration (38,8 mg/kg). Bien que tous les niveaux restent en dessous des limites de sécurité, la concentration élevée de zinc à Buterere pourrait poser des risques de toxicité chronique en cas de consommation régulière, potentiellement en raison des pratiques agricoles locales, telles que l'utilisation d'engrais riches en zinc (Ngarukiye et al. 2022).

V.3.5. Teneurs en cuivre

En analysant la variance, le niveau de cuivre entre les sites présente une différence significative entre Mutanga et les autres sites, à l'exception de Buterere. Cependant, les niveaux de cuivre entre Buyenzi, Musaga et Buterere sont statistiquement similaires. Concernant le cuivre, les valeurs mesurées, bien que toutes inférieures à la limite de 40 mg/kg fixée par la FAO/OMS, montrent des variations notables. Buyenzi affiche la concentration la plus élevée (7,49 mg/kg), ce qui pourrait être attribué à l'utilisation de l'eau polluée pour irrigation. Cela souligne l'importance d'une gestion prudente de l'eau d'irrigation en agriculture pour éviter une accumulation potentiellement toxique (Ishimwe et al. 2023).

V.3.6. Teneurs en Plomb

La contamination par le plomb est particulièrement alarmante, avec des valeurs allant jusqu'à 13,8 mg/kg à Musaga et Buterere, tout dépassant la limite de 0,3 mg/kg. Cette situation soulève des préoccupations majeures concernant la pollution environnementale, possiblement due à des sources anthropiques telles que le trafic routier ou les activités industrielles. La contamination par le plomb, souvent attribuée à des activités humaines telles que le trafic routier et les émissions industrielles, pourrait entraîner des effets néfastes, notamment des troubles neurologiques et rénaux (Kamana et al. 2023).Les résultats de spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (SAA) montrent que les concentrations des métaux lourds dans les amarantes sont variées suivant les zones de cultures. Cela confirme l'hypothèse 2 stipulant que les concentrations de métaux lourds détectées dans les amarantes cultivées à Bujumbura varient selon les zones de culture, et la qualité de l'eau d'irrigation.

CHAPITRE VI. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

VI.1 CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer la contamination par les métaux lourds dans les amarantes cultivées à Bujumbura, en s'appuyant sur des résultats empiriques et en répondant aux questions de recherche formulées. Les résultats indiquent clairement que les amarantes cultivées dans cette localité présentent des niveaux de contamination par des métaux lourds, notamment le plomb. Cela confirme l'hypothèse H1, selon laquelle l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation et l'environnement de culture contribuent significativement ($p<0,05$) à cette contamination.

Les analyses ont révélé des niveaux variés de zinc, de cuivre et de plomb parmi les sites d'échantillonnage. Les concentrations de plomb se sont avérées particulièrement préoccupantes, atteignant jusqu'à 13,8 mg/kg, dépassent largement les limites de sécurité établies par la FAO/OMS. Cela qui confirme l'hypothèse H2 sur la variabilité des concentrations selon les zones de culture. En ce qui concerne les effets des métaux lourds sur la santé humaine, bien que cette étude n'ait pas inclus d'analyses directes des impacts sanitaires, les résultats indiquent un risque accru de troubles neurologiques et rénaux liés à la consommation régulière d'amarantes contaminées, soutenant ainsi l'hypothèse H3. La documentation sur les effets néfastes des métaux lourds sur la santé, corroborée par des études antérieures, renforce cette préoccupation.

Dans le cadre de notre étude sur la contamination par des métaux lourds dans les amarantes cultivées à Bujumbura, nous avons mis en lumière l'importance cruciale de la qualité de l'eau d'irrigation et de l'environnement de culture. Ces facteurs jouent un rôle déterminant dans l'absorption et l'accumulation de métaux lourds dans les plantes. Les sources d'eau utilisées pour l'irrigation influencent directement les niveaux de contamination des cultures.

Plusieurs études antérieures soutiennent l'hypothèse H3, qui postule que la consommation régulière d'amarantes contaminées peut entraîner des troubles neurologiques et rénaux. Une étude menée par Bashir et al. (2021) a démontré que l'exposition au plomb, même à des niveaux faibles, est associée à des déficits cognitifs et à des troubles du comportement, en particulier chez les enfants. Cette recherche souligne l'importance de surveiller les niveaux de plomb dans les cultures alimentaires, y compris les amarantes, cultivées avec des eaux usées.

Ainsi, les résultats la présente étude renforcent les préoccupations concernant les risques pour la santé associée à la consommation d'amarantes cultivées dans des environnements contaminés, soulignant la nécessité d'une surveillance continue pour protéger la santé des consommateurs.

VI.2 RECOMMANDATIONS

Aux autorités publiques et locales :

- Lancer des campagnes de sensibilisation pour informer les agriculteurs et la population sur les dangers de la consommation des produits contenant les métaux lourds.
- Collaborer avec des institutions comme ISABU et BBN pour mener des études approfondies sur la qualité des sols et des cultures. Utiliser les résultats pour informer les politiques publiques et les pratiques agricoles.
- **Mise en place de systèmes de suivi** : Créer des systèmes de surveillance des métaux lourds dans les cultures destinées à la consommation, afin de garantir la sécurité alimentaire et de protéger la santé des consommateurs.
- **Aux chercheurs :**

-Continuer à étendre la recherche pour prouver la pertinence en métaux lourds dans les autres régions du Burundi.

- **Aux agricultures** : Sensibiliser les agriculteurs sur les risques liés aux métaux et les meilleures pratiques agricoles pour réduire la contamination, Si possible utiliser des sources d'eau alternatives qui ne contiennent pas de contaminants.
- **Aux consommateurs** : Ne pas acheter d'amarantes qui semblent provenir de sources non connues surtout dans les marchés informels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anhwange, B. A., Kagbu, J. A., Agbaji, E. B., & Gimba, C. E. (2009). Trace metal contents of some common vegetables grown on irrigated farms along the banks of river benue within Makurdi metropolis. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, *8*(11), 1150–1155.

Abrams, Paul, et al. "Fourth International Consultation on Incontinence Recommendations of the International Scientific Committee: Evaluation and treatment of urinary incontinence, pelvic organ prolapse, and fecal incontinence." *Neurourol Urodyn* 29.1 (2010): 213-40.

Chouti, W. K., Adanve, M., & Mama, D. (2019). Dosage du plomb et du zinc dans les cultures de l'amarante (*Amarantus cruentus*) et de la Grande morelle (*Solanum macrocarpum*): cas de quelques sites maraîchers de Porto-Novo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *12*(5), 2381. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i5.36

Capannolo, Luisa, et al. "Electron precipitation observed by ELFIN using proton precipitation as a proxy for electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves." *Geophysical Research Letters* 50.21 (2023): e2023GL103519.

Ishihara, Hajime, et al. "The comparative morphology of skate egg capsules (Chondrichthyes: Elasmobranchii: Rajiformes)." *Bull Kanagawa Prefect Mus (Nat Sci)* 41 (2012): 9-25.

Borger, Christine, et al. "Health spending projections through 2015: changes on the horizon." *Health Affairs* 25.2 (2006): w61-w73.

Krishna, A. K., and P. K. Govil. "Soil contamination due to heavy metals from an industrial area of Surat, Gujarat, Western India." *Environmental monitoring and assessment* 124 (2007): 263-275.

Canli, M., M. Kalay, and Ö. Ay. "Metal (Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, Cr, Ni) concentrations in tissues of a fish Sardina pilchardus and a prawn Peaenus japonicus from three stations on the Mediterranean Sea." *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology* 67.1 (2001).

Mukeba, Florent B., Georgette N. Ngweme, and John Poté. "Consommation de légumes et risques sanitaires à Kinshasa: une évaluation appliquée aux amarantes." *Revue Congolaise des Sciences Humaines et Sociales* 2.2 (2023): 1-10.

Fang, J., Lang, M., Ye, X., Zhang, W., & Zhu, K. (2016). Non-isothermal crystallization behavior of polypropylene/zinc oxide composites. *Science and Engineering of Composite Materials*, *23*(5), 505–510. https://doi.org/10.1515/secm-2014-0078

Fiche technique Pratiques des producteurs pour la culture de l ' amarante. (2023), 1–4.

Gado, F. A., Guero, Y., Dan-badjo, A. T., & Zakaria, O. (2018). Contamination en éléments traces métalliques de l ' amarante et de l ' oseille cultivées en conditions contrôlées sur un sol pollué, 12996–13003.

Georgette, N. (n.d.). Contamination Levels of Toxic Metals in Marketed Vegetable (Amaranthus Viridis) at Kinshasa , Democratic Republic of the Congo, *7*(087). https://doi.org/10.24966/FSN-1076/100087

GOOD, G. (2015).*Angewandte Chemie International Edition, 6(11), 951–952.*, *1*(April).

Guignard, C. (2011). I. Introduction. *La Lettre de Julius Africanus à Aristide Sur La Généalogie Du Christ*, (Cd), 1–10. https://doi.org/10.1515/9783110241006.1

Kalonda, D. M., Tshikongo, A. K., Kodondi, F., Busambwa, K., Bwalya, Y. K., Cansa, H. M., & Kahambwe, J. (2015). Profil des métaux lourds contenus dans les plantes vivrières consommées couramment dans quelques zones minières de la province du Katanga ., 9049–9054.

Legba, E. C., Aglinglo, L. A., Francisco, R. A., & Sogbohossou, O. D. (2021). Fiche technique synthétique pour la production des amarantes (Amaranthus spp.), (February). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30958.54084

Mensah, A., Sikirou, R., Assogba KOMLAN, F., Yarou, B. B., Midingoyi, G. S.-K., Honfoga, J., … Alice, K. (2019). *Guide pratique pour la culture de l'amarante (Amaranthus cruentus) au Bénin. Référentiel Technico-Economique (RTE). MAEP/ INRAB/FIDA/ProCar/PADMAR/World Vegetable Center/Bénin. Dépôt légal N° 11557, du 26/08/2019, Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin, 3ème trimestre. ISBN : 978-99982-53-17-9.*

Mohiuddin, K., Alam, M. M., Rahman, M. S., Islam, M. S., & Ahmed, I. (2016). Effect of polluted river water on growth, yield and heavy metal accumulation of red amaranth. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*, *3*(1), 53–65. https://doi.org/10.3329/ralf.v3i1.27858

Fisher, R. A. (1925). *Statistical Methods for Research Workers*.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*.

Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical Methods in Water Resources*.

Imene, Hadj Henni. "Sustainable development in Algeria: Investigating challenges and potential pathways." **Guassart 2001**, RAC 2006

Mudgal, V., Madaan, N., Mudgal, A., Singh, R. B., & Mishra, S. (2010). Effect of Toxic Metals on Human Health~!2009-12-12~!2010-02-09~!2010-04-06~! *The Open Nutraceuticals Journal*, *3*(1), 94–99. https://doi.org/10.2174/1876396001003010094

Mukeba, F., Ngweme, G., & Poté, J. (2021). Consommation de légumes et risques sanitaires à Kinshasa : une évaluation appliquée aux amarantes. *Revue Congolaise Des Sciences Humaines et Sociales*, *6385*. https://doi.org/10.59189/crsh506080

Oued, E. (2022). MEMOIRE DE FIN D ' ETUDE En vue de l ' obtention du diplôme de Master Académique en Sciences, 0–53.

Parui, R., Nongthombam, G. S., Hossain, M., Adil, L. R., Gogoi, R., Bhowmik, S.,Iyer, P. K. (2023). Impact of Heavy Metals on Human Health. *Remediation of Heavy Metals: Sustainable Technologies and Recent Advances*, *0530*, 47–81. https://doi.org/10.1002/9781119853589.ch4

Sarker, U., Hossain, M. M., & Oba, S. (2020). Nutritional and antioxidant components and antioxidant capacity in green morph Amaranthus leafy vegetable. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-57687-3

Singh, V. P., & Su, Q. (2022). Irrigation Water Quality. *Irrigation Engineering*, 81–93. https://doi.org/10.1017/9781009049610.007

Tao, Y., Zhang, Y., Meng, W., & Hu, X. (2012). Characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, *184*(7), 4367–4382. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2270-9

FAO. *La sante humaine*. LONDRE: Adveture Works Press, 2020.

Abdallaoui, Abdelaziz, 2014. Les métaux lourds dans l'environnement

Rizert Charpentier, 2000. Métallurgie extractive , Hydrométallurgie-2000

B. J. Alloway**,** "Heavy Metals in Soils" (1995)

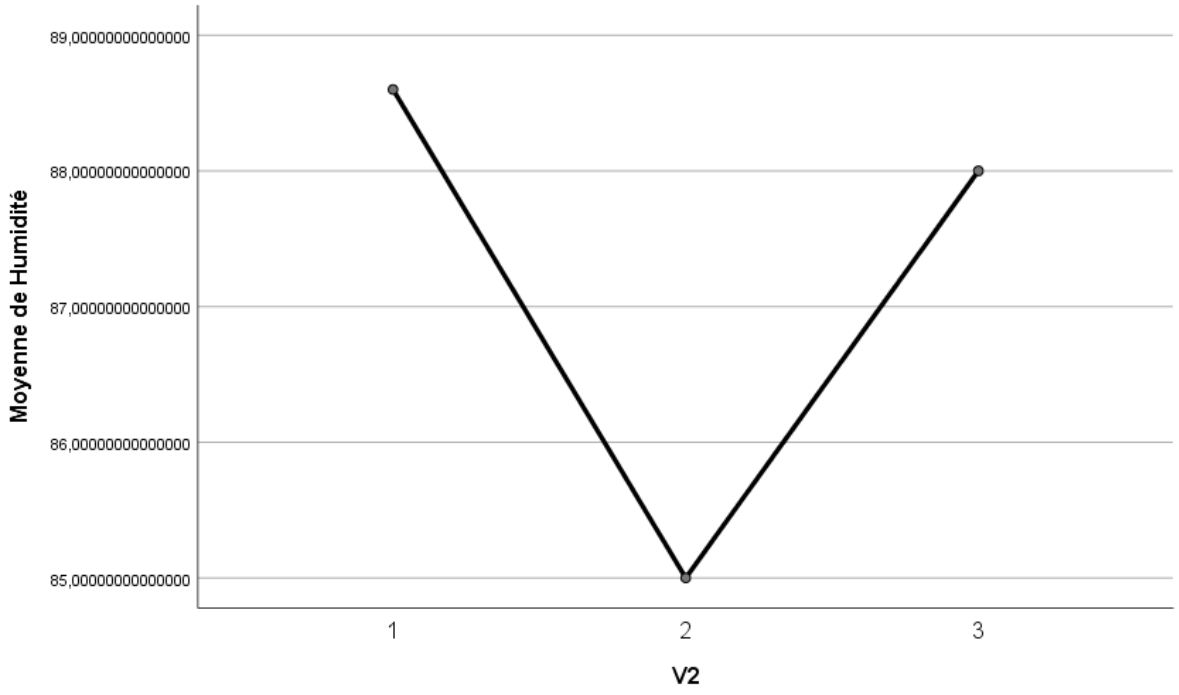
ANNEXES

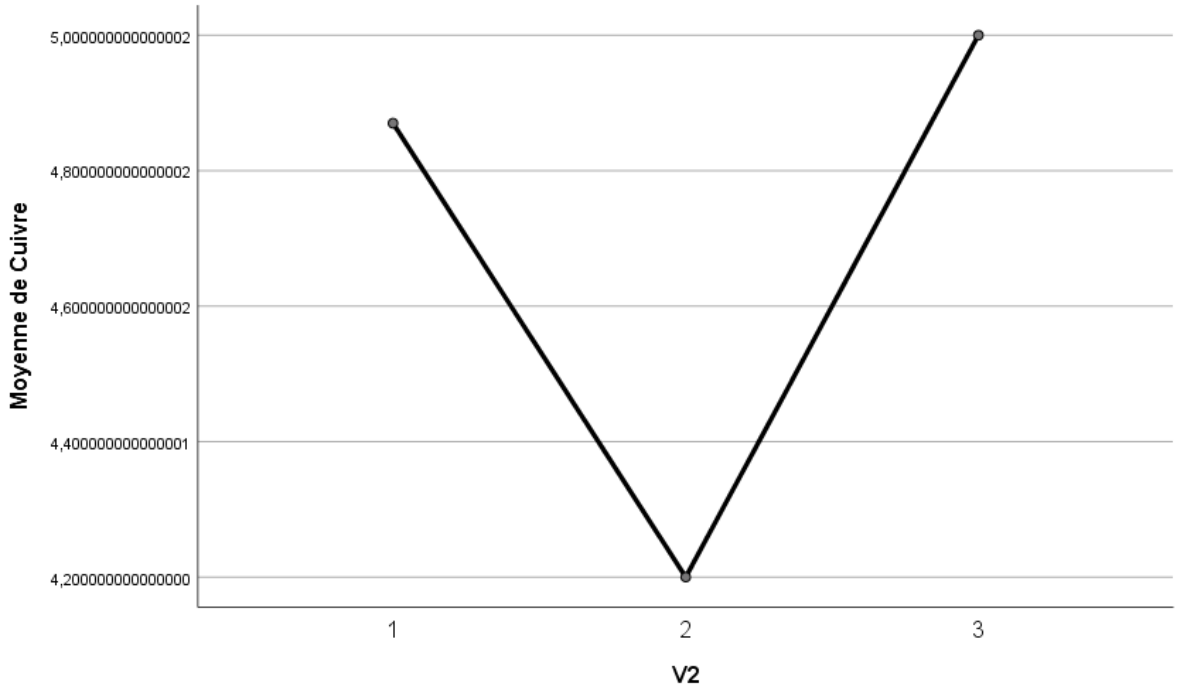
Annexe 1 : Préparation et analyse des échantillons

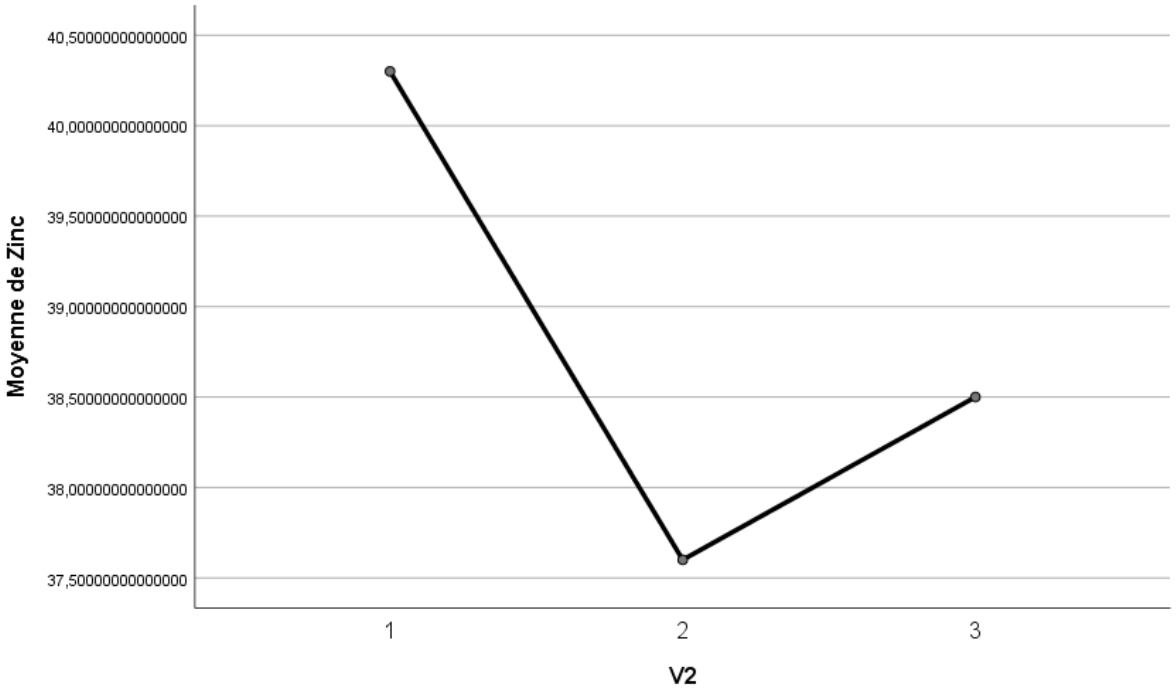


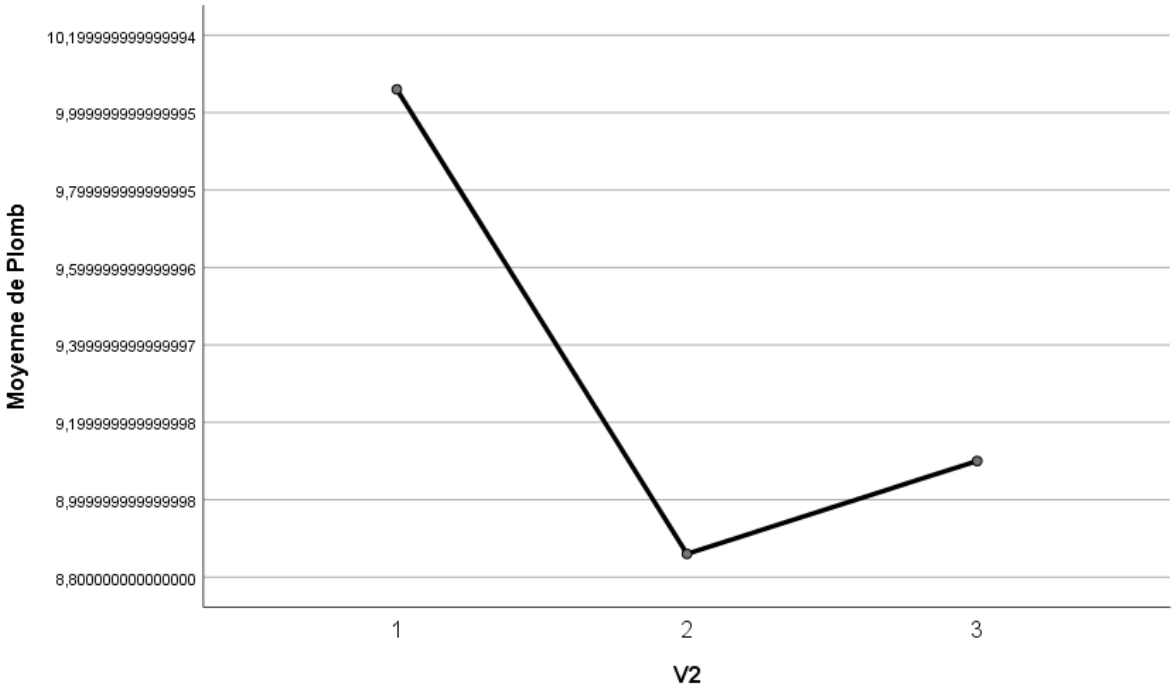


Annxe 2 : Tracés des moyennes des variables d'étude


89,000000000000000
88,000000000000000
87,000000000000000
86,000000000000000
85,000000000000000
Moyenne de Humidité
1
2
3
V2


5,000000000000002
4,800000000000002
4,600000000000002
4,400000000000001
4,200000000000000
Moyenne de Cuivre
1
2
3
V2


Moyenne de Zinc
40,50000000000000
40,00000000000000
39,50000000000000
39,00000000000000
38,50000000000000
38,00000000000000
37,50000000000000
1
2
3
V2


Moyenne de Plomb
10,199999999999994
9,999999999999995
9,799999999999995
9,599999999999996
9,399999999999997
9,199999999999998
8,999999999999998
8,800000000000000
1
2
3
V2

Annexe 3 : Résultats du logiciel SPSS

A. Buterere

Teneur en eau

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
	V2	N	1	2	3
Différence significative de Tukey[a]	3	3	82,990000000000000		
	2	3		86,099999999999980	
	1	3		87,410000000000010	
	Sig.		1,000	,070	
Duncan[a]	3	3	82,990000000000000		
	2	3		86,099999999999980	
	1	3			87,410000000000010
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Cuivre

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
	V2	N	1	2
Différence significative de Tukey[a]	2	3	5,98999999999 9999	
	1	3		7,080000000000 0001
	3	3		7,300000000000 0000
	Sig.		1,000	,377
Duncan[a]	2	3	5,98999999999 9999	
	1	3		7,080000000000 0001
	3	3		7,300000000000 0000
	Sig.		1,000	,197

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Zinc

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
	V2	N	1	2
Différence significative de Tukey[a]	3	3	60,9000	
	2	3	61,9800	
	1	3		63,7200
	Sig.		,119	1,000
Duncan[a]	3	3	60,9000	
	2	3	61,9800	
	1	3		63,7200
	Sig.		,055	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Plomb

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
	V2	N	1	2	3
Différence significative de Tukey[a]	2	3	11,8900000000 00000		
	3	3		14,1999999999999 98	
	1	3			15,3100000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan[a]	2	3	11,8900000000 00000		
	3	3		14,1999999999999 98	
	1	3			15,3100000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

B. Buyenzi

Teneur en eau

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
	V2	N	1	2	3
Différence significative de Tukey[a]	2	3	83,200000000000000		
	3	3	84,600000000000000		
	1	3		88,700000000000000	
	Sig.		,092	1,000	
Duncan[a]	2	3	83,200000000000000		
	3	3		84,600000000000000	
	1	3			88,700000000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Cuivre

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
	V2	N	1	2	3
Différence significative de Tukey[a]	2	3	6,890000000000000		
	3	3	7,280000000000000		
	1	3		8,300000000000000	
	Sig.		,092	1,000	
Duncan[a]	2	3	6,890000000000000		
	3	3		7,280000000000000	
	1	3			8,300000000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Zinc

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
	V2	N	1	2	3
Différence significative de Tukey[a]	3	3	62,490000000000000		
	2	3		68,100000000000000	
	1	3			71,910000000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan[a]	3	3	62,490000000000000		
	2	3		68,100000000000000	
	1	3			71,910000000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Plomb

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
	V2	N	1	2
Différence significative de Tukey[a]	3	3	9,600000000000000	
	1	3		11,400000000000000
	2	3		12,000000000000000
	Sig.		1,000	,532
Duncan[a]	3	3	9,600000000000000	
	1	3		11,400000000000000
	2	3		12,000000000000000
	Sig.		1,000	,301

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

C. Mutanga site témoin

Teneur en eau

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05
	V2	N	1
Différence significative de Tukey[a]	2	3	85,000000000000000
	3	3	88,000000000000000
	1	3	88,599999999999980
	Sig.		,742
B de Tukey[a]	2	3	85,000000000000000
	3	3	88,000000000000000
	1	3	88,599999999999980

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Cuivre

	V2	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
			1	2
Différence significative de Tukey[a]	2	3	4,200000000000000	
	1	3		4,870000000000000
	3	3		5,000000000000000
	Sig.		1,000	,414
B de Tukey[a]	2	3	4,200000000000000	
	1	3		4,870000000000000
	3	3		5,000000000000000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Zinc

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
	V2	N	1	2
Différence significative de Tukey[a]	2	3	37,600000000000000	
	3	3	38,500000000000000	
	1	3		40,300000000000010
	Sig.		,160	1,000
B de Tukey[a]	2	3	37,600000000000000	
	3	3	38,500000000000000	
	1	3		40,300000000000010

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Plomb

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05
	V2	N	1
Différence significative de Tukey[a]	2	3	8,860000000000000
	3	3	9,100000000000000
	1	3	10,060000000000000
	Sig.		,073
B de Tukey[a]	2	3	8,860000000000000
	3	3	9,100000000000000
	1	3	10,060000000000000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

D. Musaga

Teneur en eau

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
	V2	N	1	2	3
Différence significative de Tukey[a]	3	3	87,83999999 9999990		
	2	3		88,79000000 0000000	
	1	3			93,37000000 0000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan[a]	3	3	87,83999999 9999990		
	2	3		88,79000000 0000000	
	1	3			93,37000000 0000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Cuivre

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
	V2	N	1	2	3
Différence significative de Tukey[a]	3	3	3,980000000000000		
	2	3		5,580000000000001	
	1	3			7,480000000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan[a]	3	3	3,980000000000000		
	2	3		5,580000000000001	
	1	3			7,480000000000000
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Zinc

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
	V2	N	1	2
Différence significative de Tukey[a]	3	3	78,900000000000000	
	1	3		81,000000000000000
	2	3		81,000000000000000
	Sig.		1,000	1,000
Duncan[a]	3	3	78,900000000000000	
	1	3		81,000000000000000
	2	3		81,000000000000000
	Sig.		1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

Plomb

			Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
	V2	N	1	2
Différence significative de Tukey[a]	1	3	10,200000000000000	
	2	3	10,900000000000000	10,900000000000000
	3	3		12,500000000000000
	Sig.		,496	,075
Duncan[a]	1	3	10,200000000000000	
	2	3	10,900000000000000	
	3	3		12,500000000000000
	Sig.		,276	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.