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

Contribution à l'analyse des effets du cuivre et du nickel sur les paramètres de croissance du Cajanus cajan (L) et de l'Eleusine coracana (L).

NGARAMA, Stève; Sous la direction de : Dr. Prudence BARARUNYERETSE

2023
UB, FACULTE DES SCIENCES
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1051

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES EFFETS DU CUIVRE ET DU NICKEL SUR LES PARAMETRES DE CROISSANCE DU *Cajanus cajan* (L) ET DE l'*Eleusine coracana* (L).

Par :

Stève NGARAMA

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement

Spécialité : Génie de l'Environnement

Sous la direction de :

Dr. Prudence BARARUNYERETSE

Avril, 2023

Contribution à l'analyse des effets du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance du Cajanus cajan (L) et de l'Eleusine coracana (L).

MEMBRES DU JURY

Président : Prof. Dr. NIJIMBERE Séverin

Secrétaire : Prof. KABONEKA Salvator (Ph D)

Directeur : Dr. BARARUNYERETSE Prudence

DEDICACE

A Dieu le tout puissant

A mes parents

A mes frères et sœurs

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de mémoire de fin du cycle de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce modeste travail.

Mes sincères remerciements s'adressent tout d'abord à Monsieur Dr. Prudence BARARUNYERETSE, Professeur à l'Université du Burundi et Doyen de la Faculté des Sciences, Directeur de ce mémoire pour son encadrement, son encouragement et ses orientations durant la réalisation de ce travail. Sans son aide et implication dévouée à chaque étape du processus, ce travail et ce document n'auraient jamais été réalisés. Je me permets de le remercier pour sa bonne initiative, qu'il sache combien je lui sais gré pour sa disponibilité malgré ses multiples occupations et pour l'aide et la confiance qu'il m'a toujours accordées. Ses riches conseils, ainsi que sa rigueur scientifique m'a été d'une grande importance. Qu'il trouve ici mes grandes reconnaissances.

Nos sentiments de reconnaissance vont également à l'endroit des Professeurs de l'Université du Burundi plus particulièrement ceux de la Faculté des Sciences, de manière extraordinaire à ceux qui interviennent dans la formation du Master en Sciences et Gestion intégrée de l'Environnement, qui ont déployé leurs efforts pour assurer une formation aussi complète, pour aider et supporter toute la promotion en Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, qu'ils trouvent ici le fruit de leurs multiples efforts.

J'adresse également mes sincères remerciements à Msc. BUCUMI Belise, qui m'a donné des guides et des orientations lors des travaux de terrains, qu'elle trouve ici le fruit de ses efforts fournis.

J'adresse aussi mes remerciements à mes camarades de la troisième promotion de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement avec qui nous avons été ensemble durant ce cursus de formation. Leur très bonne collaboration m'a été très bénéfique. Qu'ils trouvent dans chaque ligne de ce mémoire ma profonde satisfaction et gratitude.

Au terme de ce travail, je me permets d'exprimer ma profonde gratitude aux amis et mes sentiments de reconnaissance à toutes personnes qui ont contribué à son aboutissement.

Stève NGARAMA

Contribution à l'analyse des effets du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance du Cajanus cajan (L) et de l'Eleusine coracana (L).

RESUME

La pollution par les métaux lourds suite aux activités anthropiques est devenue un véritable problème menaçant notre écosystème, avec des effets nuisibles sur la production végétale.

Pour assurer le développement du secteur minier et le transformer en un véritable moteur de croissance socio-économique, le Burundi est toujours en attente d'un grand investissement minier pour mettre en exploitation le gisement de Musongati en province Rutana. Il est alors indispensable de mieux connaître les effets des métaux lourds sur les organismes vivants afin de mettre en évidence des solutions durables visant à limiter leurs risques et les plantes représentent un objet d'étude intéressant.

L'objectif de notre travail est d'évaluer le comportement du *Cajanus cajan* et de *l'Eleusine coracana* à l'exposition au Cuivre et au Nickel sous différentes concentrations. Dans ce travail, des semences de ces plantes ont été exposées à des différentes doses de 0 mg/l, 10 mg/l, 20 mg/l, 40 mg/l, 80 mg/l, 160 mg/l et 320 mg/l pour chaque métal afin d'étudier leurs effets sur leur germination et croissance.

Les résultats du test de germination réalisée dans les boîtes de pétri, ont montré que le taux de germination du *Cajanus cajan* et *d'Eleusine coracana* a chuté progressivement avec l'augmentation de la concentration du Cuivre et du Nickel. Avec le traitement du Cuivre, la chute du taux de germination pour le cas du *Cajanus cajan* est passé de 88,8 % à 50 % avec la dose de 320 mg/l et pour l'*Eleusine coracana*, elle est passée de 88,8 % à 8,3 % avec la dose de 320 mg/l. Avec le Nickel, le taux de germination du *Cajanus cajan* a passé de 88,8 % à 44,4% tandis que pour l'*Eleusine coracana*, elle a passé de 88,8 % à 41,6 % avec le traitement de 320 mg/l.

Les résultats du test de croissance effectuée dans les pots en polyéthylènes sur le substrat du sol, ont montré que le Cuivre et le Nickel ont des effets inhibiteurs sur la croissance du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* en fonction de la dose et du temps d'exposition. . Avec le Cuivre, les paramètres de croissance ont diminué jusqu'à 17% pour le *Cajanus cajan* et à 58,3% pour l'*Eleusine coracana* tout cela avec les doses de 80 mg/kg. Avec le Nickel, ces paramètres ont diminués jusqu'à 67% pour le *Cajanus cajan* mais augmentés de 7,8% pour l'*Eleusine coracana* avec la dose inferieur ou égale à 80 mg/kg et tout en comparant avec ceux de la dose témoin.

Mots clés : Germination, Cuivre, Nickel, métaux lourds, *Cajanus cajan*, *Eleusine coracana*, Croissance, effet.

ABSTRACT

Heavy metal pollution resulting from human activity has become a real problem threatening our ecosystem, with harmful effects on plant production.

To ensure the development of mining sector and transform it into a real engine of socio-economic growth, Burundi is still waiting for a major mining investment to bring the Musongati deposit into production in Rutana province. It is therefore essential to better understand the potential effects of heavy metals on living organisms, in order to identify sustainable solutions aimed at limiting their risks, and plants represent an interesting object of study.

The aim of this work is to evaluate the behavior of *Cajanus cajan* and *Eleusine coracana* to exposure to Copper and Nickel at different concentrations. In this work, seeds of these plants are exposed to different doses of 0 mg/l, 10 mg/l, 20 mg/l, 40 mg/l, 80 mg/l, 160 mg/l and 320 mg/l for each metal to study their effects on germination and growth.

The results of the germination test carried out in petri dishes showed that the germination rate of *Cajanus cajan* and *Eleusine coracana* fell progressively with increasing copper and nickel concentrations. With Copper treatment, the drop in germination rate for *Cajanus cajan* went from 88.8% to 50% with the 320 mg/l dose, and for *Eleusine coracana* from 88.8% to 8.3% with the 320 mg/l dose. With Nickel, the germination rate of *Cajanus cajan* dropped from 88.8% to 44.4%, and for *Eleusine coracana*, from 88.8% to 41.6% with the 320 mg/l treatment.

The results of growth test carried out in polyethylene pots on the soil substrate showed that Copper and Nickel had inhibitory effects on the growth of *Cajanus cajan* and *Eleusine coracana* at high concentrations and over time. With copper, growth parameters decreased by up to 17% for *Cajanus cajan* and 58.3% for *Eleusine coracana* at doses of 80 mg/kg. With Nickel, these parameters decreased by up to 67% for *Cajanus cajan*, but increased by 7.8% for *Eleusine coracana* at doses of 80 mg/kg or less, all when compared with the control dose.

Key words: Germination, Copper, Nickel, heavy metals, *Cajanus cajan*, *Eleusine coracana*, Growth, effect.

TABLE DES MATIERES

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 0. INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I. REVUE DES GENERALITES 4

I.1. Généralités sur les métaux lourds 4

I.1.1. Définition et classification des métaux lourds 4

I.1.2. Origine des métaux lourds dans les sols 5

I.1.3. Interaction entre les métaux 7

I.1.4. Mobilité et biodisponibilité des éléments-traces métalliques 7

I.1.5. Cas du Cuivre 8

I.1.5.1. Cuivre dans l'environnement 8

I.1.5.2. Cuivre dans les sols 8

I.1.5.3. Cuivre dans les plantes 9

I.1.5.4. Mécanismes d'adaptation des plantes au Cuivre 9

I.1.5.5. Déficience et excès en Cuivre 10

I.1.6. Cas du Nickel 10

I.1.6.1. Sources et quantités de nickel dans l'environnement 10

I.1.6.2. Biodisponibilité du nickel dans les sols 11

I.1.6.3. Effets du nickel sur les plantes 11

I.1.6.4. Mécanismes de résistance des plantes au Nickel 11

I.2. Généralités sur le *Cajanus cajan* et l'*Eleusine coracana* 12

I.2.1. Généralités sur le *Cajanus cajan* 12

I.2.2. Généralités sur l'*Eleusine coracana* 14

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODE 16

II.1. Matériel végétal 16

II.2. Matériel sol 16

II.3. Matériel Métal 17

II.4. Préparation du milieu de culture 17

II.5. Préparation de la solution du Cuivre et du Nickel 18

II.6. Protocole expérimental 19

II.7. Relevé des donnés pour la germination 19

II.8. Relevé des données pour la croissance et développement 20

II.8.1. Nombre de feuilles 20

II.8.2. Nombre de nœuds 20

II.8.3. Hauteur de plantes 20

II.8. 4. Biomasse aérienne et racinaire 21

II.9. Enregistrement et traitement des données 21

CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 22

III.1. PRESENTATION DES RESULTATS 22

III.1.1. Germination du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre et du Nickel 22

III.1.2. Germination d'*Eleusine coracana* sous l'effet du Cuivre et du Nickel 24

III.1.3. Effet du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance du *Cajanus cajan* 25

III.1.4. Effet du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance de l'*Eleusine coracana* 31

III.2. DISCUSSION DES RESULTATS 37

CONCLUSION 42

BIBLIOGRAPHIE 43

ANNEXE 50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Liste de quelques métaux lourds (Essentiel ou Toxique) selon leur densité. 5

Tableau 2: Caractéristiques chimiques et physico-chimiques du substrat de sol utilisé.....16

Tableau 3: Variation en dose du Cuivre et du Nickel utilisée pour le test de germination 18

Tableau 4 : Variation en dose du Cuivre et du Nickel utilisé pour le test de croissance.....18

Tableau 5: Taux de germination du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre (a) et du Nickel (b).....22

Tableau 6 : Taux de germination de l'*Eleusine coracana* sous l'effet du Cuivre (a) et du Nickel (b). 24

Tableau 7: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la Biomasse sèche du *Cajanus cajan*.....30

Tableau 8: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la biomasse sèche de l'*Eleusine coracana*.....35

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Origine de la contamination du sol par les métaux lourds 6

Figure 2: Dispositif de milieu de culture utilisé, boites de pétri (A) et pots en polyéthylènes (B) 17

Figure 3: Image illustrant les niveaux de répétition pour chaque dose.....19

Figure 4 : Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la croissance en hauteur du *Cajanus cajan*.....26

Figure 5: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la formation des feuilles du *Cajanus cajan*.....27

Figure 6: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la formation des nœuds du *Cajanus cajan*.....28

Figure 7: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la perte en feuilles du *Cajanus cajan*.....29

Figure 8: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la croissance en hauteur d'*Eleusine coracana*.....32

Figure 9: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la formation des feuilles de l'*Eleusine coracana* 33

Figure 10: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur le nombre des gaines de l'*Eleusine coracana* 34

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

µM : Micromole

BS : Biomasse Sèche

BSA : Biomasse Sèche Aérienne

BSR : Biomasse Sèche Racinaire

Cu : Cuivre

D : Dose

ETM : Elément Trace Métallique

FABI : Faculté d'Agronomique et Bio-Ingénierie

ISABU : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

pH : Potentiel d'hydrogène

ROM : Read Only Memory

RAM : Random Access Memory

SPSS : Statistical Package for the Social Sciences

AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre des travaux de fin d'études du Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, option de Génie de l'Environnement. Il porte sur l'analyse des effets du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance du *Cajanus cajan* et de *l'Eleusine coracana*.

L'inspiration de ce travail était le programme de l'exploitation du site minier de la Commune Musongati en province de Rutana visé par le Gouvernement du Burundi dans les années à venir. Les études faites ne cessent pas à montrer que l'exploitation minière provoque des impacts négatifs sur la biodiversité et les écosystèmes entourant le site exploité suite à la pollution des métaux lourds existant sur les sites exploités.

Les espèces végétales exposées à la pollution des métaux lourds réagissent de différente façon où certaines sont victimes de la pollution, les autres peuvent tolérer par créations des mécanismes de tolérance et ou résister à un certain temps mais finissent par mourir.

La population de la Commune Musongati vit de l'agriculture et cultive de certaines plantes vivrières notamment le *Cajanus cajan*, l'*Eleusine Coracana*, le *Zea mays*, le *Phaseolus vulgaris*, et d'autres plantes de consommation courante. Le *Cajanus cajan* et l'*Eleusine coracana* sont des plantes les plus cultivées dans cette région alors qu'elles ne sont pas répandues sur toute l'étendue du territoire du Burundi.

L'objectif global de cette étude est d'évaluer le comportement du *Cajanus cajan* et de *l'Eleusine coracana* à l'exposition au Cuivre et au Nickel sous différentes concentrations pour voir si ces plantes peuvent résister sur des sols pollués par ces métaux lourds.

A part l'introduction, la conclusion, les références bibliographiques et les annexes, ce travail s'articule autour de trois chapitres dont le premier chapitre concerne la revue des généralités sur les métaux lourds et les plantes utilisées, le second chapitre concernant le matériel et méthode ainsi que le dernier chapitre concernant la présentation et discussion des résultats.

Les résultats trouvés dans cette étude ont révélé que le Cuivre et le Nickel, à des concentrations élevées, ont des effets néfastes à la germination et la croissance du *Cajanus cajan* et l'*Eleusine coracana* en fonction du temps également et ces résultats peuvent aider à chercher d'autre variété d'espèce végétale résistant ou tolérant à des fortes concentrations de ces métaux et qui peuvent être cultivé après l'exploitation minière.

CHAPITRE 0. INTRODUCTION GENERALE

Les écosystèmes terrestres sont souvent victimes de pollution chimique du fait qu'ils sont exposés à de nombreuses contaminations. Parmi les contaminants majeurs de l'environnement, les métaux lourds posent de sérieux problèmes écologiques, tant par le caractère ubiquiste de leur présence au sein de la biosphère que par leur toxicité. Leur présence dans l'environnement et leur bioaccumulation potentielle induit des effets dévastateurs sur la balance écologique de l'environnement (Manda et *al*., 2010).

Les métaux lourds sont considérés comme des polluants inorganiques non dégradables, qui sont rejetés dans l'environnement, suite aux activités humaines et naturelles, provoquant des perturbations de l'écosystème (Ngaram, 2011).

Enfin, les sols des sites miniers et de traitement des minerais sont souvent très fortement contaminés en éléments trace métalliques (ETM), et ces sites représentent une menace importante pour leur milieu environnant dans le cas d'une migration ou d'une diffusion des ETM. En particulier des quantités importantes d'ETM peuvent s'infiltrer dans le sous-sol et les nappes phréatiques ou ruisseler vers les terres cultivées (Qasim, 2015).

Les métaux lourds, qui se trouvent sous forme de traces dans les sols naturels, peuvent atteindre de très fortes concentrations dans certains substrats pollués par les activités humaines. Par exemple, le zinc, le plomb, le cadmium, le Nickel et le Cuivre sont présents dans les résidus d'extraction de minerais accumulés autour des exploitations minières et leur présence modifie considérablement la composition floristique des sites, ne permettant l'installation que d'un nombre limité d'espèces supportant leur toxicité (Antonovics et *al*., 1971; Gartside et Thomas, 1974).

Les métaux lourds font partie des polluants les plus dangereux pour l'ensemble des organismes vivants et des végétaux en particulier et ils sont généralement toxiques à des concentrations très faibles (Davis et Beckett, 1978). En effet, la toxicité est lié à la présence de certaines formes des métaux dans la solution du sol, généralement sous une forme ionique (Becquer et *al*., 1995).

Dans l'environnement pollué par les métaux lourds, les ions de métaux lourds s'accumulent dans les plantes et certaines plantes ont des réactions de défense, et freinent l'absorption en sécrétant des acides organiques qui vont augmenter le pH et par conséquent réduire la mobilité des éléments traces (Huang et *al*., 2018).

L'exploitation minière révèle une contamination importante des sites exploités et on souligne une grande variabilité des concentrations des ETM en fonction de l'élément. L'index de pollution des stations est généralement très élevé du fait de la présence simultanée de plusieurs de ces éléments. Cette combinaison de

différents ETM rend les sols de la région toxiques pour la flore, la faune et les populations locales (Taiba, 2012).

Toutes fois, le Burundi reste l'un des pays les plus dépendants de l'aide extérieure pour le financement de son développement. il compte sur la gestion rationnelle de ses ressources naturelles pour financer la croissance économique et le développement (Ndikumana et Mbonicuye, 2019) et dispose d'un potentiel minier non encore exploité (PND Burundi, 2018).

Pour développer son secteur minier et le transformer en un véritable moteur de croissance des mines et carrières, le Burundi a ouvert et enregistré 61 comptoirs d'exploitations des minerais (PND Burundi, 2018) et est toujours en attente d'un grand investissement minier pour mettre en exploitation le gisement nickélifère de Musongati en province Rutana dont la concession a été obtenue par Burundi Mining Metallurgy International (Vircoulon, 2019).

Souvent, les concentrations des ETM du profil latéritique de Musongati sont distribués dans la zone ferralitique et les plus fortes concentrations sont généralement limitées à la partie inférieure dans la zone saprolitique (Ntiharirizwa, 2013).

La population environnante du gisement minier de Musongati vit de l'agriculture et les champs sont exploités pour la culture de certaines plantes vivrières notamment le *Zea mays*, le *Phaseolus vulgaris*, le *Cajanus cajan*, l'*Eleusine coracana* et d'autres plantes de consommation courantes. Ces plantes sont aussi vendues dans les différents marchés des provinces frontalières de cette dernière.

Les éléments traces métalliques sont à` l'origine d'effets encore plus néfastes sur les fonctions physiologiques des organismes vivants et les plantes réagissent de façon différente selon les variétés. Certaines sont peu ou pas tolérantes et meurent au contact des métaux lourds et c'est dans ce perspective que notre travail intitulé "Contribution à l'analyse des effets du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana*" a initié.

Pour atteindre les objectifs de ce travail, les hypothèses suivantes ont été formulées :

(i) Les concentrations croissantes du Cuivre et du Nickel influencent sur la diminution de la germination des graines du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana*

(ii) La présence du Cuivre et du Nickel dans le sol à des concentrations croissantes inhibe la croissance du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana*.

Pour bien mener ce travail, un objectif global d'évaluer le comportement du *Cajanus cajan* et de *l'Eleusine coracana* à l'exposition du Cuivre et du Nickel est fixé avec des objectifs spécifiques suivants :

- Evaluer le taux de germination du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* sous l'effet de différentes concentrations du Cuivre et du Nickel.
- Analyser les paramètres morphologiques de croissance et de développement du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* sous l'effet de différentes concentrations du Cuivre et du Nickel.

CHAPITRE I. REVUE DES GENERALITES

I.1. Généralités sur les métaux lourds

I.1.1. Définition et classification des métaux lourds

Le terme métal lourd n'a pas de définition scientifique (Seigneur, 2018). On considère généralement que ce sont des éléments métalliques dont la masse volumique est supérieure à 5 g/cm^3 (Benjamin et Tara, 2020).
Depuis plusieurs décennies, le terme «métaux lourds » est abondamment utilisé pour définir un groupe de métaux et métalloïdes liés à la contamination des sols et leur toxicité (Duffus, 2002) et ils sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais généralement à l'état de traces (Kalonda et *al*., 2016).
En fonction de leurs effets physiologiques et toxiques, on distingue des métaux essentiels et des non essentiels ou toxiques (Dénia et *al*., 2020).
Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Kabata et Pendias, 2001) Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration devient accidentellement élevée. C'est le cas du Cuivre, du Nickel, du Cobalt, du Zinc et du Fer.
Par contre les métaux toxiques (non essentiels), même à faible concentration ont un caractère polluant avec des effets nocifs pour les organismes vivants. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule, c'est le cas, entre autre, du Plomb, du Mercure , du Cadmium (Nareshkumar et *al*., 2015).

Tableau 1: Liste de quelques métaux lourds (Essentiel ou Toxique) selon leur densité (Bliefert et Perraud 2001).

Métal	**Plantes**		**Animaux**		**Densité (en g/cm^3)**
Platine (Pt)		T			21,4
Mercure (Hg)		T		T	13,59
Plomb (Pb)		T		T	11,34
Molybdène (Mo)	E		E	T	10,2
Cuivre (Cu)	E	T	E	T	8,92
Nickel (Ni)		T	E		8,90
Cobalt (Co)			E		8,9
Cadnium (Cd)		T		T	8,65
Fer (Fe)	E		E		7,86
Selenium (Sn)			E		7,28
Chrome (Cr)			E		7,2
Manganèse (Mn)	E	T	E		7,2
Zinc (Zn)	E	T	E		7,14
Vanadium (V)	E		E		5,96

I.1.2. Origine des métaux lourds dans les sols

Les métaux sont présents à l'état de trace de façon naturelle dans les sols, selon leurs caractéristiques géologiques (concentration pédo-géochimique naturelle) et les activités humaines (qu'elles soient domestiques, industrielles, agricoles ou minières) influencent par ailleurs les concentrations par dépôts des poussières sur les sols et les eaux (Benjamin et Tara, 2020).

De par leur persistance, leur toxicité et la progression de leurs teneurs dans l'environnement, les métaux représentent une des plus importantes problématiques de pollution environnementale au niveau mondial (Aricia et Bruno, 2013).

D'après (Aricia et Bruno, 2013), le Cadmium, le Cuivre, le Chrome, le Nickel, le Plomb et le Zinc sont principalement présents sous forme de traces dans l'environnement et sont qualifiées comme éléments-traces métalliques ou ETM.

I.1.2.1. Origine naturelle

La présence des ETM dans les sols est due à différentes sources : endogènes ou exogènes. Les concentrations en ETM dits endogènes, c'est-à-dire liés à l'évolution géologique et pédologique du matériau parental en absence de tout apport d'origine humaine, constituent le fond pédo-géochimique naturel. Ce fond varie grandement en fonction de la nature du matériau parental des sols, de l'histoire géologique locale, du type et de la durée de la pédogenèse (Zorrig, 2010).

I.1.2.2. Origine anthropique

L'inquiétude sur les pollutions des sols par l'anthropisation est née de la forte augmentation des contaminations liées au développement agro-industriel de notre société. Ce développement a induit le relargage important de composés minéraux et notamment les éléments en trace, la plupart du temps présents sous forme immobile, vers les écosystèmes, sans qu'ils soient éliminés par les processus de biodégradation et d'épuration (Bourrelier, 1998 ; HEMEIR, 2015).

Les sources de pollutions liées aux activités anthropiques sont diverses, allant de la pulvérisation sous forme de pesticide dans l'agriculture, à l'extraction minière, et au dépôt atmosphérique sur le sol, sans être exhaustif (Navel, 2011) fonderies, combustions et incinérateurs des déchets (Nagajyoti et *al*., 2010).

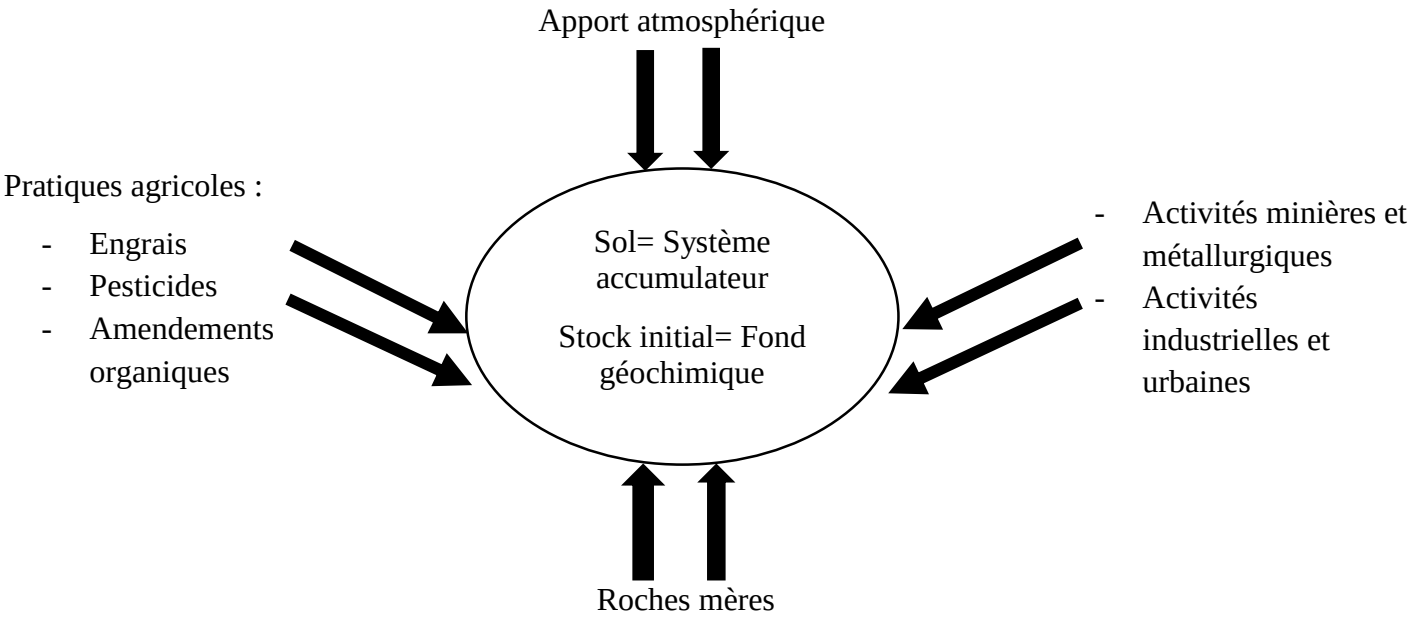


Figure 1: Origine de la contamination du sol par les métaux lourds (Kopittke et Menzies, 2006 ; Héimer, 2015).

I.1.3. Interaction entre les métaux

Plusieurs métaux se retrouvent en même temps dans des sols pollués. Cette coexistence peut jouer un rôle dans l'intensité de leur zoo-toxicité (microorganismes du sol, faune du sol). En effet, le danger des métaux réside non seulement dans les dommages cellulaires qu'ils peuvent occasionner, mais également dans les déséquilibres nutritionnels qu'ils peuvent provoquer en entrant en compétition avec d'autres éléments essentiels (Bliefert et Perraud, 2001).

Le Cuivre, le nickel et le cadmium peuvent provoquer des carences en d'autres cations (Ca, Mg, Mn, Fe, Zn) en interagissant avec ces derniers au niveau des racines des plantes. Cela provoque des dégâts physiologiques (retard de la germination, inhibition de la croissance) (Arduini et *al*., 1998 ; Yusuf et *al*., 2011 ; Aricia et Bruno, 2013).

I.1.4. Mobilité et biodisponibilité des éléments-traces métalliques

La teneur totale d'un élément donne une idée du « stock» total de l'élément à un moment donné. Cependant, cela ne donne aucune information sur le réel danger des ETM lié à leur mobilité dans le sol et leur biodisponibilité pour les organismes vivants (Aricia et Bruno, 2013).

La mobilité d'un élément est sa capacité à passer d'un compartiment du sol à un autre (formes échangeables, minéraux, oxydes/hydroxydes, molécules organiques) (Lebourg et *al*., 1996).

La forme chimique des ETM affecte leur mobilité dans les sols et leur capacité de transfert dans les différents compartiments environnementaux. La mobilité correspond à l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie vers un autre compartiment où il est retenu avec une énergie moindre (Juste, 1988). Elle peut être étudiée au travers du changement de phase porteuse d'un élément (Thorne et *al*., 2013). A l'échelle d'un sol, la mobilité d'un élément peut être évaluée en étudiant sa distribution verticale ou latérale.

La notion biodisponibilité des ETM est la capacité de ce même élément à passer d'un compartiment du sol vers le vivant (Juste, 1988 ; Godden et Colinet, 2010). Elle dépend d'une part, de la fraction de l'élément qui peut être mobilisée physico chimiquement dans le sol et d'autre part, de la capacité d'une espèce donnée à l'absorber (Sigel et *al*., 2005).

C'est ainsi qu'une teneur totale d'un élément donné dans le sol peut être excessive mais, si la biodisponibilité est restreinte, le danger lié à l'absorption par la plante de cet élément s'en voit diminué. De nombreux paramètres influencent la mobilité des métaux dans le sol et les plus notoires sont le pH, le potentiel redox, la quantité et la composition de la matière organique, la capacité d'échange cationique, la température et l'activité microbiologique (Aricia et Bruno, 2013).

I.1.5. Cas du Cuivre

I.1.5.1. Cuivre dans l'environnement

Le Cuivre est présent dans la croûte terrestre à des concentrations comprises entre 25 et 75 mg / kg, en moyenne 55 mg / kg et son modèle d'abondance dans les roches montre la tendance à la concentration dans les roches ignées volcaniques et dans les sédiments argileux (Héimer, 2015).

Le Cuivre révèle une forte affinité pour le soufre, d'où ses principaux minéraux sont la chalcopyrite ($CuFeS_2$) bornite (Cu_5FeS_4), chalcocite (Cu_2S), et covellite (CuS). Au cours de l'altération des sulfures de Cuivre, Cu est incorporé dans l'oxyde et le carbonate de minéraux dont la cuprite (Cu_2O) ; tenarite (CuO) malachite Cu_2CO_3 $(OH)_2$ et l'azurite $Cu_2(CO_3)_2$ $(OH)_2$ sont les plus communs (Kabata et Pendias, 2001).

Certaines activités anthropiques sont à l'origine d'un enrichissement des sols en éléments en traces métalliques comme le cadmium (Cd), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et (Cu). Parmi les sources industrielles et urbaines de contamination des sols en Cu, l'activité minière et le traitement des minerais, l'utilisation d'installations électriques (câblages) en Cu ainsi que la production et l'incinération des déchets municipaux provoquent une pollution localisée des sols (Kabata et Pendias, 2001).

D'autre part, l'épandage de boues de station d'épuration, de déchets municipaux et de déjections animales (volailles, porcs, bovins), pouvant contenir des éléments en traces métalliques comme Cu, peuvent provoquer une pollution diffuse des terres agricoles (Bourrelier, 1998 ; Nweke et *al*., 2017).

I.1.5.2. Cuivre dans les sols

Les valeurs générales pour les teneurs moyennes en Cu total dans les sols des différents groupes partout dans le monde entre 14 et 109 mg / kg (Kabata et Pendias, 2001).

Dans les sols, le Cuivre se retrouve, comme les autres éléments traces, au sein des différents constituants des sols, dans la matière organique plus ou moins humifiée ou dans la biomasse microbienne. La fraction la plus accessible à la solution du sol sera celle adsorbée à la surface de chacun de ces constituants (Baise et Paquereau, 1997).

Les contenus de Cuivre sont étroitement associés à la texture du sol et sont généralement les plus faibles dans les sols sableux légers et les plus élevés dans les sols limoneux. La régularité à grande échelle de l'apparition du Cu dans les sols indique que deux facteurs principaux, matériau originel et les processus de formation du sol, gouvernent le statut initial du Cu des sols. En outre, la fraction d'argile contribue de manière significative à la teneur en Cu de sols. Autres propriétés du sol, tels que les oxydes de Fe et Mn, et la saturation en bases, expliquent environ 15-25% de tous les facteurs d'impact (Kabata et Pendias, 2001).

I.1.5.3. Cuivre dans les plantes

L'absorption de Cu à l'intérieur des cellules racinaires semble néanmoins dépendre de transporteurs spécifiques (Copper Transporter) de la membrane plasmique présentant une haute affinité pour Cu^{+}. (Puig et *al*., 2007). D'autre part, Cu est très fortement lié aux groupes fonctionnels de l'apoplasme dans les racines (Mengel et Kirkby, 2001).

Cet oligoélément n'est requis qu'en très faible quantité et les teneurs adéquates de Cu dans les parties aériennes s'élèvent à 5-15 mg kg^{-1} de matière sèche suivant le stade de développement et l'espèce considéré et au de ce seuil, Cu peut être zoo toxique (Macnicol et Beckett, 1985).

Le Cuivre peut ainsi être adsorbé sous forme cationique par les charges négatives des groupes fonctionnels des parois cellulaires qui sont déprotonés à pH neutre ou alcalin. Lors de la translocation vers les parties aériennes, Cu serait principalement transporté dans le xylème complexé par des acides aminés (Pich et Scholz, 1996) et des acides organiques (Puig et *al*., 2007).

Etant donné que les propriétés redox de Cu et ses fortes capacités de complexation, Cu est normalement présent à l'intérieur des cellules, dans le cytoplasme et principalement dans la vacuole, sous forme de complexes avec des chélateurs capables de tamponner la concentration en espèce ionique libre : anions organiques (citrate, malate), acides aminés (histidine, nicotianamine), métallothionéines et phytochélatines (Clemens, 2001; Ducic et Polle, 2005).

I.1.5.4. Mécanismes d'adaptation des plantes au Cuivre

Le Cuivre est légèrement mobile dans les plantes comme il est fortement lié par l'azote et les protéines. Le cuivre a une forte affinité pour les groupes sulfhydriles et peptidiques, et donc à des protéines riches en cystéine, ainsi que également des groupes carboxyliques et phénoliques (Mengel et Kirkby, 2001).

Par ailleurs, Cu a un effet marqué sur la formation et la composition chimique des parois cellulaires via son rôle direct dans la biosynthèse de la lignine. D'ailleurs, chez des plantes souffrant de déficience en Cu sévère, les vaisseaux du xylème sont insuffisamment lignifiés (Marschner, 2012).

Face à ce stress, la stratégie classique de défense de la plante consistera, pour limiter l'absorption du polluant d'un côté et pour augmenter la tolérance à celui-ci de l'autre, à mettre en œuvre d'une part des processus physiques (fermeture des stomates, chutes de feuilles...) et d'autre part des facteurs chimiques et biochimiques (fabrication de précipités insolubles, détoxification par émissions de formes réduites par les feuilles, dégradations enzymatiques, rôles des systèmes antioxydants (Paul-André et al., 2012).

I.1.5.5. Déficience et excès en Cuivre

La carence en Cuivre est souvent rencontrée dans les sols organiques et expliquée par le fait que le Cuivre est plus rapidement adsorbé par la matière organique du sol que les autres éléments. Un pH élevé peut aussi induire un stress nutritionnel en Cuivre notamment au-dessus du pH 7 (El Alaoui, 2007).

Avec un déficit en Cu, une plante peut pousser pour un court laps du temps, mais il sera un échec dans la redistribution de Cu à partir de feuilles âgées et les racines provoquant la chlorose et la nécrose des pointes dans les nouvelles feuilles, connus comme des symptômes de carence en Cu et affecte fortement les processus physiologiques et par conséquent la production des plantes (Kabata et Pendias, 2001).

Les applications du Cuivre minéral au sol comme $CuSO_4$ ou sous forme d'oxyde, ou des composés métalliques à libération lente, les boues d'épuration ou les engrais sont souvent adaptés pour les effets à long terme. L'utilisation d'engrais contenant du Cu peut augmenter la concentration du Cu des parties comestibles des cultures où il y a des carences alimentaires de Cu chez les humains et le bétail (White et Broadley, 2009).

Un excès de Cu dans le milieu environnant induit une rhizotoxicité visible au travers d'un épaississement et d'une coloration brune des racines, de la diminution de la ramification et du nombre de poils racinaires et de l'élongation racinaire globale. Des lésions de l'épiderme sont également observées ainsi qu'un épaississement des apex et des dommages occasionnés sur les méristèmes (El Alaoui, 2007). Sa phytotoxicité semble altérer l'intégrité des membranes plasmiques des cellules racinaires et affecter la perméabilité membranaire provoquant ainsi la perte d'ions (K^+, HPO_4^{-2}) et de solutés. La correction de l'excès de Cuivre se fait par l'application de chaux, aussi on y remédie par l'amendement organique (Michaud, 2007).

I.1.6. Cas du Nickel

I.1.6.1. Sources et quantités de nickel dans l'environnement

La source la plus importante du nickel dans l'environnement provient des activités anthropiques. La production minière, la métallurgie et l'industrie de galvanisation constituent également des sources de pollution relativement importantes (W.H.O., 1991). Cependant, il semble que les quantités de Ni d'origine anthropique reçues par les sols soient relativement faibles (Uren, 1992).

La plus grande partie du nickel provient des roches magmatiques, associé à des silicates ferromagnésiens dit ultrabasiques (pauvres en silice, moins de 44 %), essentiellement les péridots (nésosilicates ferromagnésiens), également les serpentines (phyllo silicates ferromagnésiens, dérivant en particulier des péridots), ou encore les pyroxènes. Les teneurs élevées en Ni trouvées dans ces roches (environ 0,3%) seraient dues pour une grande part au fait que le rayon ionique de Ni2+ (70 pm) est très proche de celui de

Mg2+ (72 Pm), si bien qu'il pourrait y avoir substitution de Mg par Ni (Nalovic et Quantin, 1972; Manceau, 1984; Uren, 1992).

La majorité des sols cultivables en contiennent naturellement 1 à 390 ppm de nickel, avec une moyenne de 25 ppm (Holmgren et *al*., 1993). Cependant, les sols dérivés des roches ultrabasiques, comme les péridotites et les serpentines, peuvent en contenir plus de 7000 ppm (Brooks, 1987), voire jusqu'à 20 000 pprn (Lathari et *al*., 1978).

I.1.6.2. Biodisponibilité du nickel dans les sols

La biodisponibilité d'un élément du sol pour la plante est souvent associée à l'échangeabilité, l'assimilabilité, la disponibilité de cet élément dans les compartiments du sol. En fait, il semble qu'il faille distinguer deux concepts (Juste, 1988) L'absorption de Ni dépend des formes sous lesquelles il existe dans le sol. Le pH est très certainement le facteur d'influence le plus important (Anderson et Christensen, 1988)

I.1.6.3. Effets du nickel sur les plantes

Plusieurs travaux tendent à prouver que le nickel est un élément essentiel au développement des végétaux supérieurs (Dixon et *al*., 1975). Sa carence perturbe le cycle complet de l'orge et empêche la production de grains (Brown et *al*., 1987) mais il semble en effet que ce soit un des métaux qui pose le plus fréquemment des problèmes de phytotoxicité (Foy et *al*. 1978 ; Angelone et Bini, 1992).

Un des premiers effets toxiques du nickel au niveau des parties aériennes se manifeste par un ralentissement de leur croissance, ce qui est très difficile à remarquer en plein champs. Chez les dicotylédones les symptômes sont en général des chloroses en tâches, souvent entre les nervures foliaires, ressemblant aux sympt8mes de déficience en manganèse (Hewitt, 1953 ; Vanselow,1966 ; Mishra et Kar, 1974). Des déformations des tiges et des feuilles peuvent apparaître, ainsi qu'un épaississement des feuilles (Frank et *al*., 1982).

Le nickel en excès ralenti également la croissance des parties aériennes. Setia et *al*. (1988) ont observé une diminution de la longueur des entre-nœuds et de l'épaisseur des feuilles chez le blé. I1 semble que la croissance des feuilles soit davantage diminue que celle des tiges (Estar et *al*., 1988; Salim et *al*., 1988). L'inhibition de la croissance des parties aériennes aboutit généralement à une forte diminution, voire un arrêt de la production de la plante (Frank et *al*., 1982).

I.1.6.4. Mécanismes de résistance des plantes au Nickel

Seules les espèces accumulatrices de nickel, généralement autochtones et souvent endémiques, fournissent des résultats intéressants dans ce domaine et ils peuvent tolérer des teneurs en nickel très élevées par

l'intervention des acides organiques comme complexant semble donc prépondérante (Jaffré et Schmid, 1974).

Par ailleurs, il a été montré que Ni est essentiellement localisé dans la vacuole de souches de champignons Saccharomyces et il semble complexé à l'histidine (Juste et *al*., 1992)

I.2. Généralités sur le *Cajanus cajan* (L) et l'*Eleusine coracana* (L)

I.2.1. Généralités sur le *Cajanus cajan*

1.2.1.1. Description du *Cajanus cajan*

Le *Cajanus cajan* est un arbuste érigé de la famille de Fabaceae très souvent cultivé comme plante annuelle et apprécié par l'agriculture africaine grâce à son valeur nutritive, intérêt agronomique et adaptabilité aux conditions climatiques (Hyppolite, 2017).

Le *Cajanus cajan* a une tige côtelée de nombreuses branches. Les feuilles sont trifoliées et disposées en spirales sur les tiges; les folioles sont pubescentes sur les deux faces, leur forme est lancéolée à elliptique avec une longueur de 2 à 8 cm (Duke, 1981). Les fleurs sont bisexuées et autogames et c'est aussi une plante photopériodique.

Le fruit du *Cajanus cajan* est une gousse plate, droite, pubescente, de 5-9 cm de long et 12-13 mm de large. Il contient 2 à 9 graines de couleur brune, rouge ou noire, petites et parfois à enveloppe dure (Azene, 2007).

1.2.1.2. Origine et répartition géographique du *Cajanus cajan*

Le *Cajanus cajan* est originaire de l'Inde, où sa culture remonte à des milliers d'années. Il est arrivé en Afrique vers 2000 av. J.-C. ou même avant et un centre secondaire de diversité s'est développé en Afrique de l'Est. Avec les conquêtes et la traite des esclaves, il a gagné les Amériques, probablement aussi bien via l'Atlantique que le Pacifique (Hyppolite, 2017).

De nos jours, il est cultivé dans l'ensemble des régions tropicales, mais c'est surtout dans le sous-continent indien et en Afrique de l'Est qu'il est important (FAO, 2003).

1.2.1.3. Ecologie du *Cajanus cajan*

Le *Cajanus cajan* est cultivé dans les régions tropicales et subtropicales, le plus souvent comme plante annuelle. Cependant, il supporte la sécheresse et peut être cultivé dans des régions où les précipitations sont inférieures à 600 mm. Il pousse également dans des régions où les précipitations annuelles varient de 1000 à 2000 mm, mais craint l'eau stagnante. Il s'adapte à une large gamme de sols et supporte très bien les vertisols. Il est souvent cultivé sur des sols pauvres et tolère la salinité et l'alcalinité, mais pas une forte acidité (pH <5) (Mula et Saxena, 2010).

Le *Cajanus cajan* a une croissance rapide, il est rustique, largement adaptable et résistant à la sécheresse (Azene, 2007). L'insolation et la température influencent la croissance et la floraison de la plante. La plante et particulièrement les variétés traditionnelles à cycle long s'accommode d'une faible insolation avant la floraison ; ce qui explique sa grande capacité à s'associer aux autres cultures. Par contre la plante exige pleine insolation à la fructification (Déo, 2002).

1.2.1.4. Multiplication du *Cajanus cajan*

Cette plante comme les autres fabacées se multiplie habituellement par graine, son développement végétatif démarre lentement et s'accélère deux à trois mois après le semis. Selon les variétés, les graines atteignent leur maturité entre 180 à 280 jours après le semis et ses graines germent à des températures comprises entre 19–43°C, mais le plus rapidement à 20–30°C (Caburet et Hekimian, 2002) .

1.2.1.5. Utilité du *Cajanus cajan*

Le *Cajanus cajan* a de nombreuses utilisations dans l'alimentation humaine. Ses feuilles et gousses constituent un fourrage riche en protéines, précieux et appétissant Ses graines constituent une source importante de protéines et contient de 12,4 à 29,6% (Mula et Saxena, 2010) et elles peuvent être données aux volailles (Orwa et *al*., 2009).

En Afrique, les graines sèches de *Cajanus cajan* s'emploient souvent dans des sauces en accompagnement d'aliments de base comme le manioc, l'igname et le riz. Les graines mûres se consomment comme frites ou cuites à l'eau, souvent après trempage, ou bien on les fait cuire en bouillie. La consommation des pois et des gousses immatures comme légume, en soupe ou en sauce, est courante dans de nombreux pays africains (Azene, 2007).

Le *Cajanus cajan* est également utile pour les haies et les brises-vent sur sols secs, ainsi que dans des systèmes agroforestiers (Duke, 1981).

1.2.1.6. Maladies et ravageurs pour le *Cajanus cajan*

Les maladies fongiques du *Cajanus cajan* les plus importantes sont la cercosporose (*Mycovellosiella cajani*), la fusariose (*Fusarium udum*) et l'oïdium (*Leveillula taurica*). Dans les régions sèches, la cercosporose n'a qu'un faible impact mais dans les régions humides elle peut être à l'origine de graves pertes. Les insectes ravageurs les plus importants sont les punaises suceuses de gousses (*Clavigralla* spp.), les foreurs de gousses (*Helicoverpa armigera* et *Maruca vitrata*,) et les mouches des gousses (*Melanagromyza chalcosoma*) (Corriher et *al*., 2010).

Les mesures de lutte préconisées contre la fusariose, propagée par la graine et par le sol, sont la culture associée, la rotation avec des céréales, la jachère, l'élimination des plantes malades et des insectes, le traitement des semences aux fongicides (Orwa et *al*., 2009).

I.2.2. Généralités sur l'*Eleusine coracana (L.)*

I.2.2.1. Description de l'*Eleusine coracana*

L'*Eleusine coracana* est une herbe annuelle érigée qui peut atteindre la hauteur de 20 à 60 cm à sa maturité. Sa tige est aplatie latéralement et les feuilles, au vert brillant très résistantes. Les grains d'Eleusine sont inhabituels en ce sens que la couche externe (le péricarpe) n'est pas fusionnée et facilement retirée du manteau de semence (Shobana et Malleshi, 2007).

L'*Eleusine coracana* est parmi les plantes photosensibles (optimum de 12 h) avec un cycle variant de 3 à 6 mois. Son développement est fonction de la saison de culture mais aussi des propriétés du sol. Les inflorescences sont digitées, avec 4 à 6 doigts pour la plupart de 12 à 15 cm de long, droits ou légèrement incurvés (Olivier et *al*., 2012).

I.2.2.2. Origine et répartition de l'*Eleusine coracana*

L'*Eleusine coracana* est originaire d'Afrique de l'Est (Ouganda, Ethiopie) où elle est cultivée depuis l'âge de bronze. C'est une importante culture de base dans de nombreuses régions d'Afrique et a été cultivée en Afrique orientale et australe. Avant l'introduction du maïs, il s'agissait de la culture de base de la région de l'Afrique australe (Bastola et *al*., 2015).

Elle se trouve dans les régions tempérées chaudes du monde d'Afrique, au Japon et aussi en Australie. Il est présent dans les archives archéologiques de l'agriculture africaine au début de l'Afrique en Ethiopie qui remonte à 5000 ans, et provient probablement de quelque part dans la région aujourd'hui Ouganda (Hittalmani et *al*., 2017).

I.2.2.3. Ecologie de l'*Eleusine coracana*

L'*Eleusine coracana* se trouve dans des régions où les précipitations ne dépassent pas 300 mm par an, mais la forme cultivée nécessite plus couramment des précipitations de 500 à 1 000 mm. Ces précipitations doivent être bien réparties tout au long de la saison de croissance, sans sécheresse prolongée. L'*Eleusine coracana* tolère les climats frais, mais prospère dans des conditions chaudes et peut pousser là où les températures atteignent 35^{o}C (Hittalmani et *al*., 2017).

L'*Eleusine coracana* est assez peu compétitive vis-à-vis des adventices. En cas de forte pression, elle nécessite un travail de désherbage. Cette plante ne nécessite pas de fertilisation particulière. Elle bénéficie

de la fertilisation apportée à la culture à laquelle elle est associée. Toutefois, sur sol carencé en éléments nutritifs (Azote, Phosphore et Potassium), un apport de ces éléments est nécessaire pour une bonne croissance de l'éleusine (Dida et *al*., 2008).

1.2.2.4. Multiplication de l'*Eleusine coracana*

La multiplication de l'*Eleusine coracana* se fait par semis de ses graines et peut se faire en poquets, en lignes ou à la volée. Pour un semis à la volée un passage de rouleau est recommandé pour assurer un bon contact des graines avec le sol. Pour un semis en lignes ou en poquets, les graines d'éleusine qui sont très petites ne doivent pas être placées trop profond et rester entre 0,5 et 1 cm de profondeur (Goswami et *al*., 2015). L'espacement entre lignes ou entre poquets peut se faire à densité variable. Plus la densité est élevée, plus la couverture du sol est rapide. Les lignes et les poquets peuvent donc être espacés de 20 à 50 cm. Cet espacement de l'éleusine dépend avant tout de l'agencement de la plante à laquelle elle est associée (Devi et *al*., 2014).

I.2.2.5. Utilité de l'*Eleusine coracana*

L'*Eleusine Coracana* joue un rôle important dans l'alimentation humaine, tant en Asie qu'en Afrique et particulièrement dans les régions pauvres. Ses graines se conservent pendant plusieurs années et peuvent rendre de grands services comme aliment en période de disette (Gayte-Sorbier et *al*., 1960).

Son grain est riche en protéines (6 à 14%), huiles (1 à 1,4%), acides aminés essentiels (dont la méthionine, 3%) et éléments minéraux. Il peut être consommé en farine, ou utilisé pour la production d'alcool.

L'éleusine représente ainsi un aliment de réserve essentiel pour faire face aux périodes de famine. De plus, l'éleusine est une plante diurétique et vermifuge, aussi utilisée à la lutte contre la lèpre, la pneumonie, la variole, la rubéole et les maladies du foie (Goswami et *al*., 2015).

Sur le plan environnemental, l'éleusine est avant tout intéressante pour sa production rapide de biomasse et son système racinaire puissant, ce qui lui permet d'«injecter» dans le sol de la matière organique, contribuant à la séquestration rapide du carbone. La paille d'*Eleusine coracana* peut être utilisée comme fourrage, avant maturation des graines car sa qualité baisse rapidement après maturation (Olivier et *al*., 2012).

I.2.2.6. Maladies et ravageurs l'*Eleusine coracana*

L'éleusine est beaucoup moins sensible aux pestes et aux maladies que les autres plantes à graines. Elle ne nécessite pas de traitement phytosanitaire particulier. A noter toutefois que l'éleusine est une plante hôte de diverses espèces de pyriculariose, dont *Pyricularia oryzae* et *Pyricularia grisea* (Adebowale et *al*., 2005).

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODE

II.1. Matériel végétal

Les espèces végétales utilisées dans cette étude sont le *Cajanus cajan* et l'*Eleusine coracana*. Les semences ont été récoltées sur la colline Buhinga de la commune Musongati. Les graines de ces plantes ont été sélectionnées et étaient toutes de même couleur et de même taille.

II.2. Matériel sol

L'échantillon du sol utilisé dans cette étude a été collecté dans l'un des parcelles de Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie de l'Université du Burundi. Le prélèvement correspond à une couche superficielle du sol de 0-25 cm. Le sol a été séché, mélangé et broyé pour le rendre homogène. L'analyse de ce sol a été effectuée par le laboratoire d'analyse des sols et produits agro-alimentaires de l'ISABU au mois de septembre 2022 et ses paramètres physicochimiques sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2: Caractéristiques chimiques et physico-chimiques du substrat de sol utilisé

Paramètre mesuré		Valeur
pH	Eau	6,52
	kcl	5,44
CE (ds/m)		0,048
P (mg/kg)		9,28
C (%)		1,84
N (%)		0,177
K (méq/100g)		0,46
Ca (méq/100g)		2,35
Mg (méq/100g)		2,17
CEC (méq/100g)		7,82
C/N		10,4
Al^{3+} + H^{+} échangeable (méq/100g)	Al^{3+}	0
	AT	0,263
	A^{H+}	0,263
Sable	1000µ	1,99
	500µ	9,73
	250µ	7,66
	100µ	36,9
	50µ	10,8
Limon	L.G	11,2
	L.F	5,52
Argile		16,2

II.3. Matériel Métal

L'étude expérimentale a été réalisée avec le Cuivre sous forme de sels de Nitrate de Cuivre tri hydraté et du Nickel sous forme de sels de Nitrate du Nickel hexa-hydraté, en provenance du laboratoire de chimie de l'Université du Burundi. Six doses de ces deux métaux dont 10 mg/l (Dose 1), 20 mg/l (Dose 2), 40 mg/l (Dose 3), 80 mg/l (Dose 4), 160 mg/l (Dose 5) et 320 mg/l (Dose 6) ont été préparées et utilisées pour amender le milieu de culture. En fonction de la masse molaire de chaque métal, ces doses correspondent respectivement avec 38,019 mg/l (Dose 1), 76,039 mg/l (Dose 2), 152,078 mg/l (Dose 3), 304,157 mg/l (Dose 4), 608,315 mg/l (Dose 5) et 1216,630 mg/l (Dose 6) pour le Nitrate du Cuivre et 49,547 mg/l 99,094 mg/l 198,189 mg/l 396,378 mg/l, 792,756 mg/l, 1585,513 mg/l pour le Nitrate de Nickel.

II.4. Préparation du milieu de culture

Lors de notre étude, deux types de milieu de culture ont été utilisés pour la réalisation de cette étude. Le premier est préparé dans les boites de pétri pour l'analyse de la germination et le second dans les pots en polyéthylène pour l'analyse de la croissance et le développement de ces plantes.

Pour l'analyse de la germination, le matériel utilisé était composé par les boites de pétri de 90mm de diamètre sur 14mm de hauteur, le papier filtre et l'eau distillée. La quantité d'eau utilisé pour faire mouiller le papier filtre pour ce milieu de culture est constant de 20 ml pour toutes les doses. L'expérience a été réalisée au laboratoire de botanique de l'Université du Burundi.

Quant à l'analyse de croissance et développement, le matériel de culture comprenait des pots en polyéthylène de 18 ,5 cm de hauteur et 17,19 cm de diamètre et le substrat du sol.

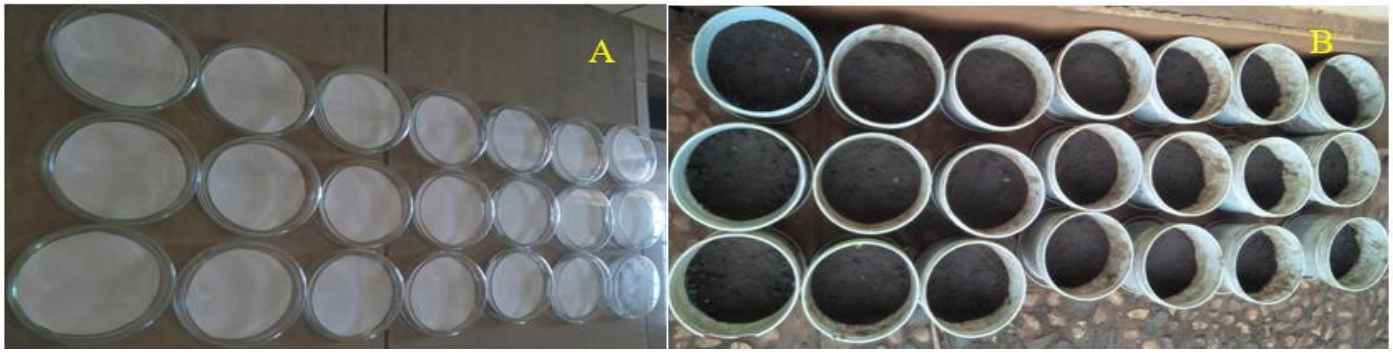


Figure 2: Dispositif de milieu de culture utilisé, boites de pétri (A) et pots en polyéthylènes (B)

II.5. Préparation de la solution du Cuivre et du Nickel

Pour le milieu de culture en boite de pétri, la masse du Cuivre prélevée est introduite dans un volume d'eau constante de 20 ml. Cette solution a été versée dans les boites de pétri. La variation de la masse du Cuivre en fonction de la dose utilisée est montrée dans le tableau 3.

Tableau 3: Variation en dose du Cuivre et du Nickel utilisée pour le test de germination

No	Concentration du métal(en mg/l)	Masse du métal prélevé (en g)		Volume d'eau distillé (en ml)
		Cuivre	Nickel	
D0	0	0	0	20
D1	10	0,76	0,99	20
D2	20	1,52	1,98	20
D3	40	3,041	3,96	20
D4	80	6,083	7,92	20
D5	160	12,166	15,85	20
D6	320	24,332	31,71	20

La dose zéro dans cette étude représente la dose témoin ou aucune quantité du métal n'est ajouté dans l'eau. Le tableau ci-dessus montre les valeurs de la quantité du Cuivre et du Nickel ajouté dans le milieu de culture (Boite de Petrie) et chaque masse pour chaque métal a été prélevée et introduite dans un volume constant d'eau distillée de 20 ml.

Tableau 4 : Variation en dose du Cuivre et du Nickel utilisé pour le test de croissance

No	Concentration du métal (en mg/l)	Masse du métal prélevé (en g)		Volume d'eau distillé (en ml)
		Cuivre	Nickel	
D0	0	0	0	50
D1	10	5,702	7,432	50
D2	20	11,405	14,86	50
D3	40	22,811	29,728	50
D4	80	45,623	59,456	50
D5	160	91,247	118,913	50
D6	320	182,494	237,827	50

La dose zéro représente toujours le témoin pour lequel aucune quantité du métal n'est ajouté. Le tableau ci-dessus montre la quantité du Cuivre et du Nickel ajoutée à chaque milieu de culture dont le pot polyéthylène. Ces quantités ont été prélevées et introduites dans les volumes d'eau de 50 ml et chaque solution a été mélangée avec 3 kg de sol en correspondance de chaque pot.

II.6. Protocole expérimental

L'expérience a commencé pour l'analyse du taux de germination, les boites de pétri munies du papier filtre ont été disposés sur la paillasse du laboratoire et la solution de chaque métal a été introduite selon les différents niveaux de traitement : D 0 pour le lot des doses témoin, D 1, D 2, D 3, D 4, D 5 et D 6 pour les autres lots (figure 3) respectivement avec les doses 0 mg /l, 10 mg /l, 20 mg /l, 40 mg /l, 80 mg /l, 160 mg /l et 320 mg/l pour chaque type de métal. Chaque niveau de traitement est constitué par la répétition de trois boite de pétri partageant la même concentration.

Pour l'analyse de croissance, la solution de chaque métal a été versée et mélangée avec le sol suivant les niveaux de traitement de 0 mg /kg pour le lot des doses témoins, 10 mg /kg, 20mg /kg, 40mg /kg, 80mg /kg, 160mg /kg et 320mg/kg pour les autres lots des doses différentes respectivement avec le niveau de chaque répétition. C'est après l'intoxication de ces milieux avec le Cuivre qu'on a appliqué le semis des graines.



Figure 3: Image illustrant les niveaux de répétition pour chaque dose

Les graines ont été lavées trois fois avec l'eau distillée et le semis dans les boites de pétri a été effectué le 3/10/2022 avec six graines de *Cajanus cajan* et douze graines de l'*Eleusine coracana* par boite de pétri.

Le semis dans les pots a été réalisé en date du 17/10/2022 avec le même nombre de graines que celui d'expérience précédente et sont semées dans chaque pot à une profondeur d'environ 3cm. L'arrosage se faisait de manière régulière avec l'eau de robinet pour éviter la fanaison des plantes dès le premier jour au 15ème jour et une fois les trois jours après cette période. Pour ne garder qu'une seule plante, le démariage a été effectué après 15jours et la plante la plus vigoureuse qui présente l'aspect morphologique de qualité a été maintenue dans chaque pot.

II.7. Relevé des donnés pour la germination

Les relevés des données ont été effectués dès le premier jour de germination par dénombrement des graines germées dans chaque milieu de culture jusqu'à l'enregistrement de deux comptages successifs, au cinquième jour, sans aucune germination pour tous les niveaux des doses.

Le taux de germination a été déterminé par le pourcentage de graines germées qui est par le rapport entre le nombre de graines germées par le nombre total de graines (Don, 2003)

T = G / N * 100 ; d'où :

T : Taux de germination

G : Nombre de graines germées

N : Nombre Total des graines semées

II.8. Relevé des données pour la croissance et développement

Les relevés des donnés pour la croissance et développement ont été faits régulièrement après 15 jours durant toute la période végétative de 95 jours du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana*. Les paramètres communs analysés sont le nombre des feuilles, la hauteur des plants, la biomasse aérienne et racinaire tandis que les paramètres distincts analysés sont le nombre des nœuds et des feuilles tombées pour le *Cajanus cajan* et le nombre des gaines pour l'*Eleusine coracana*.

II.8.1. Nombre de feuilles

Une feuille est une expansion latérale de la tige des plantes, caractérisée par sa forme aplatie, sa symétrie bilatérale et sa croissance limitée dans le temps et l'espace. Ce paramètre consistait à compter le nombre de feuille fixée et tombée lors de la croissance d'une plante durant toute la période de l'expérience.

II.8.2. Nombre de nœuds

Les nœuds sont les endroits de la tige à partir desquels se développent les bourgeons, les feuilles et les rameaux. Ce paramètre consiste à dénombrer les nœuds que la plante du *Cajanus cajan* a eus durant la période de l'analyse.

II.8.3. Hauteur de plantes

La hauteur des plantes est la partie intermédiaire entre la base et le point final de la plante. Elle est mesurée à l'aide d'une règle de mesure graduée (exprimée en Cm).

II.8. 4. Biomasse aérienne et racinaire

La Biomasse aérienne qui est la partie aérienne de la plante séparée de la partie racinaire a été mesurée à l'état humide à l'aide d'une balance très sensible. Cette partie a été séchée à l'étuve à 65^0C pendant 48 heures pour la mesure de biomasse sèche.

La partie souterraine de la plante constitue la biomasse racinaire et dans notre expérience, nous avons mesuré le poids de la biomasse racinaire pour chaque plante à l'état humide et à l'état sec après le séchage à l'étuve.

II.9. Enregistrement et traitement des données

Les données ont été enregistrées sur les fiches de suivi des milieux de cultures et les photos ont été prises à l'aide d'un appareil téléphonique de marque OPPO A94t de 32GB ROM et 3GB RAM. La saisie et le traitement des données ont été effectués par la machine ordinateur avec le logiciel Microsoft Office (Excel et Word) et le SPSS. Des résultats sont présentés graphiquement et exprimés en moyenne avec un l'analyse de variance calculé à un intervalle de confiance de 95 %.

CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1. PRESENTATION DES RESULTATS

III.1.1. Germination du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre et du Nickel

Les résultats d'analyse de la germination du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre et du Nickel montrent que le taux de germination a diminué en fonction de l'augmentation de leurs concentrations. L'analyse de la variance (ANOVA) journalière de leurs doses, montre que les différences entre les moyennes de la germination du *Cajanus cajan* exposé au Cuivre ne sont pas statistiquement significative (p. Value>0,05) et pour le cas du Nickel il y a des différences significatives aux certains moyennes de germination (p. Value<0,05). Le test d'homogénéité a regroupé les résultats de germination du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre en trois différents groupes statistiquement identiques et en cinq groupes à celui exposé au Nickel, tout cela selon le temps et les concentrations de ces différents métaux.

Tableau 5: Taux de germination du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre (a) et du Nickel (b).

Dose/Jour	(a)			T.G	(b)			T.G
0 mg/l	$5,3\pm0,5^{a}$	$5,3\pm0,5^{a}$	$5,3\pm0,5^{a}$	88,8%	$5,3\pm0,5^{a}$	$5,3\pm0,5^{a}$	$5,3\pm0,5^{a}$	88,8%
10 mg/l	$3,6\pm0,5^{ab}$	$5,3\pm0,5^{a}$	$5,3\pm0,5^{a}$	88,8%	$3,6\pm0,5^{ab}$	$4,0\pm1,0^{ab}$	$5,0\pm0,0^{ab}$	83,3%
20 mg/l	$2,6\pm2,0^{ab}$	$5,0\pm1,0^{a}$	$5,0\pm1,0^{ab}$	83,3%	$3,6\pm1,1^{ab}$	$4,3\pm0,5^{ab}$	$4,6\pm0,5^{ab}$	77,7%
40 mg/l	$4,3\pm0,5^{ab}$	$4,6\pm0,5^{a}$	$5,0\pm0,0^{ab}$	83,3%	$3,0\pm1,0^{bc}$	$4,3\pm0,5^{ab}$	$4,3\pm0,5^{ab}$	72,2%
80 mg/l	$3,3\pm1,5^{ab}$	$4,6\pm1,5^{a}$	$4,6\pm1,5^{ab}$	77,8%	$3,3\pm1,1^{bc}$	$4,0\pm1,0^{ab}$	$4,0\pm1,7^{abc}$	66,6%
160 mg/l	$3,0\pm2,6^{ab}$	$4,0\pm2,6^{a}$	$4,3\pm2,0^{ab}$	72,2%	$1,6\pm0,5^{c}$	$3,0\pm1,0^{bc}$	$3,6\pm0,5^{bc}$	61,1%
320 mg/l	$2,0\pm1,0^{b}$	$3,0\pm1,0^{a}$	$3,0\pm1,0^{b}$	50%	$1,6\pm1,1^{c}$	$2,3\pm0,5^{c}$	$2,7\pm0,5^{c}$	44,4%
P. Value	0,2	0,3	0,2		0,004	0,009	0,022	

Le tableau ci-dessus (Tableau 5) montre que le taux de germination du *Cajanus cajan* est de 88,8% dans le cas où aucun traitement entre ces deux métaux lourd n'est effectué et au traitement de 10mg/l de Cuivre. Avec l'augmentation des concentrations de ces métaux (Cuivre te Nickel), le taux de germination pour la plante traité avec le Cuivre a été diminué avec une amplitude variant de 5,5 à 5,6% pour le cas des doses avec concentration partant de 10 mg/l à 160 mg/l mais pour les doses de concentration de plus 160 mg/l, l'amplitude est plus étendue allant même de 22,2%. Pour le cas des doses avec concentration du Nickel partant de 10mg/l à 160 mg/l, le taux de germination du *Cajanus cajan* a été diminué avec une amplitude variant de 5,5 à 5,6 et pour le cas des doses avec la concentration de plus de 160mg/l, l'amplitude est de 16,7 ce qui est inférieur à celui du cas de Cuivre.

Le test d'homogénéité journalière regroupe les résultats de germination du *Cajanus cajan* traité avec le Cuivre en trois groupes dont a, ab et b statistiquement identiques. Au premier jour, trois classes montrant trois niveaux de germination du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre ont été observé dont (a) regroupant les résultats de germination sans traitement, (ab) regroupant les résultats de germination avec le traitement du Cuivre avec les doses allant de 10 à 160mg/l et (b) regroupant ceux traités avec la seule dose de 360mg/l. Pour le deuxième jour, un seul groupe présentant un seul niveau de germination (a) regroupe les résultats trouvés lors du traitement pour toutes les doses, ce qui montre qu'ils sont statistiquement tous identiques et pour le dernier jour, c'est le même cas au premier jour sauf seulement que la classe (a) regroupe les résultats du traitement de deux premières doses. Les tests d'analyse de la variance entre les groupes, montrent une différence significative au niveau des résultats trouvés pour les plantes traitées avec les doses de la concentration du Cuivre de plus de 160mg/l ce qui montre un effet significatif du Cuivre pour la germination du *Cajanus cajan* au niveau des doses de 320mg/l.

Pour le cas du Nickel, le test d'homogénéité journalière regroupe les résultats de germination en cinq groupes dont a, ab, abc, bc et c statistiquement identiques. Au premier et deuxième jour, quatre classes déterminant quatre niveaux de différence de groupes ont été observés dont (a) regroupant les résultats sans traitement, (ab) regroupant ceux des doses de 10 et 20mg/l, (bc) regroupant les résultats de germination traité avec les doses de 40 et 80mg/l ainsi que (c) qui regroupe ceux traités avec les doses de 160 et 320mg/l pour le premier jour. Mais pour le deuxième jour (ab) regroupe les résultats de germination traité avec les doses allant de 10 à 80mg/l, (bc) de 160mg/l et (c) regroupant ceux de 320mg/l. le troisième jour montre cinq groupe dont a, ab, abc, bc et c regroupant respectivement les résultats de la germination trouvée au niveau des doses témoin, 10 à 40mg/l, 80mg/l, 160mg/l et 320mg/l.

Les analyses statistiques montrent qu'il n'y a pas de différence significatif pour tous les jours de récolte des données (p value > 0,05) pour le cas du Cuivre mais qu'il y a de différence significatif pour le cas de traitement avec le Nickel. Cela montre que les valeurs des résultats trouvées sont extrêmes que ceux observées avec la probabilité de 95% pour le cas du Cuivre ce qui est le contraire à celui du Nickel.

Les tests d'analyse de la variance entre les groupes, montrent une différence significative au niveau des résultats trouvés pour les plantes traitées avec les doses de la concentration de plus de 80mg/l pour le Nickel et 320mg/l pour le Cuivre, ce qui montre un effet significatif du Nickel pour la germination du *Cajanus cajan* à partir des doses de 80mg/l et 320mg/l pour le traitement avec le Cuivre.

III.1.2. Germination d'*Eleusine coracana* sous l'effet du Cuivre et du Nickel

Pour la germination de l'*Eleusine coracana* sous l'effet du Cuivre et du Nickel, les résultats trouvés montrent que le taux de germination varie et diminue en fonction de l'augmentation de la concentration de ces métaux lourds sauf pour le cas du Nickel là où le taux de germination a augmenté jusqu'à certain seuil de l'augmentation de la dose de ce dernier. En effet, l'analyse de la variance des doses à chaque jour montre qu'il y a une différence significative (p value < 0,05) à chaque variable et le test d'homogénéité regroupe les résultats de germination d'*Eleusine coracana* sous le Cuivre en dix différents groupes statistiquement identiques et en six groupes pour ceux de la plante exposée au Nickel , tout cela selon le temps et les concentrations de ces différents métaux.

Tableau 6 : Taux de germination de l'*Eleusine coracana* sous l'effet du Cuivre (a) et du Nickel (b).

Dose/Jour	(a)			T.G	(b)			T.G
0 mg/l	$7,0\pm1,0^{ab}$	$9,3\pm1,5^{a}$	$10,6\pm1,5^{a}$	88,8%	$7,0\pm1,0^{a}$	$9,3\pm1,5^{a}$	$10,6\pm1,5^{a}$	88,8%
10 mg/l	$9,0\pm0,0^{a}$	$9,0\pm0,0^{a}$	$10,0\pm1,0^{a}$	83,3%	$9,0\pm2,0^{a}$	$10,3\pm2,0^{a}$	$11,0\pm1,0^{a}$	91,6%
20 mg/l	$5,3\pm1,5^{bc}$	$5,3\pm1,5^{b}$	$7,3\pm1,1^{b}$	61,1%	$6,6\pm2,5^{ab}$	$10,0\pm0,0^{a}$	$10,6\pm0,5^{a}$	86,1%
40 mg/l	$4,0\pm1,0^{cd}$	$4,3\pm1,1^{b}$	$5,6\pm2,0^{bc}$	47,2%	$4,0\pm1,0^{bc}$	$7,3\pm0,5^{b}$	$10,0\pm1,0^{a}$	83,3%
80 mg/l	$3,0\pm1,7^{de}$	$4,0\pm1,0^{b}$	$4,3\pm1,1^{c}$	36,1%	$3,6\pm0,5^{bc}$	$4,3\pm0,5^{c}$	$5,3\pm0,5^{b}$	44,4%
160 mg/l	$1,3\pm1,5^{ef}$	$1,3\pm1,5^{c}$	$1,6\pm1,1^{d}$	13,8%	$4,0\pm1,0^{bc}$	$4,3\pm1,1^{c}$	$5,3\pm1,1^{b}$	44,4%
320 mg/l	$0,0\pm0,0^{f}$	$0,6\pm1,1^{c}$	$1,0\pm1,7^{d}$	8,3%	$2,0\pm1,0^{c}$	$3,6\pm1,5^{c}$	$5,0\pm1,0^{b}$	41,6%
P. Value	0,00	0,00	0,00		0,001	0,000	0,000	

Comme le tableau (6) ci-dessus le montre, le taux de germination d'*Eleusine coracana* sans ajout du métal lourd est de 88,8%. Par contre, avec l'augmentation de la dose du Cuivre, le taux de germination a chuté progressivement de l'amplitude variant de 5,5% au premier dose de 10mg/l et une chute de 22,2 ; 13,9 ; 11,1 ; 22,3 et 5,7% respectivement avec l'augmentation des doses de 20 à 320 mg/l. Mais au cas du Nickel, le taux de germination a augmenté avec l'ajout de sa dose à 10mg/l même si pour d'autres doses on a remarqué des chutes d'amplitude de 5,5 ; 2,8 ; 38,9 et 2,8% respectivement avec l'augmentation des doses de 20 à 320mg/l.

Pour le premier jour de germination de l'*Eleusine coracana* sous l'effet du Cuivre, le test d'homogénéité regroupe les résultats en sept groupes statistiquement identiques dont le premier groupe (ab) correspond aux résultats de la dose témoin et le deuxième groupe (a) qui correspond aux résultats de la dose de 10 mg/l. Pour le cas des doses de 20 mg/l, les résultats sont regroupés dans le troisième groupe (bc) et (cd) pour le quatrième groupe avec la dose du Cuivre de 40 mg/l. Au cas des doses de 80 mg/l, 160mg/l et 320mg/l, les résultats sont groupés respectivement dans le cinquième (de), sixième (ef) et septième groupe (f).

Quant au deuxième jour, le test d'homogénéité regroupe les résultats dans trois groupes dont le premier groupe (a) qui correspond aux résultats des doses de 0mg/l et 10mg/l, le deuxième groupe (b) avec les résultats des doses de 20, 40 et 80mg/l et le troisième groupe qui correspond aux résultats avec les doses du Cuivre de 160mg/l et 320mg/l.

Et pour le troisième jour, des résultats sont regroupés dans cinq groupes différents dont le premier groupe (a) combine les résultats des doses de 0 et 10mg/l. Les résultats de la dose de 20mg/l correspondent au deuxième groupe (b) et les doses de 40 et 80mg/l correspondent respectivement au troisième groupe (bc) et quatrième (c) tandis que pour celles de 160 et 320mg/l sont regroupés dans le cinquième groupe (d).

La germination de l'*Eleusine coracana* avec le traitement du Nickel a montré le test d'homogénéité qui regroupe les résultats en quatre groupes identiques pour le premier jour notamment le groupe (a) qui combine ceux traités avec les doses 0 et 10mg/l, (ab) avec 20mg/l, (bc) avec les doses de 40 à 60mg/l et en fin (c) avec la dose de 360mg/l. Quant au deuxième jour, le test d'homogénéité regroupe les résultats de germination en trois groupes dont le groupe (a) qui combine ceux trouvés avec le traitement des doses 0, 10 et 20mg/l, (b) avec 40mg/l et (c) avec les doses allant de 80 à 360mg/l. Et au troisième jour, deux groupes statistiquement identiques ont été remarqués notamment le groupe (a) qui combine les résultats trouvés avec les doses de 0 à 20mg/l ainsi que (b) regroupant ceux des doses de 40 à 360mg/l.

Les analyses statistiques montrent qu'il y a pas de différence significatif pour tous les jours de récolte des données (p value < 0,05) pour le cas de tous métaux lourds. Cela montre que les valeurs des résultats trouvées ne sont pas extrêmes à ceux observées avec la probabilité de 95%.

Les tests d'analyse de la variance entre les groupes, montrent une différence significative au niveau des résultats trouvés pour les plantes traitées avec les doses de la concentration à partir de 80mg/l pour le Nickel et 40mg/l pour le Cuivre, ce qui montre un effet significatif du Nickel pour la germination du *Cajanus cajan* à partir des doses de 80mg/l et 40mg/l pour le traitement avec le Cuivre.

III.1.3. Effet du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance du *Cajanus cajan*

III.1.3.1. Hauteur de la tige du *Cajanus cajan*

Les résultats de croissance en hauteur du *Cajanus cajan* planté sur le sol traité par le Cuivre et le Nickel montrent que sa variation est en fonction du temps et des concentrations de ces éléments trouvés dans le sol.

La croissance du *Cajanus cajan* exposé au stress du Cuivre est exponentielle dès le jour de germination jusqu'au dernier jour d'expérience pour le cas du traitement avec les doses allant de 0 à 40mg/kg mais stoppé à un certain temps pour le cas des autres doses du Cuivre qualifiées les plus concentrés. Il en est de même

pour le cas du traitement avec le Nickel là où la hauteur de la plante est exponentielle dans le temps pour les doses considérées de faible concentration (de 0 à 40mg/kg) et ralentit voir même stoppée pour les doses soit disant de fortes concentrations (plus de 40mg/kg).

Avec le traitement du Cuivre, la croissance en hauteur était ralentie à partir du 25ème Jour avec la dose de 80mg/kg et la mort de la plante est survenue au 85ème Jour de même que celle traité avec la dose de 160mg/kg. Quant à la dose de 320mg/kg, la croissance en hauteur est ralentie dès le 15ème Jour et on assistait à la mort de la plante dès le 35ème Jour. Les résultats de sa croissance en hauteur donnent une amplitude entre les classes de 6 cm seulement pour les doses allant de 0 à 80mg/kg ce qui montre un effet significatif des doses du Cuivre de plus de 80mg/kg du sol sur la croissance en hauteur du *Cajanus cajan*.

Au cas du traitement avec le Nickel, la croissance en hauteur a diminué dès l'application de la dose (10mg/kg). Les résultats trouvés montrent le décalage de 29 cm entre la hauteur de la plante témoin et celle traité avec la première dose de 10mg/kg. Mais les doses suivantes, 20 et 40mg/kg, la hauteur est stable sauf pour le cas des doses de plus de 40mg/kg et on a assisté à la mort de la plante au 85ème jour pour le cas de la dose de 80mg/kg et 55ème jour à celle traité avec 160mg/kg. Une grande amplitude de 29cm se remarque entre la classe de la dose témoin et celle de 10mg/kg mais pour les doses suivantes, ça a varié de 2 à 3cm pour les doses partant de 10 à 40mg/kg. Cela montre que le *Cajanus cajan* ne résiste pas à la présence du Nickel dans le sol et surtout à des concentrations de plus de 40mg/kg de sol.

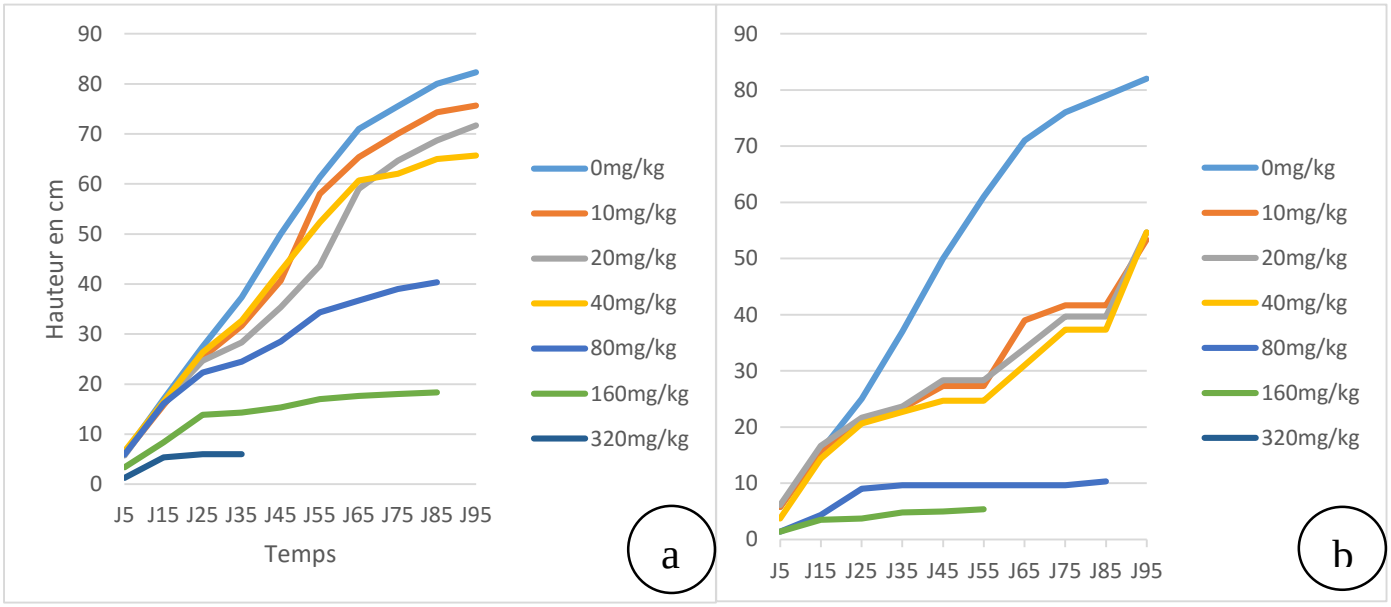


Figure 4 : Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la croissance en hauteur du *Cajanus cajan*

III.1.3.2. Formation de feuilles du *Cajanus cajan*

Les données de comptage des feuilles récoltées à partir du 15ème jour pour la plante exposé au stress du Cuivre et du Nickel, montrent que le nombre de feuille a augmenté exponentiellement avec la croissance en hauteur de la plante jusqu'au 45èmejour pour le cas du Cuivre, au 75ème jour pour le cas du Nickel et en peu stable jusqu'à la fin de l'expérience. Par contre, la variation du nombre des feuilles du *Cajanus cajan* exposé sous le stress du Cuivre et du Nickel dépend de sa hauteur et varie en fonction temps.

Au cours de la période d'en dessous de 45ème jour, les valeurs moyennes du nombre de feuilles enregistrées pour les plantes traités avec les doses de 0 mg/kg, 10 mg/kg, 20 mg/kg et 40mg/kg ne sont pas variées respectivement avec 11 feuilles tandis que pour les traitements avec les concentrations de la dose 80 mg/kg, 160 mg/kg, et 320 mg/kg, les résultats montrent une grande variation du nombre de feuilles de 8, 6 et 2 feuilles respectives.

Pour le cas du traitement avec le Nickel, les données enregistrées du nombre de feuilles sont variées dès la dose témoin (0mg/kg) à la dernière dose (320 mg/kg) mais pour le cas des doses de plus de 40mg/kg, on a déjà enregistré les plantes qui ont perdues la vie à un temps déterminé comme la figure 5 le montre.

Cela montre que le nombre de feuilles pour le *Cajanus cajan* traité avec ces métaux lourds dépend de leur concentration et plutôt au cas du traitement de plus de 40 mg/kg pour le Nickel et 80mg/kg pour le Cuivre.

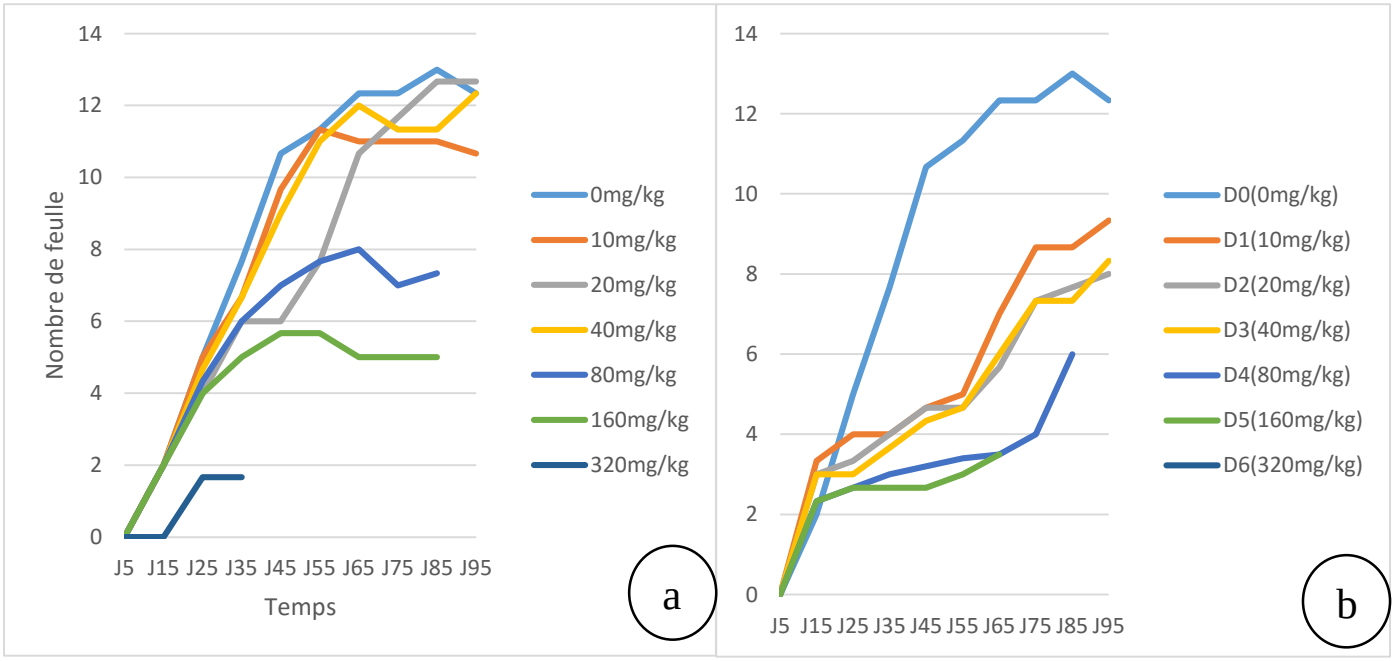


Figure 5: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la formation des feuilles du *Cajanus cajan*

III.1.3.3. Nombre de nœuds du *Cajanus cajan*

Les données de comptage des nœuds récoltées au cours de notre expérience montrent que la plante traitée avec le Cuivre a atteint le nombre variant de 18 et 16 respectivement avec la dose témoin et 10 mg/kg et 17 nœuds respectivement avec les doses de 20 mg/kg et 40mg/kg. Pour ceux traité avec les doses de 80 mg/kg, 160 mg/kg, et 320 mg/kg, le nombre des nœuds est respectivement de 10, 5 et 1 nœud au cours de 45 jours. Pour le cas du Nickel, la plante a atteint 18, 17, 16 et 14 nœuds avec respectivement les doses de 0, 20 et 40 mg/kg au cours de 55 jours.

Les valeurs trouvées du nombre des nœuds montrent que ce dernier a augmenté d'une façon exponentielle au cours l'expérience sauf pour le cas des plantes connaissant les concentrations du Cuivre en dose de 160 mg/kg et 320 mg/kg, les doses qui ont provoqué la mort de la plante. Pour le cas du Nickel, le nombre des nœuds est exponentiel jusqu'au 55ème jour avec les doses de 0 à 40mg/kg, et stable pour le cas des autres doses.

Ces résultats montrent que la formation du nombre des nœuds pour le *Cajanus cajan* traité avec concentration du Cuivre de plus de 80 mg/kg et plus de 40mg/kg pour le Nickel est minime que dans les concentrations inferieures et varie aussi selon le temps.

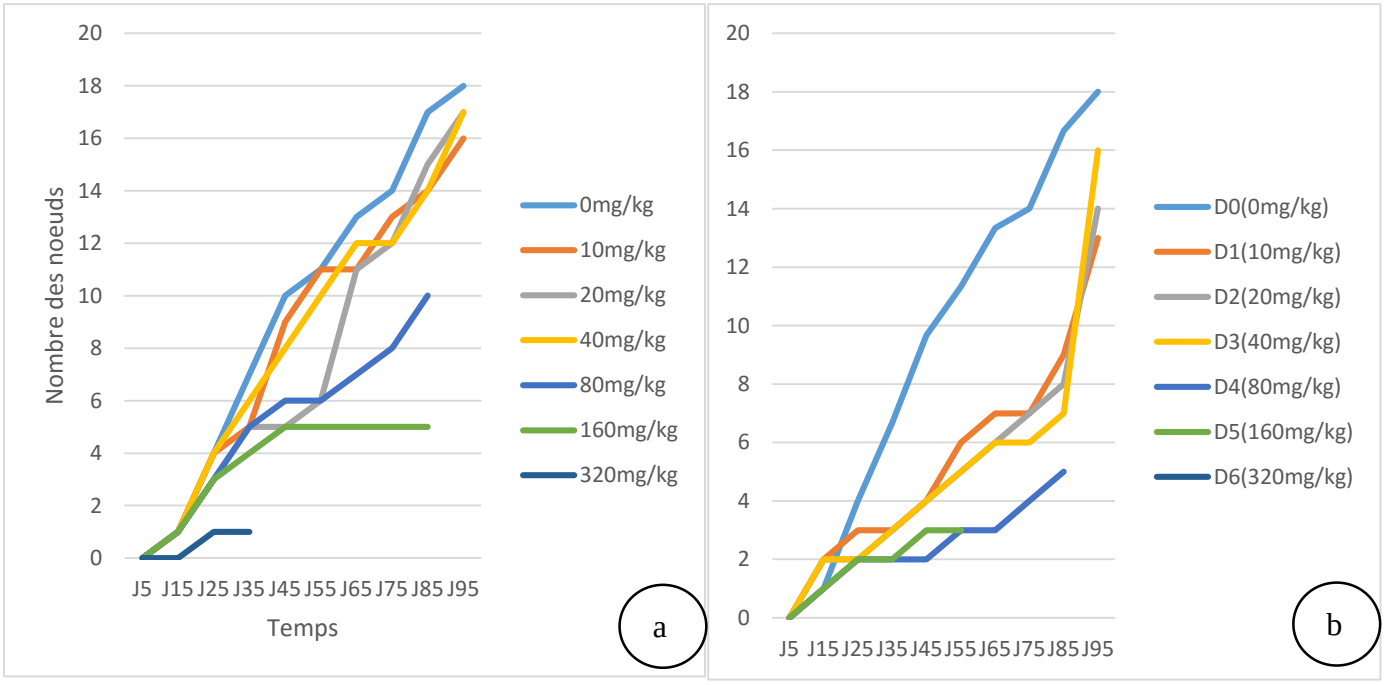


Figure 6: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la formation des nœuds du *Cajanus cajan*

III.1.3.4. Nombre de feuilles tombées du *Cajanus cajan*

Au cours de l'analyse de croissance du *Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre, nous avons aussi enregistré les feuilles qui sont tombées durant le période d'expérience à partir de 35ème jours.

Durant la période de notre étude, les valeurs trouvées du nombre des feuilles tombées montrent que ce dernier a augmenté d'une façon exponentielle avec 6 feuilles respectives pour les doses de 0 mg/kg, 10 mg/kg, 20 mg/kg et 40 mg/kg et 3 feuilles pour les doses de 80 mg/kg. Mais pour le cas du traitement avec le Nickel, les feuilles sont tombés au 35ème jour pour la dose témoin avec 6 feuilles et au 85ème jour pour les autres doses avec également de 6 feuilles pour la dose de 10mg/kg, 5 et 4 feuilles respectivement avec les de 20 et 40mg/kg.

Pour le cas des plantes connaissant le traitement du Cuivre en dose de 160 mg/kg, une seule feuille est tombée avant sa mort au-delà de la 85ème Jour.

Les résultats en moyennes des feuilles tombées montrent que les feuilles du *Cajanus cajan* ne tombent pas en fonction du métal lourd présent dans le sol mais plutôt en fonction du temps et de la croissance en hauteur de la tige d'une plante.

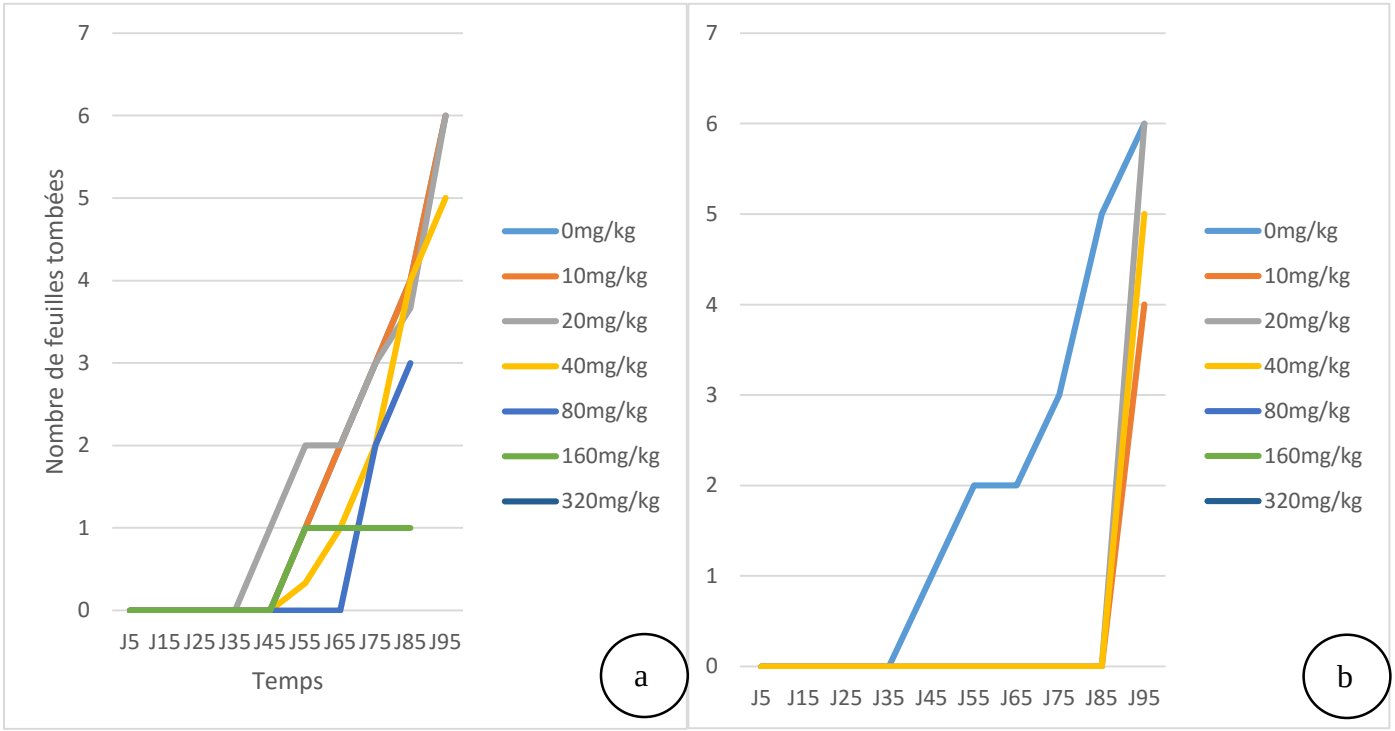


Figure 7: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la perte en feuilles du *Cajanus cajan*.

III.1.3.5. Biomasse sèche du *Cajanus cajan*

Les valeurs en moyenne de la biomasse sèche racinaire et aérienne du *Cajanus cajan* obtenu pour le cas du Cuivre, ont été diminuées à partir du premier ajout de sa dose avec une variation croissante en fonction de la dose ajoutée et c'est au-delà de la quatrième dose (80mg/kg) du Cuivre qu'on a une variation excellente par rapport aux autres doses. Pour le cas du Nickel, les valeurs de la biomasse sèche racinaire et aérienne ont été très variées dès le premier ajout de sa dose (10mg/kg) et c'est au-delà de troisième ajout qu'on a observé une variation excellente par rapport aux doses précédentes comme le montre le tableau 7.

Tableau 7: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la Biomasse sèche du *Cajanus cajan*.

a	**Biomasse sèche du *Cajanus cajan***			b
DOSE	BSR	BSA	BSR	BSA
0 mg/kg	0,44±0,09^{a}	3,70±0,87^{a}	0,44±0,09^{a}	3,7±,87^{a}
10 mg/kg	0,32±0,06^{ab}	3,24±0,68^{ab}	0,12±,03^{b}	0,98±,40^{bc}
20 mg/kg	0,31±0,03^{ab}	2,98±0,40^{ab}	0,08±,07^{bc}	1,24±,68^{b}
40 mg/kg	0,25±0,10^{ab}	2,63±0,35^{b}	0,13±,06^{b}	0,63±,35^{bc}
80mg/kg	0,13±0,12^{b}	1,73±0,57^{b}	0,03±,03^{bc}	0,23±,15^{cd}
160 mg/kg	0,03±0,01^{c}	0,27±0,16^{c}	0,01±,01^{c}	0,10±,13^{cd}
320mg/kg	0,001±0,003^{c}	0,03±0,028^{c}	0,004±,01^{c}	0,013±,01^{d}
P value	0,00	0,00	0,00	0,00

Lors de cette expérience, la quantité de la Biomasse Sèche du *Cajanus cajan* trouvée après le séchage à l'étuve est de 0,44 g pour le BSR et 3,7 g pour la BSA tous cela sans métal ajouté. La quantité de la BS a été chutée en fonction de l'augmentation de la concentration de ces métaux. Avec 10 mg/kg du Cuivre, la quantité de BSR a diminué de 27,2 % et 12,4% pour le BSA par rapport au témoin et avec les autres doses, la quantité de BSR a diminué de 29,5 % pour la dose 20 mg/kg, de 43,1 % pour la dose 40 mg/kg, de 70,4 % pour la dose 80 mg/kg, de 93,1 % pour la dose 160 mg/kg et de 99,7 % pour la dose du Cuivre 320 mg/kg. Pour Le BSA, sa quantité varie exponentiellement de 19,4 ; 28,9 ; 53,2 ; 92,7 et 99,1% selon les doses respectives.

Il en est de même pour le cas du traitement avec le Nickel ou la quantité de la BS a été chutée de plus en plus avec l'application de sa dose. Pour ce dernier, la quantité de BSR trouvée par rapport au témoin, a chuté de 72,7% et 73,5 % du BSA avec la dose de 10 mg/kg. Pour les doses suivantes, elle a diminué de 81,8 ; 70,4 ; 93,1, 97,7 et 99,0% et la BSA a chuté de façon exponentielle avec 66,4 ; 82,9 ; 93,7 ; 97,2 et 99,6% respectivement avec les doses utilisés allant de 10 à 320mg/kg.

Le test d'homogénéité des groupes pour la BSR traité avec le Cuivre, a classé les résultats du BSR et BSA en quatre groupes dont le premier groupe (a) correspond aux résultats de la dose témoin de 0 mg/kg, le

deuxième groupe (ab) regroupe les résultats trouvé pour le traitement avec les doses du cuivre de 10 mg/kg, 20 mg/kg et 40 mg/kg. Le troisième groupe (b) regroupe les résultats de la BSR de 80 mg/kg avec ceux de la BSA de 40 et 80 mg/kg tandis que le dernier groupe (c) correspond aux résultats de la biomasse sèche trouvés pour le traitement avec les doses de 160 et 320 mg/kg. Une différence significatif des groupes se remarque au-delà du quatrième groupe ce qui montre un effet significatif du Cuivre à la quantité de la BS dès la dose de 80 mg/kg.

Au cas du traitement avec le Nickel, le test d'homogénéité entre les groupes a classé les résultats du BSR en quatre groupes et en cinq groupes pour la BSA. Pour ce, la première classe (a) regroupe les résultats trouvés sans ajout du métal (0mg/kg) pour la BSR et BSA, deuxième classe (b) les résultats du BSR et BSA pour le traitement avec les doses de 10 et 40 mg/kg de la BSR et 20mg/kg du BSA. La troisième classe (bc) regroupe les résultats du BSR traités avec 20 et 80mg/kg et ceux du BSA traités avec 10 et 40 mg/kg. La classe suivante (c) regroupe seulement les résultats du BSR traités avec 160 et 320 mg/kg tandis que la cinquième classe (cd) et regroupe ceux du BSA traités avec 160mg/kg et la dernière (d) qui regroupe ceux traités avec 320 mg/kg. Une différence significatif des groupes se remarque au-delà de la troisième classe ce qui montre un effet significatif du Nickel à la quantité du BS dès la dose de 40 mg/kg.

L'analyse de la variance pour la BS, montre qu'il y a de différence significatif (p value < 0,05) des résultats ce qui montre que les valeurs des résultats trouvées ne sont pas extrêmes que ceux observées.

III.1.4. Effet du Cuivre et du Nickel sur les paramètres de croissance de l'*Eleusine coracana*

III.1.4.1. Hauteur de l'*Eleusine coracana*

Les résultats en moyenne de la hauteur d'*Eleusine coracana* (Figure 8) traité par le Cuivre et le Nickel montrent que la variation des mesures est en fonction du temps et de la concentration du type de métal dans le sol, la croissance d'*Eleusine coracana* est exponentielle à chaque dose dès le jour de la germination jusqu'à la fin de l'expérience mais la mesure de la hauteur varie en fonction de la concentration de chaque métal.

La croissance en hauteur est ralentie dès le 5ème jour pour le cas des échantillons traités avec le Cuivre pour la dose de 320 mg/kg et 25 ^{ème} jour pour celle de 160 mg/kg. On a assisté à la mort de l'*Eleusine coracana* auprès de 85ème jour pour le cas de traitement avec la dose de 160 mg/kg et au 25ème jour pour celle de 320 mg/kg de sol. Il en est de même pour le cas du traitement avec le Nickel sauf qu'on a assisté à sa mort dès le 10ème jour avec la dose de 320mg/kg mais pour les doses inférieurs, la croissance reste exponentiel.

La comparaison des doses à chaque jour, montre que la hauteur de la plante est toujours élevée pour les doses du Cuivre moins élevées c'est-à-dire de 0 à 80 mg/kg avec les différentes hauteurs de 23 ; 20,6 ; 20,3 ; 17,0 et 11,7 cm respectivement aux doses de 0 mg/kg, 20 mg/kg ; 40 mg/kg et 80 mg/kg. Cela montre alors que la croissance en hauteur de l'*Eleusine coracana* exposé sous le stress du Cuivre varie dans le temps en fonction de la concentration élevée du Cuivre effectivement au cas où la dose est plus de 80mg/kg et la croissance de l'*Eleusine coracana* est totalement inhibée. Avec le Nickel, la hauteur de la plante est élevée dès le premier ajout de sa dose (10 mg/kg) par rapport à la dose témoin, jusqu'au cinquième dose (80 mg/kg) et l'amplitude entre les valeurs de la hauteur n'est pas très variable notamment avec 23, 24, 25 et 23 cm respectivement avec les doses 0, 10 ,20 ,40 et 80 mg/kg. Pour le cas de dose supérieur de 80 mg/kg, la plante est totalement inhibé dès le 15ème jour, cela montre que la plante résiste à la présence du Nickel mais avec la concentration inférieur à 80mg/kg et peut être considéré comme fertilisant avec ces doses.

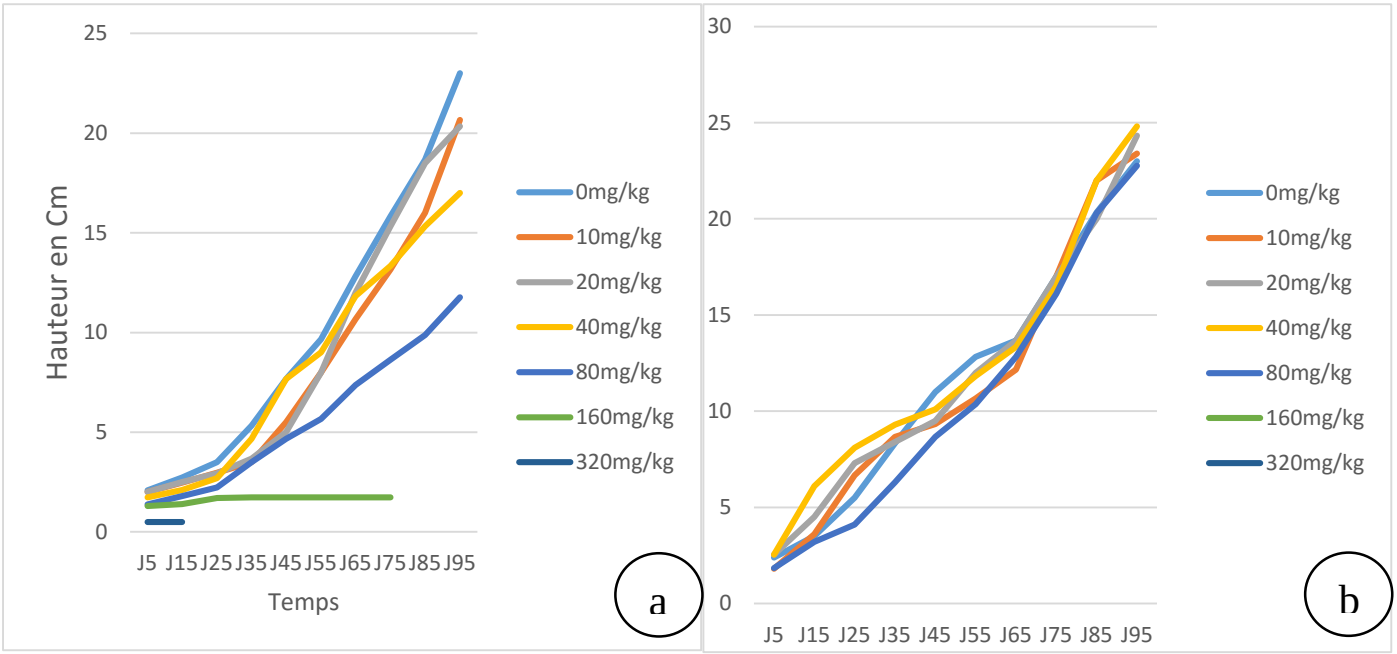


Figure 8: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la croissance en hauteur d'*Eleusine coracana*

III.1.4.2. Nombre de feuilles de l'*Eleusine Coracana*

Les données de comptage des feuilles récoltées dès le 5 ème jour de germination, montrent que le nombre de feuille a augmenté exponentiellement durant la période de l'expérience avec les traitements du Cuivre et du Nickel dès la dose témoin à 80mg/kg selon la dose considérée. Mais avec la variation des doses, le nombre de feuilles a diminué avec l'augmentation de la dose du Cuivre tandis qu'il a augmenté avec l'augmentation de la concentration du Nickel surtout aux doses inférieur à 80 mg/kg. Au cas de la dose du Cuivre de 160 mg/kg, le nombre de feuille a augmenté jusqu'au 35ème jour avec 3 feuilles et reste invariable à partir de ce jour jusqu'à sa mort, mais avec la dose de 320 mg/kg, la plante a resté avec une seule feuille jusqu'à au 15ème

jour au-delà duquel la plante est morte. Pour le traitement avec les doses du Nickel de plus de 80 mg/kg, la plante n'avait qu'une seule feuille jusqu'à seulement au 5ème jour avec la dose de 160 mg/kg à partir duquel elle est morte.

Au cours de cette expérience, les valeurs moyennes du nombre de feuilles enregistrées pour le traitement avec les doses du Cuivre de 0 mg/kg, 10 mg/kg et 20 mg/kg ne sont que 9 feuilles et celles traitées avec les doses de 40mg/kg et 80mg/kg sont respectivement de 8 et 6 feuilles. Pour le traitement avec les concentrations de la dose du Cuivre de 160 mg/kg et 320 mg/kg, la plante a atteint respectivement 4 et une feuille durant la fin de leur vie avant la fin de l'expérience. Au cas du traitement avec le Nickel, les valeurs moyennes du nombre de feuilles d'Eleusine coracana ne sont que 9, 10, 11, 12 et 11 respectivement avec la dose témoin, 10, 20, 40 et 80 mg/kg.

Les résultats trouvés sur la formation des feuilles de l'*Eleusine coracana* traité avec le Cuivre et le Nickel, montrent que pour le traitement avec le Cuivre le nombre de feuilles diminue avec la dose mais augmente pour le cas du Nickel, sauf pour celles de plus de 160mg/kg du Cuivre et 80 mg/kg du Nickel où on assiste à un effet inhibiteur sur le développement du nombre des feuilles d'*Eleusine coracana.*

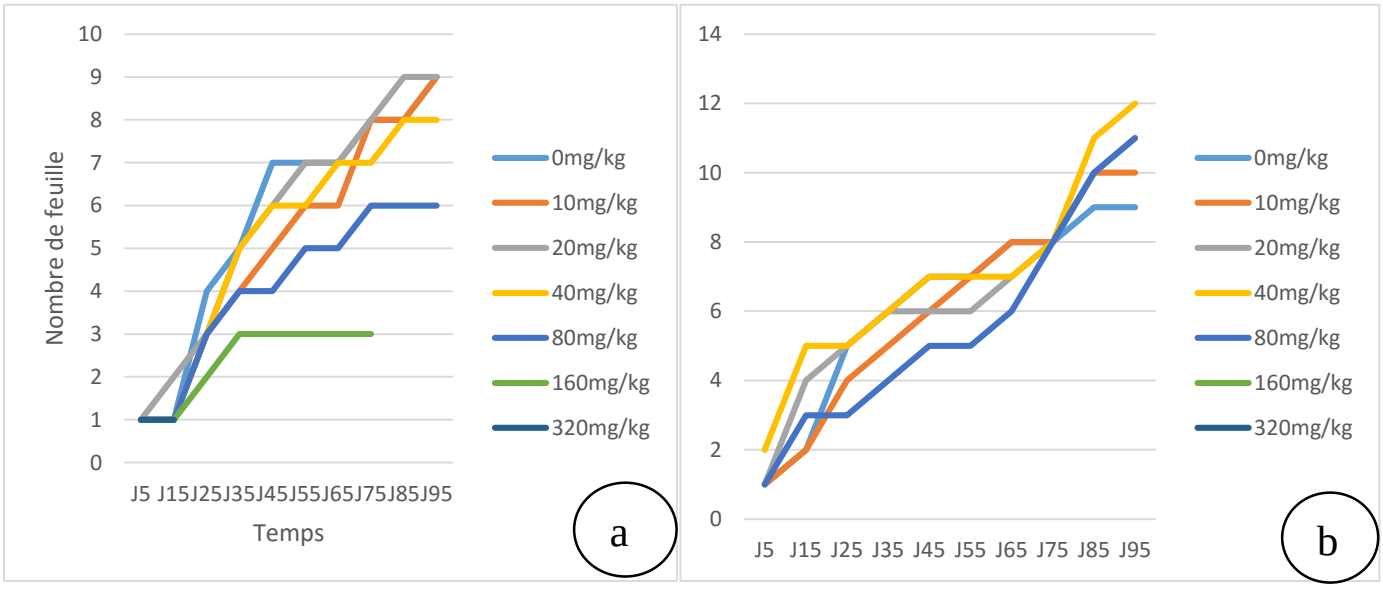


Figure 9: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la formation des feuilles de l'*Eleusine coracana*

III.1.4.3. Nombre de gaines de l'*Eleusine coracana*

Les valeurs en moyennes du nombre des gaines de l'*Eleusine coracana* montrent que sa variation dépend aussi du temps et des concentrations variées du Cuivre et du Nickel dans le sol (Figure 10). Ces valeurs montrent également que pour les doses du Cuivre les plus élevées de plus de 160 mg/kg, le nombre de gaine

a diminué significativement alors que pour les doses du Nickel le nombre de gaine a augmenté avec les doses mais pour celles inferieurs de 80 mg/kg de sol.

Les plantes traitées avec les doses du Cuivre de 0 mg/kg, 10 mg/kg et 20 mg/kg ont atteint le même nombre de 8 gaines et le nombre de gaine a été diminué à partir de la dose de 40mg/kg ou la plante a eu 6 gaines, et 5 pour les plantes traitées avec la dose de 80 mg/kg. Pour le cas des plantes traitées avec les doses du Nickel de 0, 10, 20, 40 et 80 mg/kg, le nombre de gaines est respectivement 8, 9, 10, 11 et 10 gaines.

Comme le cas du nombre des feuilles, les plantes traitées avec la dose du Cuivre de 160 mg/kg ont maintenu le nombre de gaines dès le 30ème jour jusqu' au 85ème jour et pour les plantes traitées avec la dose de 320 mg/kg, elles ont maintenu une seule gaine dès le 5ème jour à sa fin du cycle de vie au 25ème jour.

Pour le nickel, celles traitées avec 0 et 10 mg/kg ont maintenu le même nombre des gaines dès le 85ème jour, tandis que pour les autres (20 à 80mg/kg) le nombre des gaines ont augmenté selon la dose considérée.

Ces valeurs montrent que les faibles concentrations du Cuivre de 0 mg/kg à 80mg/kg de sol n'a pas d'effet significatif sur le nombre des gaines d'*Eleusine coracana* tandis qu'au-delà de la dose de 80 mg/kg, on assiste à l'effet inhibiteur sur le développement des gaines de cette plante ce qui est le contraire pour le cas de la plante traitée avec le Nickel. Ces résultats d'évolution en gaines d'Eleusine coracana exposé à ces métaux lourds approuve que le nombre des gaines est lié à la formation de feuilles de cette dernière.

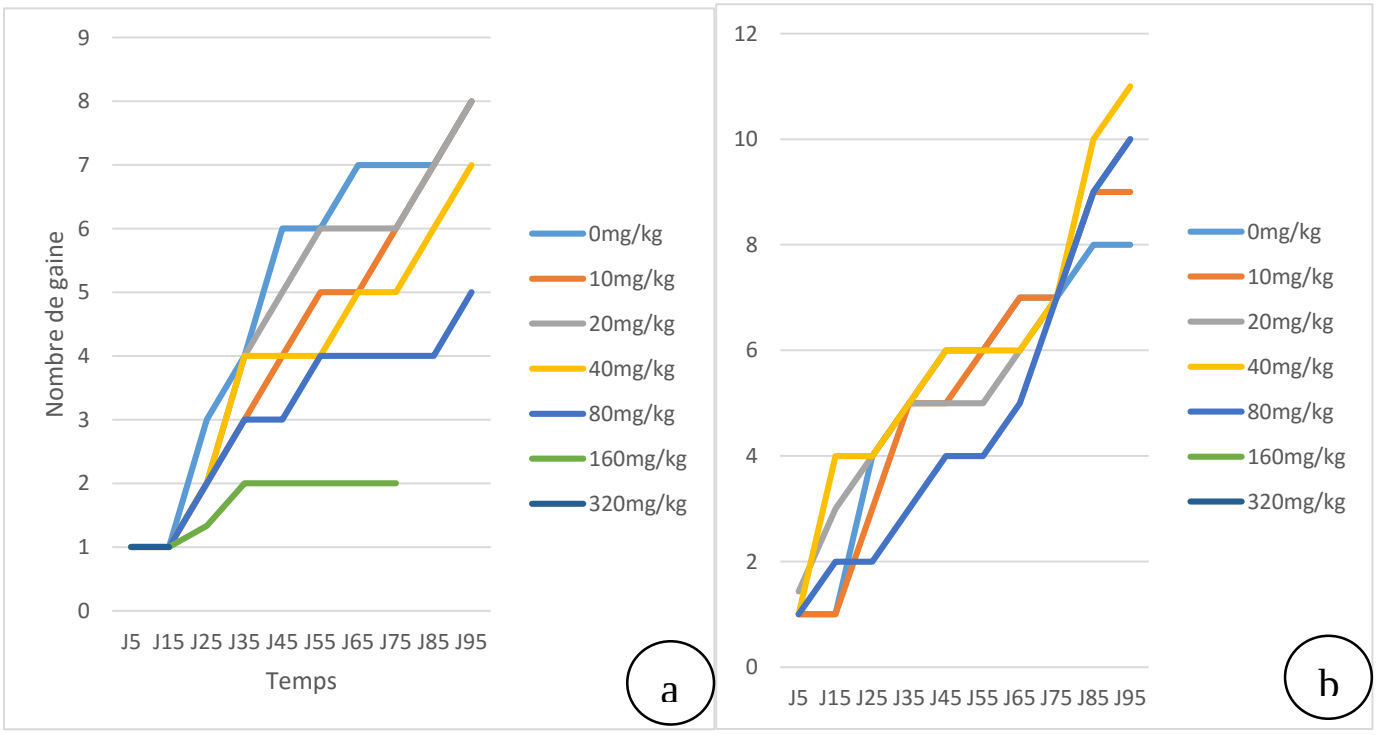


Figure 10: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur le nombre des gaines de l'*Eleusine coracana*

III.1.4.4. Biomasse sèche de l'*Eleusine coracana*

Les valeurs en moyenne de la BS pour l'Eleusine coracana traité avec le Cuivre diminuent en fonction de l'augmentation de la dose, et pour celui traité avec le Nickel la BS augmente avec l'augmentation de sa concentration jusqu'à une certaine dose, comme le tableau 8 le montre.

Tableau 8: Effet du Cuivre (a) et du Nickel (b) sur la biomasse sèche de l'*Eleusine coracana*

a	Biomasse sèche de l'*Eleusine coracana*		b	
DOSE	BSR	BSA	BSR	BSA
0 mg/kg	0,12±0,10^{a}	1,21±1,2^{a}	0,12±0,10^{ab}	1,21±1,29^{ab}
10 mg/kg	0,12±0,10^{a}	0,85±1,2^{a}	0,08±0,06^{ab}	1,24±1,32^{ab}
20 mg/kg	0,11±0,19^{a}	0,22±0,26^{a}	0,13±0,03^{ab}	1,89±0,62^{ab}
40 mg/kg	0,09±0,12^{a}	0,17±0,15^{a}	0,35±0,16^{ab}	2,52±0,63^{a}
80mg/kg	0,04±0,03^{a}	0,17±0,15^{a}	0,29±0,39^{ab}	0,41±0,54^{bc}
160 mg/kg	0,004±0,00^{b}	0,008±0,00^{b}	0,00±0,00^{b}	0,00±0,00^{c}
320mg/kg	0,001±0,00^{b}	0,002±0,00^{b}	0,00±0,00^{b}	0,00±0,00^{c}
P value	0,5	0,2	0,13	0,01

Dans le cas de traitement avec le Cuivre et le Nickel, la quantité de la BSR de l'*Eleusine coracana* après le séchage à l'étuve est de 0,12 g pour leur dose témoin et à la dose du Cuivre de 10 mg/kg. Elle a été diminuée avec l'augmentation de la dose en cuivre mais pour le Nickel, elle a été varié en selon la dose à part la première dose (10 mg/kg) qu'elle a chuté de 66,6%, elle a été augmenté pour les autres doses jusqu'au quatrième dose (80 mg/kg) de façon qu'on a 0,13 ; 0,35 et 0,29 g respectivement avec les doses 20 ; 40 et 80 mg/kg. Avec la dose du Cuivre de 20 mg/kg, la quantité de BSR a diminué de 8,3 % ainsi que de 25 et 66,6% avec les doses respectives de 40 mg/kg et 80 mg/kg. Pour les doses du Cuivre de 160 et 320 mg/kg, la BSR a diminué de 3,3 et 0,8% mais pour le Nickel, les BS de plus de 80mg/kg sont nulles du fait qu'elles sont très toxiques à la croissance de cette plante.

La BSA, au cas du traitement avec le Cuivre, a aussi diminué après séchage à l'étuve de façon de 29,7 % pour la dose de 10 mg/kg ; 81,8 % pour la dose de 20 mg/kg et de 85,9 % pour la dose de 40 et 80 mg/kg. Mais pour le Nickel ça a toujours augmenté avec l'ajout de la dose sa dose et on a enregistré une augmentation de 2,4 ; 56,1 et 108% respectives avec 10 ; 20 et 40 mg/kg, toujours par rapport à celle du témoin. Une diminution de BSA a été remarquée pour les doses du Nickel de 80 mg/kg avec 33,8% mais pour les autres doses supérieures, la BSA est presque nulle suite à la toxicité de ce métal qui a provoqué la perte de vie pour cette plante.

Le test d'homogénéité pour la BS de l'*Eleusine coracana* traité avec le Cuivre a regroupé les résultats en deux classes différentes (a et b) statistiquement identiques et en quatre classes différentes (a, ab, bc et c)

pour le cas du traitement avec le Nickel. La première classe (a) correspond aux résultats obtenus à la dose du Cuivre de 0 à 80 mg/kg et exceptionnellement à ceux du 40 mg/kg de BSA traité avec le Nickel.

La deuxième classe (b) regroupe les résultats de la BS traité pour les doses du cuivre de 160 et 320 mg/kg ainsi que ceux de la BSR traité avec le Nickel. La troisième classe (ab) regroupe les résultats de la BS traité avec les doses du Nickel de 0 à 20 mg/kg ainsi que ceux de BSR traité avec la dose du Nickel de 40 et 80 mg/kg. La quatrième classe (bc) regroupe les résultats de la BSA pour les doses de Nickel de 80mg/kg et la dernière classe (c), ceux de la BSA pour les doses de 160 et 320 mg/kg.

Une différence significatif entre les classes se remarque au niveau de la deuxième pour les résultats de la BS traités avec le Cuivre et la troisième classe pour ceux de la BSR traités avec le Nickel, ce qui montre que ce dernier, à des concentrations de 160 et 320mg/kg et plus, a un effet inhibiteur sur l'*Eleusine coracana*. Il en est de même pour le cas du traitement pour le cas du Nickel où une différence significative entre les groupes se remarque au point de la BS traités avec les doses de plus de 80 mg/kg du Nickel.

L'analyse de la variance pour la biomasse sèche de l'Eleusine coracana montre qu'il n y a de différence significatif (p value > 0,05) des résultats ce qui montre que les valeurs des résultats trouvés sont extrêmes que ceux observés.

III.2. DISCUSSION DES RESULTATS

Dans notre travail, l'application du Cuivre et du Nickel dans le milieu de germination et de croissance du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* diminue le taux de germination et croissance de ces plantes sauf pour le cas du Nickel appliqué à l'*Eleusine coracana* où la germination et la croissance augmente avec l'augmentation de sa dose jusqu'à certain seuil de leur doses.

Le Cuivre, comme les autres éléments essentiels, est un oligoélément potentiellement phytotoxique en trop forte concentration (Woolhouse et Walker, 1981). Il est aussi un élément essentiel au métabolisme d'une plante mais une substance toxique à des concentrations élevées (ATSDR, 2004). L'accumulation de ce métal lourd dans la biosphère perturbe le développement des végétaux et provoque une chute de production (Bénouis, 2001). Le nickel est aussi essentiel pour les plantes, mais en concentration plus élevée dans la plupart des espèces végétales devient toxique et il est également important dans certains processus métaboliques ce qui permet à certaines plantes de résister à son toxicité (Vamerali et *al*. 2010 ; Sanchez-Pardo et *al*. 2012).

Ces affirmations prouvent à la réalité des résultats dégagés de notre étude, qui montre que la présence du Cuivre et du Nickel, à concentration élevée dans le milieu de culture, a une influence sur la diminution du taux de germination et sur les paramètres de croissance du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* et cela en fonction du temps et de la dose appliquée.

Pour notre étude, l'évaluation du taux de germination des graines du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* sous l'effet du Cuivre et du Nickel, a montré que la diminution du taux de germination commence dès l'application de ces métaux dans le milieu de culture et après un certain temps.

Pour le cas du *Cajanus cajan*, le taux de germination a chuté de 5,5 % avec l'application des doses du Cuivre de 20 et 40 mg/l. Pour les doses de plus de 80 et 160 mg/l, le taux de germination est beaucoup chuté de 11,6 à 16,6% et par contre, des classements statistiques montrent une diminution significative du taux de germination de 38,8% pour le cas des traitements avec la dose du Cuivre de 320 mg/l.

Il en est de même pour le cas du *Cajanus cajan* exposé au Nickel où il a également influencé la diminution du taux de germination avec 5,5% dès l'application de la première dose. L'augmentation de sa dose a provoqué une chute du taux de germination de 11,1 à 27,2% respectivement avec les doses allant de 20 à 160 mg/l.

Des classements statistiques montrent qu'une chute significative du taux de germination du *Cajanus cajan* exposé au Nickel réside aussi au cas du traitement avec la dose de 320 mg/l avec une chute plus élevée de

44,4% par rapport au témoin et L'Huillier 1980 dans son étude, a montré avec l'observation en microscopie photonique qu'avec 60 pM de Ni, l'activité mitotique au niveau du méristème racinaire du *Zea mays* est diminuée de 80 % après 8 jours.

Pour le cas de l'*Eleusine Coracana* exposé au Cuivre, le taux de germination a également chuté de 5,5% dès l'application de la première dose de 10 mg/l et pour d'autres doses, le taux de germination a chuté de 27,7 à 80,5% respectivement avec les doses allant de 20 à 360mg/l. Mais le classement de l'analyse statistique montre qu'une chute élevée réside au cas de la dose de 40mg/l ce qui montre une faible résistance de germination d'*Eleusine coracana* en présence du Cuivre avec la dose supérieur ou égal à 40 mg/l. Par contre, l'exposition de l'*Eleusine coracana* au Nickel, a provoqué un effet positif d'augmentation du taux de germination de 2,8% avec l'application de la dose de 10 mg/l mais pour les autres doses, on a assisté à une chute du taux de germination par rapport au témoin de 2,7 à 47,2 % respectivement avec les doses du Nickel allant de 20 à 320 mg/l. Des classements statistiques montrent une diminution significatif du taux de germination de l'*Eleusine coracana* exposé au Nickel réside au cas de son concentration supérieur ou égal à 80mg/l.

Ces résultats de germination affirment la première hypothèse de notre étude, d'où les concentrations croissantes du Cuivre et du Nickel influencent sur la germination des graines du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* car dans la plupart des cas, le taux de germination a été diminué avec l'augmentation de leurs doses.

Les résultats similaires ont été trouvés par Zaghdoud et *al*. (2018) et Fatarna et *al*. (2017) dans leur étude d'Impact des métaux lourds (Cadmium, Zinc et Plomb) sur la germination des graines d'*Atriplex halimus* L., où les doses croissantes de ces métaux avaient influencé sur la diminution générale des taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* L.

Cependant, Weckx et *al.* (1996) et Chen et *al*. (2000) ont affirmé que le Cuivre à des niveaux élevés devient fortement phytotoxique pour les cellules et cause l'inhibition de la croissance des plantes ou encore la mort.

Les résultats de ces différents auteurs ont approuvé à les nôtres, qui montrent que le Cuivre et le Nickel à des concentrations croissantes ont une influence de diminution sur le taux de la germination du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana*.

Les résultats dégagés au point de vue de l'analyse de croissance et de développement de ces plantes, montrent que le Cuivre et le Nickel, à des concentrations croissantes, ont une influence sur quelques paramètres de croissance mesurés de *Cajanus cajan* et *Eleusine coracana*. Quant au *Cajanus cajan*,

l'application du Cuivre et du Nickel dans le sol a une influence sur la hauteur de la tige, la formation des feuilles et des nœuds ainsi qu'à la biomasse de cette plante.

La hauteur finale de la tige du *Cajanus Cajanus*, mesurée à la fin de notre expérience, est de 82,3 cm pour la dose témoin. Elle a diminué de 6,8 cm avec l'application de la dose du Cuivre de 10mg/kg et de 29 cm avec le Nickel.

Avec les autres doses du Cuivre, la hauteur du *Cajanus cajan* a été diminué de 10,7 et 16,6 cm avec les doses de 20 et 40 mg/kg. Pour les autres doses avec 80 et 160 mg/kg, la plante n'a pas atteint le jour de la fin d'expérience et la hauteur a diminué respectivement de 42 et 64 cm au 85ème jour. Avec la dose de 320 mg/kg, elle était morte au 45ème jour et la hauteur a été diminuée de 76,3cm par rapport au témoin.

Au cas où du Nickel, la hauteur du *Cajanus cajan* a été diminué de 27,3 cm avec les doses respectives de 20 et 40 mg/kg. Comme la plante n'a pas atteint le jour de fin d'expérience, la hauteur a diminué de 72,3 cm avec la dose de 80 mg/kg au 857ème jour et de 76,9cm avec la dose de 160 mg/kg. Cette étude montre que le nickel à la concentration de plus 320 mg/kg a des effets directs de l'inhibition de la croissance du Cajanus cajan du fait que ce dernier ne peut pas résister même à peu de jours. Avec cette concentration, pas de hauteur de la plante enregistrée car avec cette dose rien n'a pu croître.

Pour l'*Eleusine coracana*, la hauteur finale mesurée est de 23 cm avec la dose témoin. Elle a été diminuée de 2 cm avec l'application de la dose du Cuivre de 10 mg/kg pour les autres doses, elle a été diminuée de 3,6 et 11 cm respectivement avec les doses de 20, 40 et 80 mg/kg.

Avec la dose de 160 mg/kg, elle était morte au 75ème jour avec une diminution de hauteur de 21cm et à la dose de 320 mg/kg, elle était morte au 20ème jour avec une diminution de hauteur de 22 cm. Il en est de même pour les autres paramètres de croissance d'*Eleusine coracana* mesurés dont le nombre des feuilles, le nombre des gaines et la quantité de sa biomasse sèche où leurs valeurs ont été diminuées en fonction de l'application du Cuivre jusqu'à son inhibition à partir du 85ème jour avec les doses de plus de 160 mg/kg. Ces résultats viennent d'affirmer notre hypothèse en montrant que la présence du Cuivre dans le sol à des concentrations élevées inhibe la croissance de l'*Eleusine coracana*.

Au cas du traitement avec le Nickel, les résultats trouvés montrent que l'*Eleusine coracana* résiste à la présence de ce métal pour les doses inférieures ou égales à 80 mg/kg car sa hauteur a augmenté exponentiellement avec la dose mais avec des concentrations de plus de 80 mg/kg, on assiste à l'inhibition de cette plante. La hauteur de l'*Eleusine coracana* a été augmentée d'un centimètre lors de l'application de la dose de 20 et 80mg/kg et de deux cm avec celle de 40 mg/kg. Pour le cas des doses supérieurs ou égal à 80mg/kg, l'*Eleusine coracana* n'a pu résister ce qui a provoqué sa mort dès le 5ème jour à 2cm avec la dose

de 160mg/kg et le non germination avec la dose de 320 mg/kg et l'étude faite sur le *Zea mays* a montré que sa croissance est plus inhibée ce qui peut être lié à une teneur en nickel plus élevée tel que d'autres auteurs l'ont montré (Cataldo et *al*. 1978 ; Liibben & Sauerbeck 1991).

Nos résultats montrent également que le traitement de la *Cajanus cajan et Eleusine coracana* avec les doses très concentrées de plus de 80 mg/kg entraîne la toxicité du sol, ce qui a rendu la plante à ne pas se développer voir même mourir. Ces concentrations sont proches des niveaux toxiques observés sur d'autres plantes cultivées dans des conditions presque similaires (Piccini & Malavolta 1992 ; Krupa et al. 1993 ; Moya et al. 1993).

Il en est de même que pour les autres paramètres mesurés notamment le nombre des feuilles, des nœuds, des gaines et la quantité de la biomasse sèche de ces plantes où ils sont aussi diminué avec application des doses de Cuivre et du Nickel par rapport à la dose témoin sauf le cas des feuilles tombées du *Cajanus cajan* qui ne dépendaient pas de l'application de l'un de ces métaux mais par contre de la hauteur de son tige et du temps.

Nawel (2017), appuie à ces résultats en admettant qu'une concentration de 5µM de Cu stimule la croissance racinaire puisque ces nutriments sont indispensables à la croissance et au développement de la plante mais qu'au-delà d'un certain seuil cet élément devient toxique et inhibe la croissance racinaire.

Pour notre étude, le Cuivre a montré des effets sur la biomasse sèche racinaire de façon que sa masse a chuté avec l'augmentation croissante des doses du Cuivre. Pour le *Cajanus cajan*, la biomasse sèche racinaire trouvée est de 0,44 g à l'absence du Cuivre. Elle a été diminué en fonction de différentes doses du Cuivre avec 0,32 g pour la dose de 10 mg/kg ; 0,31 g pour la dose 20mg/kg ; 0,25 g pour la dose de 40 mg/kg ; 0,13 g pour la dose de 80 mg/kg ; 0,03 g pour la dose de 160 mg/kg et 0,001g pour la dose de 320 mg/kg.

Les analyses statistiques, avec le test d'homogénéité, montrent que la différence significatif entre les groupes des masses de la BSR se remarque à la dose de 160 mg/kg et on a une grande chute de BSR ce qui est du à la diminution de la croissance des racines de la plante comme Brun et *al.* (2003) et Huang et *al*. (2018) affirme que celle a pour conséquence de la diminution du prélèvement en eau et nutriments ce qui provoque la mort de la plante. C'est du même cas pour l'*Eleusine corana* ou la diminution de la biomasse sèche racinaire a été observée dès l'application des doses croissantes du Cuivre et a rendu la plante au dessèchement et puis à la mort avec la biomasse de 0,12 g dans le cas des doses de 0 et 10 mg/kg; 0,11 g pour la dose de 20 mg/kg ; 0,09 g pour la dose de 40 mg/kg et 0,04 g pour la dose de 80 mg/kg. Pour le cas des doses de 160 et 320 mg/kg, l'*Eleusine coracana* n'arrive pas au stade de la récolte de son biomasse.

Deux groupes statistiquement identiques sont analysés pour l'*Eleusine coracana*, sur trois du *Cajanus cajan* ce qui montre que le Cuivre a un effet significatif sur la biomasse sèche du *Cajanus cajan* par rapport à celle

de l'*Eleusine coracana* sauf le cas des doses du cuivre de plus de 80 mg/kg ou l'*Eleusine coracana* ne peut pas résister avec cette dose.

Comme la biomasse sèche racinaire, les résultats de la biomasse aérienne du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* montrent également une diminution croissante de la masse de biomasse au cas de traitement avec les doses les plus élevées du Cuivre et du Nickel et leurs parties morphologiques sont variées en fonction de leur concentration appliquée.

Cette théorie est soutenue par les des études faites sur les espèces de *Vicia faba* et de *Pisum sativum* qui ont montré que le Cuivre induit plusieurs aberrations chromosomiques dans les méristèmes racinaires et la réduction de la morphologie aérienne et souterraine occasionnée par le Cuivre, a dépendu étroitement des doses appliquées. (Souguir, 2009).

CONCLUSION

Les métaux lourds posent de sérieux problèmes écologiques parmi les contaminants majeurs de l'environnement. Leur présence et bioaccumulation potentielle, induit des effets dévastateurs sur la balance écologique de l'environnement.

Notre étude visait globalement à analyser le comportement du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* sous l'effet des concentrations variés de la dose du Cuivre et du Nickel, les uns des éléments chimiques composant du profil latéritique de Musongati, avec des objectifs spécifique d'évaluer le taux de germination du *Cajanus cajan* et de l'*Eleusine coracana* ainsi que d'analyser les paramètres morphologiques de croissance de ces plantes sous l'effet de variantes concentrations du Cuivre et du Nickel.

Les résultats dégagés de cette étude ont montré que le taux de germination du *Cajanus cajan* et d'*Eleusine coracana* a beaucoup diminué à des concentrations élevées du Cuivre et du Nickel. A des concentrations de 80 mg/l et plus, le taux de germination a chuté de plus de 20 % pour le *Cajanus cajan* et de plus de 50 % pour l'*Eleusine coracana* au cas du traitement avec le Cuivre et avec le Nickel, le taux de germination est diminué de plus de 22,2% pour le Cajanus cajan et de plus de 44,4% pour l'*Eleusine coracana* et tout cela par rapport au taux de germination évalué à la dose témoin de 0 mg/l.

Il en de même que pour les paramètres mesurés de croissance de ces plantes ou ces paramètres dont la hauteur, nombre feuilles, nombre de nœud et de gaines ainsi que la biomasse, leur quantité sont diminués en fonction de l'augmentation de la dose du Cuivre et du Nickel mais dans le temps. Une diminution significative est observée lors du traitement avec la dose de 80 mg/kg et plus. Avec ce seuil de concentration, les paramètres de croissance de *Cajanus cajan* sont diminués de plus de 17 % et 58,3 % pour l'*Eleusine* coracana mais pour le Nickel, les paramètres de croissance sont diminués de plus de 52,17% sauf que pour l'Eleusine coracana un effet direct de diminution a été remarqué à la dose de plus de 80 mg/kg.

En effet, comme la variabilité des concentrations des éléments traces métalliques induit par l'exploitation minière provoquent une pollution des sites miniers et leurs alentours en rendant les sols plus toxiques pour la flore, cette étude montre pour les concentrations élevées du Cuivre et du Nickel de plus de 80 mg/kg, ces plantes cultivées ne peuvent pas s'adapter à ce site.

Malgré l'amélioration de nos connaissances sur les mécanismes impliqués dans le contrôle de l'accumulation du Cuivre et du Nickel chez le *Cajanus cajan* et l'E*leusine coracana*, nous avons l'envie d'approfondir notre travail pour mieux comprendre les effets de ce métal sur les autres paramètres de croissance non analysés ainsi qu'au paramètres chimiques pour mieux connaitre la quantité du métal accumulée et des effets qui peuvent survenir aux consommateurs.

BIBLIOGRAPHIE

Adebowale K. O., Afolabi T. A., et Olu-Owolabi B. I., 2005. « Hydrothermal treatments of Finger millet (*Eleusine coracana*) starch ». Food Hydrocolloids 83 p.

Anderson P. R. and Christensen T. H., 1988. « Distribution coefficient of Cd, Co, Ni and Zn in soils ». Joumal of Soil Science 39: 15-22.

Angelone M. and Bini C., 1992. « Trace elements concentrations in soils and plants of Western Europe ». In Advances in trace metal research, Biogeochemistry of trace metals, Adriano D. C., ed., Lewis Pub., pp: 19-60.

Antonovics J., Bradshaw A. D., et Turner R. G., 1971. « Heavy Metal Tolerance in Plants ». In *Advances in Ecological Research*, édité par Cragg J. B. 7:1-85.

Arduini L., Godbold D. L., Onnis A., et Stefani A., 1998. « Heavy Metals Influence Mineral Nutrition of Tree Seedlings ». Chemosphere, Stress Factors and Air Pollution 36 (4) : 739-44.

Aricia Evlard et Campanella Bruno, 2013. « Métalliques sur les plantes et les techniques de phytoremédiation » 75 (janvier) 68 p.

ATSDR, 2004. « Toxicological Profile for Copper, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA : 1-265. » 362 p.

Azene Bekele-Tesemma , 2007. « Profitable Agroforestry Innovations for Eastern Africa »: Experience from 10 Agroclimatic Zones of Ethiopia, India, Kenya, Tanzania, and Uganda. Nairobi: Regional Land Management Unit : World Agroforestry Centre, Eastern Africa Region 388 p.

Baise D., et Paquereau H., 1997. « Teneurs totales en élements traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. Etude et Gestion des sols » : 77-94.

Bastola Biswash Raj., Pandey M. P., Ojha B. R., Ghimire S. K., et Baral K., 2015. « Phenotypic diversity of Nepalese finger millet (*Eleusine coracana* (L. Gaertn.) accessions at IAAS, Rampur, Nepal ». International Journal of Applied Sciences and Biotechnology : 285-90.

Becquer Thierry, Emmanuel Bourdon, et Laurent L'Huillier, 1995. « Disponibilité du nickel dans les sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie » : 321-25.

Benjamin Cuniasse, et Glass Tara, 2020. « Les métaux lourds, Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France Citepa. Rapport Secten édition 2020 » 72 p.

Bénouis Slimane, 2001. « Effet du cuivre sur les paramètres morpho-physiologiques et enzymatiques chez la fève (Vicia faba. L) ». PhD Thesis, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis 87 p.

Bliefert C. et Perraud R., 2001. « Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. Paris: De Boeck », 477 p.

Bourrelier Ph., 1998. « Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion », 42 p.

Brooks, R. 1987. « Serpentine and its vegetation. A multidisciplinary approach ». Diocorides Press, Portland, OR, 454 p

Brown P., M. Welch and E. Cary. 1987. « Nickel: A micronutrient essential for higher plants ». Plant Physiol. 85: 801-803.

Caburet A., et Lethève C Hekimian, 2002. « Les légumineuses à graines. Mémento de l'agronome ». Ministère des affaires étrangères, CIRAD, GRET 56 p.

Cataldo, D.A., Garland, T.R., Wildung, R.E. & Drucker, H. (1978) Nickel in plants II. « Distribution and chemical form in soybean plants ». Plant Physiology 62: 566-570.

Clemens S., 2001. « Molecular Mechanisms of Plant Metal Tolerance and Homeostasis ». *Planta* 212 (4): 475-86.

Corriher V.A., Hill G.M., Bernard J.K., Jenkins T.C., West J.W., et Mullinix B.G., 2010. « Pigeon Peas as a Supplement for Lactating Dairy Cows Fed Corn Silage-Based Diets ». Journal of Dairy Science 93 (11) : 309-17.

Davis et Beckett, 1978. « Upper Critical Levels of Toxic Elements in Plants. 2. Critical Levels of Copper in Young Barley, Wheat, Rape, Lettuce and Ryegrass, and of Nickel and Zinc in Young Barley and Ryegrass. » New Phytologist 80 p.

Dénia Ali, Chahinez Kraimia et Meriem Guesmia, 2020. « Revue bibliographique Contribue à la connaissance de la toxicité de quelques dérivés des Métaux lourds sur les rats et les lapins. » Mémoire, Universite Larbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi 80 p.

Déo Ntima Niyonkuru, 2002. « La culture du pois Cajan : Un trésor méconnu en Afrique Centrale. Editions SAILD, Collection Expérience des Fédérations ». Cameroon 23 p.

Devi Palanisamy Bruntha, Rajendran Vijayabharathi, Sathyaseelan Sathyabama, Nagappa Gurusiddappa Malleshi, et Venkatesan Brindha Priyadarisini, 2014. « Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) polyphenols and dietary fiber: a review ». Journal of food science and technology : 1021-40.

Dida Mathews M., Nelson Wanyera, Melanie L. Harrison Dunn, Jeffrey L. Bennetzen, et Katrien M. Devos, 2008. « Population structure and diversity in finger millet (*Eleusine coracana*) germplasm ». Tropical Plant Biology 1: 131-4.

Dixon N. E, Gazzola E. C., Blakeley R. L. and Zarer B., 1975. «Jack bean urease (E.C. 3.5.13, a metaloenzyme». A simple biological role for nickel J. Am. Chen Soc. 97: 131 p.

Don Ronnie et International Seed Testing Association, 2003. « ISTA Handbook on Seedling Evaluation ». International Seed Testing Association 64 p.

Ducic Tanja et Andrea Polle, 2005. « Transport and Detoxification of Manganese and Copper in Plants ». Brazilian Journal of Plant Physiology : 103-12.

Duffus John H., 2002. « Heavy metals a meaningless term» Publication By Pure and Applied Chemistry 15 p.

Duke James A., 1981. « Handbook of LEGUMES of World Economic Importance ». Boston, MA Springer US : 310-5 p.

El Alaoui A., 2007. « Fertilisation minérale des cultures : les éléments minéraux secondaires et oligo-éléments ». Transfert de technologie en agriculture au Maroc 156 p.

Estar M., Bolarin C. and Guillen G., 1988. « Efectos del nique1 en pimiento (*Cupsicrrm umzm* L) ». Agrochimicu : 379-390.

FAO, 2003. « Réglementations relatives aux mycotoxines dans les produits d'alimentation humaine et animale à l'échelle mondiale en 2003 ». Étude FAO alimentation et nutrition 81 p.

Fatarna L., Boutekrabt A., Arabi Y., et Adda A., 2017. « Impact du cadmium, du zinc et du plomb sur la germination des graines d'*Atriplex halimus* L. (Amaranthaceae) ». Revue d'Ecologie, Terre et Vie 61 p.

Foy D., Chaney R. and White M., 1978. «The physiology of metal toxicity in plants ». Am. Rev. Plant Physiol.29: 51 1-566.

Frank R., Stonefield I., Suda P. and Potter J., 1982. « Impact of nickel contamination on the production of vegetables on an organic soil, Ontario, Canada ». The Scieme offhe Total Environnterzt 24: 41-65.

Gartside Denis W., et Mcneillyf Thomas, 1974. « The potential for evolution of heavy metal tolerance in plants » 14 p.

Gayte-Sorbier A., Saurat, Busson F., et Lunven P., 1960. « Contribution à l'étude chimique d'*Eleusine coracana* Gaertner ». Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée 7 (6) : 383-86.

Godden B. et Colinet G., 2010. « Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds. » La phytoremédiation en Wallonie 103 p.

Goswami A. Prasad, et Joshi V. C., 2015. « Characterization of finger millet [*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.] germplasm for morphological parameters under field conditions ». Journal of Applied and Natural Science 7 (2): 836-38.

Hémeir Abdelhafidh, 2015. « Effet des métaux lourds (cuivre et zinc) sur les paramètres chimiques, morphologiques et biométriques de la tomate (*Lycopersicon esculentum*. Mill) » 123 p

Hewti' E. J., 1953. « Metal interrelationships in plant nutrition. I. Effects of some metal toxicities on sugar beet, tomato, oat plant, potato and narrow stem kale grown in sand culture ». J. exptl. Botat1y 4: 59-64 p.

Hittalmani Shailaja, Mahesh H. B., Meghana Deepak Shirke, Hanamareddy Biradar, Govindareddy Uday, Aruna Y. R., Lohithaswa H. C., et Mohanrao A., 2017. « Genome and Transcriptome Sequence of Finger Millet (*Eleusine Coracana* (L.) Gaertn.) Provides Insights into Drought Tolerance and Nutraceutical Properties » 16 p.

Holmgren G., Meyer W., Chaney R. L. and Daniels R. B., 1993. « Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soils of the United States of America » Emirorz. J. Qual. 22: 335-348.

Huang Ying, Qianqian Chen, Meihua Deng, Jan Japenga, Tingqiang Li, Xiaoe Yang, et Zhenli He, 2018. « Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Agricultural Soils in a Typical Peri-Urban Area in Southeast China ». Journal of Environmental Management 207 (février): 159-68.

Hyppolite Myriam, 2017. « Utilisation du pois d'angole pérenne (*cajanus cajan*) en système agroforestier, pour une meilleure conservation des sols de la louère (4ème section communale de st marc, haïti) sous culture d'arachide (*Arachis hypogaea*) » 95p.

Jaffré T. et Schmid M., 1974. Ecophysiologie. « Accumulation du nickel par une Rubiacée de Nouvelle Calédonie, Psychotria douarr-ei (G Beau visage) Diiniker ». C.R. Acud. Sc., Puris, sér. D, t. 278: 127-130.

Juste Catherine, 1988. « Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol ». Science du sol 103 p.

Juste C. et Tauzin J., 1992. « Comparaison de la biodisponibilité du Nickel contenu dans différentes matières fertilisantes ». C. R. Acad. Apric. FI-. 78: 71-79.

Kabata Alina et Henryk Pendias, 2001. « Trace Elements in Soils and Plants ». 3rd ed. Vol. 403. Boca Raton, Fla: CRC Press 403-33.

Kalonda Dominique Mudimbi, Arsène Kabamba Tshikongo, Fridolin Kodondi Kule Koto, Christian Kasongo Busambwa, Yves Kisunka Bwalya, Hervé Musola Cansa, Jean-Louis Kahambwe Tambwe, Zet Lukumwena Kalala, et Albert Longanga Otshudi, 2016. « Profil des métaux lourds contenus dans les plantes vivrières consommées couramment dans quelques zones minières de la province du Katanga ». Journal of Applied Biosciences 96 p.

Kopittke Peter M., et Neal Menzies W., 2006. « Effect of Cu Toxicity on Growth of Cowpea (*Vigna Unguiculata*) ». Plant and Soil 287-96.

Krupa Z., Siedlecka A., Maksymiec W. et Baszynski T., (1993) « In vivo response of photosynthetic apparatus of *Phaseolus vulgaris* L. to nickel toxicity ». Journal of Plant Physiology, 142,664-668.

Lebourg A., Sterckeman T., Ciesielski H., et Proix N., 1996. « Intérêt de différents réactifs d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces du sol ». Agronomie 16 (4) : 201-15.

Lathari M., Quantin P. et Aubert G., 1978. « Etude des sols de la Nouvelle-Calédonie». Notice explicative no 78, ORSTOM, Paris 35 p.

L'Huillier 1980, « Mécanismes d'action toxique du nickel chez le maïs », 9 p.

Liibben S. et Sauerbeck D., (1991) « The uptake and distribution of heavy metals by spring wheat, Watel, Ail, and Soil Pollution » 5738, 239-247 p

Macnicol R. D., et Beckett P. H. T., 1985. « Critical Tissue Concentrations of Potentially Toxic Elements ». Plant and Soil 85 (1) : 107-29

Manceau A., 1984. « Localisation du nickel dans les phyllo silicates. Application aux minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie ». Thèse, Université Pans VII, 103 p.

Manda B. Katemo, Colinet G., André L., et Chocha Manda A., 2010. « Evaluation de la contamination de la chaîne trophique par les éléments traces (Cu, Co, Zn, Pb, Cd, U, V et As) dans le bassin de la Lufira supérieure (Katanga/RD Congo) » 7 p.

Marschner P., 2012 « Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants ». Third Edition Elsevier Ltd. 651 p.

Mengel et Kirkby, 2001. « Principles of Plant Nutrition ». Annals of Botany 93 (4): 479-80.

Michaud Aurélia, 2007. « Interaction entre la biodisponibilité, phytotoxicité du cuivre et la nutrition en fer de graminées : mécanismes physiologiques et rhizosphériques ». These de doctorat, École nationale supérieure agronomique (Montpellier) 104-37.

Mula M.G. et Saxena K.B., 2010. « Lifting the Level of Awareness on pigeonpea ». A Global Perspective. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru 16 p.

Moya J.L., Ros R. et Picazo I., (1993) « Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants ». Photosynthesis Research, 36, 75-80

Nagajyoti P. C., Lee K.D et Sreekanth T.V.M., 2010. « Heavy Metals, Occurrence and Toxicity for Plants: A Review » 216 (8): 199 p.

Nareshkumar Ambekar, Gounipalli Veeranagamallaiah, Merum Pandurangaiah, Kurnool Kiranmai, Vennapusa Amaranathareddy, Uppala Lokesh, Boya Venkatesh, et Chinta Sudhakar, 2015. « Pb-Stress Induced Oxidative Stress Caused Alterations in Antioxidant Efficacy in Two Groundnut Cultivars ». Agricultural Sciences 06 (10): 123-97.

Nalovic LJ et Quantin P., 1972. « Evolution géochimique de quelques é1ements majeurs et traces dans un sol ferralitique ferrique de Nouvelle-Calédonie issu de péridotites. Interprétation d'observations à l'aide de la microsonde de Castaing ». Cuh. ORSTOM, se'r. Pedol. X: 389-410.

Navel Aline, 2011. « Distribution, spéciation impact et transfert du cuivre dans un sol sous vigne: rôle de la structuration spatiale et du statut organique » 254 p.

Ndikumana Jean Berchmans et Mbonicuye Damien, 2019. « Etude sur la mobilisation des ressources internes et la gouvernance des ressources naturelles au Burundi ». Rapport final 96 p.

Ngaram Nambatingar, 2011. « Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux du fleuve Chari lors de sa traversée de la ville de N'Djamena ». Ph D Thesis, Université Claude Bernard-Lyon I ; Université de N'Djaména 165 p.

Ntiharirizwa Seconde, 2013. « Le potentiel en ressources minérales du Burundi : Ceinture orogénique kibarienne, Afrique centre-orientale». Maîtrise Interuniversitaire en Sciences de la Terre 120 p.

Nweke I. A., Mbah C. N., et Ijearu S. I., 2017. « Influence of Tillage and Wood Ash on Zn and Fe Content of Soil, Castor Shoot and Seed ». Open Access Library Journal 4 (2) 19 p.

Olivier Husson, Charpentier Hubert, Michellon Roger, Razafintsalama Hubert, Moussa Narcisse, Enjalric Frank, Naudin Krishna, Rakotondramanana, et Seguy Lucien, 2012. « Fiches techniques plantes de couverture : Graminnées anuel, *Eleusine coracana* : pratique du semis direct à Madagascar » 8 p.

Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R., et Simons A., 2009. « Agroforestree Database: A Tree Reference and Selection Guide. Version 4. » 29 p.

Paul-André Calatayud, Jean-Pierre Garrec et Michel Nicole, 2012. « Adaptation des plantes aux stress environnementaux » 18 p.

Pich, Axel, et Günter Scholz, 1996. « Translocation of copper and other micronutrients in tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.): nicotianamine-stimulated copper transport in the xylem ». Journal of Experimental Botany 47 (1): 41-47.

Piccini D.F. et Malavolta E. (1992). « Effect of nickel on two common bean cultivars. Journal of Plant Nutrition » 15, 243-250.

PND Burundi, 2018. « Plan National de Développement du Burundi 2018-2027 » 149 p.

Puig Sergi, Nuria Andrés-Colás, Antoni García-Molina, et Lola Peñarrubia, 2007. « Copper and Iron Homeostasis in Arabidopsis: Responses to Metal Deficiencies, Interactions and Biotechnological Applications ». Plant, Cell et Environment 30 (3): 271-90.

Qasim Bashar Hussein, 2015. « Détermination, spéciation et biodisponibilité des éléments traces métalliques dans les sols contaminés et technosols » 279-24.

Salim R., Haddad M. and EL-Khatib I., 1988. « Effect of nickel treatment on the growth of eggplant ». J. Envison. Sci. Health A23 : 369-379.

Sanchez-Pardo B., Fernández-Pascual M. et Zornoza P., 2012. « Coppermicrolocalisation, ultrastructural alterations and antioxidant responses in the nodules of white lupin and soybean plants grown under conditions of copper excess ». Environ. Exp. Bot., 84 (Dec.), 52-60.

Seigneur Christian, 2018. « Pollution atmosphérique - Concepts, théorie et applications ». 40p.

Setia R. C., Kaila J. and Malk C. P., 1988. « Effects of NiCl toxicity on stem growth and ear development in *Triticum Aestivum* L. ». Phytonzorphology 38: 21-27.

Shobana S., et Malleshi N. G., 2007. « Preparation and functional properties of decorticated finger millet (*Eleusine coracana*) ». Journal of Food Engineering 79 (2): 529-38.

Sigel Astrid, Helmut Sigel, et Roland K. O. Sigel, 2005. « Biogeochemistry, Availability, and Transport of Metals in the Environment. Metal Ions in Biological Systems ». v. 44. Boca Raton: Taylor & Francis 106 p.

Taiba Ben Seghier, 2012. « Evaluation de la contamination métallique dans des sols agricoles situés à Maghnia (Hammam Boughrara) ». 111 p.

Thorne Mark, Landon Rhodes, et John Cardina, 2013. « Soil Compaction and Arbuscular Mycorrhizae Affect Seedling Growth of Three Grasses ». Open Journal of Ecology 3 (7): 455-63.

Uren N. C. 1992. « Forms, reactions, and availability of nickel in soils ». Advatzces in Agsotzonzy 48: 141-203

Vamerali T., Bandiera M. et Mosca G., 2010. « Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land ». A review. Environ. Chem. Lett., 8(1), 1-17.

Vanselow P. 1966. « Nickel. III: Diagnostic criteria for plants and soils, H. D. Chapman [ed.] ». University of California, Citrus Research Center and Agric. Experiment Station., Riverside, CA. 302-309.

Mishra D. and M. KAR. 1974. « Nickel in plant growth and metabolim ». The Botarzical Review 40: 395-452.

Vircoulon Thierry, 2019. « Mutation du secteur minier au Burundi et du développement à la captation » 14 p.

Weckx Jolanda E. J., et Herman M. Clijsters, 1996. « Oxidative Damage and Defense Mechanisms in Primary Leaves of Phaseolus Vulgaris as a Result of Root Assimilation of Toxic Amounts of Copper ». Physiologia Plantarum 96 (3): 506-12.

W.H.O., World Health Organization, 1991. « Nickel Environmental Health Criteria. » 108 Geneva 383.

White Philip J., et Martin R. Broadley, 2009. « Biofortification of Crops with Seven Mineral Elements Often Lacking in Human Diets--Iron, Zinc, Copper, Calcium, Magnesium, Selenium and Iodine ». The New Phytologist 182 (1): 49-84.

Yusuf M., Q. Fariduddin, Hayat S., et Ahmad A., 2011. « Nickel: An Overview of Uptake, Essentiality and Toxicity in Plants ». Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 86-17.

Zaghdoud Chokri, Mohamed Bagues et Kamel Nagaz, 2018. « Effets individuels et combinés du zinc et salinité sur la germination et la croissance racinaire de lentille cultivée (*Lens culinaris* Medik.) » 10 p.

Zorrig W., 2010. « Recherche et caractérisation de déterminants contrôlant l'accumulation de cadmium chez la laitue "*Lactuca sativa*"». Thèse de doctorat. Université Montpellier II /SupAgro 262 p.

ANNEXE

1. Fiche de suivis de la germination du *Cajanus cajan*

Jour et Date	***Cajanus cajan* sous l'effet du Cuivre**																					
	D0			D1			D2			D3			D4			D5			D6			Observation
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
03-oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	De 13h a 17h
04-oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	à 17H
05-oct	5	6	5	4	3	4	5	2	1	4	4	5	5	2	3	1	2	6	1	3	2	à 17H
06-oct	5	6	5	5	6	5	6	5	4	5	4	5	5	3	6	1	5	6	2	4	3	à 17H
07-oct	5	6	5	5	6	5	6	5	4	5	5	5	5	3	6	2	5	6	2	4	3	
08-oct	5	6	5	5	6	5	6	5	4	5	5	5	5	3	6	2	5	6	2	4	3	
09-oct	5	6	5	5	6	5	6	5	4	5	5	5	5	3	6	2	5	6	2	4	3	
Jour et Date	***Cajanus cajan* sous l'effet du Nickel**																					
	D0			D1			D2			D3			D4			D5			D6			Observation
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
03-oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	De 13h a 17h
04-oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	à 17H
05-oct	5	6	5	4	4	1	3	5	3	3	2	4	2	4	4	2	2	1	3	1	1	à 17H
06-oct	5	6	5	4	4	1	3	5	3	3	2	4	2	4	4	2	2	1	3	1	1	à 17H
07-oct	5	6	5	4	4	1	3	5	3	3	2	4	2	4	4	2	2	1	3	1	1	
08-oct	5	6	5	5	6	6	4	5	4	4	4	5	5	4	3	2	3	4	2	3	2	
09-oct	5	6	5	5	6	6	5	5	4	4	4	5	6	3	3	4	4	3	3	2	3	

2. Fiche de suivis de la germination de l'*Eleusine coracana*

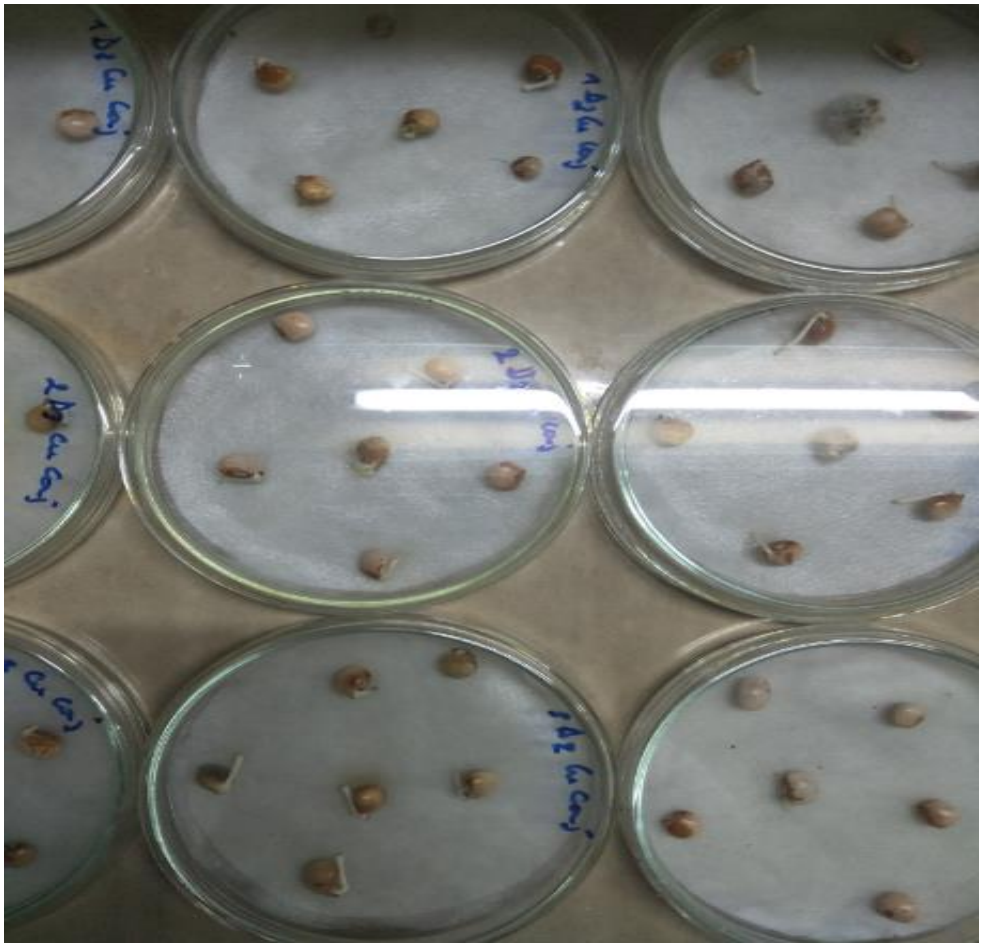
Eleusine coracana sous l'effet du Cuivre																						
	D0			D1			D2			D3			D4			D5			D6			Observation
Jours	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
03-oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
04-oct	8	6	7	9	9	9	5	7	4	5	3	4	1	4	4	1	3	0	0	0	0	
05-oct	11	8	9	9	9	9	5	7	4	5	3	5	3	5	4	1	3	0	2	0	0	
06-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	
07-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	
08-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	
09-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	
	Eleusine coracana sous l'effet du Nickel																					
	D0			D1			D2			D3			D4			D5			D6			Observation
Jours	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
03-oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
04-oct	8	6	7	9	9	9	5	7	4	5	3	4	1	4	4	1	3	0	0	0	0	
05-oct	11	8	9	9	9	9	5	7	4	5	3	5	3	5	4	1	3	0	2	0	0	
06-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	
07-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	
08-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	
09-oct	12	9	11	10	9	11	8	8	6	8	4	5	3	5	5	1	3	1	3	0	0	

3. Fiche de suivi de la croissance du *Cajanus cajan*

Jour et Date	HAUTEUR							FEUILLE							NŒUD							FEUILLES TOMBES						
	0mg/kg	10 mg/kg	20 mg/kg	40 mg/kg	80 mg/kg	160 mg/kg	320 mg/kg	0mg/kg	10 mg/kg	20 mg/kg	40 mg/kg	80 mg/kg	160 mg/kg	320 mg/kg	0mg/kg	10 mg/kg	20 mg/kg	40 mg/kg	80 mg/kg	160 mg/kg	320 mg/kg	0mg/kg	10 mg/kg	20 mg/kg	40 mg/kg	80 mg/kg	160 mg/kg	320 mg/kg
J5	6	6	6	7	6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J15	17	16	16	17	16	8	5	2	2	2	2	2	2	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
J25	28	25	25	26	22	14	6	5	5	4	5	4	4	2	4	4	3	4	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0
J35	37	32	28	33	25	14	6	8	7	6	7	6	5	2	7	6	5	6	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0
J45	50	41	35	43	29	15	0	11	10	6	9	7	6	0	10	9	5	8	6	5	0	0	0	1	0	0	0	0
J55	61	58	44	52	34	17	0	11	11	8	11	8	6	0	11	11	7	10	7	5	0	1	1	2	0	0	1	0
J65	71	65	59	61	37	18	0	12	11	11	12	8	5	0	13	11	11	12	7	5	0	2	2	2	1	0	1	0
J75	76	70	65	62	39	18	0	12	11	12	11	7	5	0	14	13	12	12	8	5	0	3	3	3	2	2	1	0
J85	80	74	69	65	40	18	0	13	11	13	11	7	5	0	17	14	15	14	10	5	0	4	4	4	4	3	1	0

J 9 5	82	76	72	66	0	0	0	12	11	13	12	0	0	0	18	16	17	17	0	0	0	6	6	6	5	0	0	0

4. Fiche de suivi de la croissance de l'*Eleusine coracana*



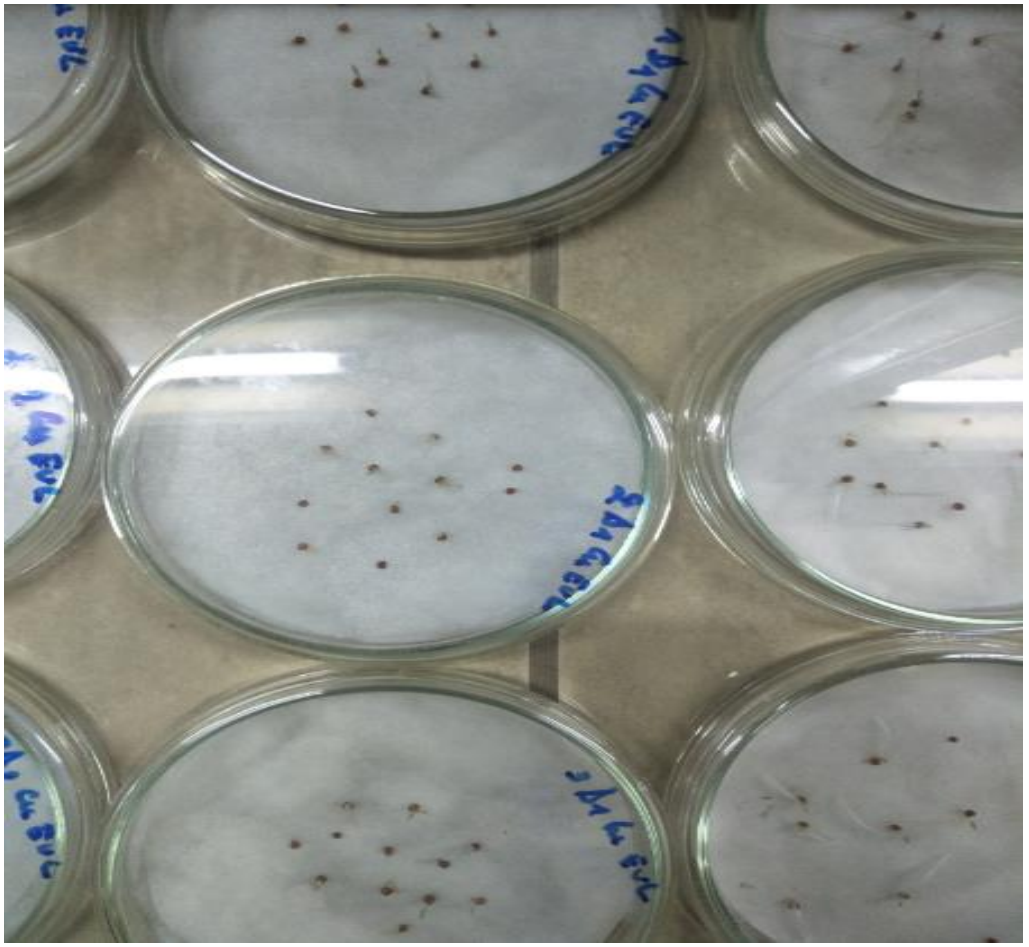




Photo illustrant la croissance du *Cajanus cajan*



Photo illustrant la croissance de l'*Eleusine coracana*



Photos illustrant la Mesure en hauteur et de la biomasse de la plante



Photo illustrant la mesure du Biomasse de la plante