

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire - Salhi Ahmed - Nâama

Institut des Sciences et de Technologie

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Laboratoire de recherche :

Gestion durable des ressources naturelles dans les zones arides et semi-aride



MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER Académique

En Sciences Biologiques

Spécialité : Biodiversité et physiologie végétale

Présenté Par :

Boutaiba Nor Elhouda

Kaddour Nadia

Thème

*Phytoremédiation Des eaux polluées en Métaux Lourds Le Cas De
Nickel par L'utilisation de L'Azolla Caroliniana*

Soutenu le : 07/07/2022

Devant les membres de jury :

Président : Dr. Bekkouche Assia MCA, Centre Universitaire de Nâama

Examineur : Dr. Nouri Tayeb MCA, Centre Universitaire de Nâama

Encadreur : Dr. Ferrah Nacer MCA, Centre Universitaire de Nâama

Année Universitaire : 2021/2022



REMERCIEMENT

Avant tout louer à Dieu le tout puissant pour nous avoir donné courage, la volonté et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier Dr. Ferrah Nacer pour l'encadrement, les encouragements et pour sa disponibilité et ses orientations qu'il m'a accordés au cours de la réalisation de ce travail de recherche.

Constructives. Il a su nous transmettre sa passion pour l'informatique et les réseaux, sans lui ce projet n'aurait jamais vu le jour. A vrai dire, nous lui sommes profondément reconnaissants et on ne saurait le remercier assez.

Nos chères gratitude s'adressent à Dr. Bekkouch Assia pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit et pour lui' avoir aidé dans notre cheminement universitaire. Les mots nous manquent pour nous remercier et d'adresser notre entière satisfaction.

Nos chères reconnaissances au Dr. Nouri Tayeb de nous avoir fait l'honneur de présider le jury, pour les remarques qu'il nous adressera lors de cette soutenance afin d'améliorer notre travail.

Sans oublier tous les autres enseignants qui nous ont prodigués leur savoir et leurs expériences.

Nous exprimons notre gratitude et nos sincères remerciements à l'ingénieur de laboratoire chimie Mr. Abed El-ghani, Bouaouina et l'ingénieur de la serre semi-automatique Mr. Aliwa Miloud pour leurs aides.

Nous adressons nos remerciements et notre gratitude à tous nos amis qui ont participé à notre voyage d'étude et nous avons eu les plus beaux souvenirs avec eux et ils étaient comme notre famille.

En fin, que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.



Dédicace

Gloire à Dieu et louange à celui qui m'a permis d'accomplir cet humble travail afin qu'il soit le fruit de mes efforts pendant des années d'études et le plus beau cadeau que je présente à :

- À mon cher **père**, qui m'a appris l'estime de soi, la pureté du cœur et les nobles manières, à celui qui a exaucé toutes mes demandes, et dont les prières m'ont préservé dans toutes mes démarches, et qui a pris soin de moi et m'a élevé à mon père, mon bon assistant, qui a été pour moi dans l'adversité, que Dieu prolonge sa vie
- À ma chère **mère**, qui a pleuré de joie de ma réussite, j'ai cherché mon ambition et mes espoirs, qui m'ont appris la vie et l'amour de l'existence, qui m'ont ouvert les yeux sur des horizons et un avenir prospère.
- À mon cher **petit frère**, Mohammed Amine, qui m'a soutenu dans la vie, que Dieu vous protège et prenne soin de vous, et vous souhaite tous les bonheurs
- À mon cher **papillon** Houda, qui était comme ma seconde moitié et la personne la plus gentille que je connaisse et qui a partagé avec moi les plus beaux souvenirs avec mes meilleurs vœux pour une vie heureuse et un avenir prospère.
- À toutes mes **copines** et **amies** promotionnelles avec qui je partage tous les souvenirs inoubliables
- À tous mes **professeurs** tout au long de mes études



Nadia



Dédicace

Je dédie cet humble effort à ceux pour qui, quels qu'en soient les termes je ne pourrai jamais communiquer ma véritable affection, mon don divin inestimable, responsable de ma vie, de ma réussite et de tout mon respect :

Mon cher père, qui n'a cessé de me conseiller, de m'encourager et de me soutenir tout au long de mes études.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences, et qui n'a ménagé aucun effort pour me rendre heureux : Ma mère adorée.

Que Dieu leur accorde une longue et heureuse vie.

A mes chères frères et sœur toutes les personnes de ma grande famille

A tous mes amis et camarades de promotion, puisse Dieu conserver notre amitié.

A ma meilleures amies : Asma. Fatima. Hadja. Iman. Merci pour les belles journées que j'ai passées avec vous

Sans oublier ma collègue Nadia, pour notre amitié et nos souvenirs partagés, ainsi que son soutien moral, sa patience et sa compréhension durant ce mémoire

Nor El Houda

Résumé :

Ce mémoire porte sur une technique biologique de dépollution des eaux, nommée phytoremédiation, Elle se base sur une utilisation de végétaux spécifiques, pouvant se développer sur des eaux à fortes concentrations en polluants. La technique se développe sur des sites où les contaminations aux polluants peuvent avoir des impacts néfastes pour l'homme

La phytoremédiation du nickel (Ni), appliqué pendant cinq semaines, a été étudiée avec l'utilisation de l'*azolla caroliniana*. La plante a été multipliée en solution et dans des pots contenant de l'eau contaminé par Nickel (50, 100 mg/L). L'accumulation de nickel dans les différentes parties de la plante a été analysée par spectrophotomètre UV-visible. Les résultats obtenus montrent que le nickel s'accumule dans les racines et les feuilles. L'ajout de concentration de nickel à l'eau a entraîné une augmentation alternative de la concentration de nickel dans les racines et les feuilles. Le rendement d'extraction atteint 62%, ce qui classe la plante comme un excellent candidat pour l'extraction du Nickel.

Enfin, on peut dire que la plante *l'azolla caroliniana* est une très bonne alternative pour la phytoextraction des eaux contaminés par le Nickel et apporte une contribution aux études sur le potentiel des technologies de la phytoremédiation en Algérie.

ABSTRACT

This dissertation focuses on a biological technique for depolluting water, called phytoremediation. It is based on the use of specific plants, which can grow in water with high concentrations of pollutants. The technique is being developed on sites where contamination by pollutants can have harmful impacts for humans.

Phytoremediation of nickel (Ni), applied for five weeks, was studied with the use of *Azolla caroliniana*. The plant was propagated in solution and in pots containing water contaminated with Nickel (50, 100 mg/L). The accumulation of nickel in the different parts of the plant was analysed by UV-visible spectrophotometer. The results obtained show that nickel accumulates in the roots and leaves. Adding nickel concentration to water resulted in a significant increase in nickel concentration in roots and leaves. The extraction yield reaches 62%, which classifies the plant as an excellent candidate for nickel extraction.

Finally, we can say that the *Azolla caroliniana* plant is a very good alternative for the phyto-extraction of water contaminated by nickel and contributes to studies on the potential of phytoremediation technologies in Algeria.

ملخص

يركز هذا البحث على تقنية بيولوجية لإزالة تلوث المياه تسمى المعالجة بالنباتات. يعتمد على استخدام نباتات معينة يمكن أن تنمو في المياه ذات التركيزات العالية من الملوثات. يتم تطوير هذه التقنية في المواقع التي يمكن أن يكون للتلوث فيها آثار ضارة على البشر.

تم إكثار النبات *Azolla caroliniana*، المطبق لمدة خمسة أسابيع، باستخدام (Ni) تمت دراسة المعالجة النباتية للنikkel في محلول وفي أن واحد تحتوي على ماء ملوث بالنikkel (50، 100 مجم / لتر). تم تحليل تراكم النikkel في أجزاء مختلفة من النبات بواسطة مقياس الطيف الضوئي المرئي بالأشعة فوق البنفسجية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن النikkel يتراكم في الجذور والأوراق. أدت إضافة تركيز النikkel إلى الماء إلى زيادة معنوية في تركيز النikkel في الجذور والأوراق. يصل مردود الاستخلاص إلى 62٪، مما يجعل النبات مرشحاً ممتازاً لاستخراج النikkel.

أخيراً، يمكننا القول إن نبات أزولا كارولينا هو بديل جيد جداً لاستخراج المياه الملوثة بالنikkel ويساهم في الدراسات حول إمكانات تقنيات المعالجة النباتية في الجزائر.

Sommaire

Introduction générale	1
I. Etude de processus de phytoremédiation	
1. Généralités	3
2. Définition de la phytoremédiation	3
3. Principe de la phytoremédiation	3
4. Les techniques de la phytoremédiation	4
4.1. La phytostabilisation	4
4.2. La phytoextraction	5
4.3. La phytodégradation	5
4.4. La Phytovolatilisation	6
4.5. La Rhizofiltration	6
5. Les Limites et les avantages de la phytoremédiation	7
➤ Les limites de la phytoremédiation	7
➤ Les avantages de la phytoremédiation	7
6. Les plantes accumulatrices	7
7. La phytoremédiation des sols	8
8. La phytoremédiation des eaux	8
II. Impact des métaux lourds sur l'environnement : présence et impact	
1. Introduction	9
2. Généralités sur les métaux lourds	9
2.1. Définition	9
2.2. Les Caractéristiques des métaux lourds	9
A. Propriétés physico-chimiques	10
B. Toxicité des métaux lourds	10
2.3. L'Origine des métaux lourds	10
2.3.1. L'Origine naturelle	10
2.3.2. L'Origine anthropique	10
2.4. La Classification des métaux lourds	10
2.4.1. Les métaux essentiels	10
2.4.2. Les métaux toxiques	11
3. Les impacts des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé	11
3.1. L'Effets sur la santé humaine	11
3.2. L'Effets des métaux lourds sur l'environnement	11
4. Quantification et Dosage des métaux lourds par absorption atomique	12
4.1. La Technique et appareillage	12
III .Plantes Accumultrices	
1. Définition	13
2. L'utilisation des plantes hyperaccumultrices	13
1.2. L'Azolla caroliniana	15
1.2.1 L'Origine	15

1.2.2. La Classification de l'Azolla caroliniana	15
1.2.3. La Multiplication d'Azolla caroliniana	17
a) Reproduction sexuée	17
b) Reproduction végétative	17
c) Propagation par l'homme	18
1.2.4 Impact de l'Azolla	18
a) Impacts sur la santé humaine	18
b) Impact sur la biodiversité	18
1.2.5 Les Conditions écologiques pour la production et la multiplication de l'Azolla :	19

Liste des tableaux

Tableau .01 : Types de métaux lourds et leurs effets sur la santé humaine	14
Tableau .02 : Taxonomie de l'Azolla	16
Tableau .03 : jardinache de l'Azolla caroliniana	19
Tableau .04: les appareils utilisés	21
Tableau .05 : instruments utilisés	22
Tableau .06 : les caractéristiques physico-chimiques de la solution de 1-2-pyridylazo naphtol PAN	23
Tableau .07 : les valeurs de courbe d'étalonnage de nickel	26
Tableau .08: les valeurs de courbe d'effet du temps de contact sur l'accumulation de nickel par l'Azolla caroliniana	28
Tableau .9 : les valeurs de courbe d'effet du pH sur l'accumulation de nickel par l'Azolla caroliniana	31
Tableau .10 : les valeurs de courbe d'effet de concentration sur l'accumulation de nickel par l'Azolla caroliniana	34
Tableau .11 : les valeurs de courbe d'effet de température sur l'accumulation de nickel par l'Azolla caroliniana	36
Tableau .12 : les valeurs de courbe d'effet de stress salin sur l'accumulation de nickel par l'Azolla caroliniana	37

Listes des figures

Figure .01 : Schéma représentant les différentes techniques de la phytoremédiation	4
Figure .02 : La phytoextraction	5
Figure .03 : exemple illustrant La phytodégradation des polluants organiques	5
Figure .04 : La Phytovolatilisation des contaminants toxiques	6
Figure .05 : La Rhizofiltration les polluants dans le sol	6
Figure .06: Schéma de principe d'un spectrophotomètre à double faisceau	12
Figure .07 : Origine et distribution dans le monde de l'Azolla caroliniana	15
Figure.08 : schéma présentation la plante l'Azolla caroliniana	16
Figure.09 : schéma présentation de la multiplication de la plante l'Azolla caroliniana	17
Figure.10 la serre semi-automatique	20
Figure.11 : représente la plante l'Azolla caroliniana avant et après la multiplication (Boutaiba .H, Kaddour .N ,2022)	22
Figure.12 Préparation de la solution nutritive de nickel à partir tous les effets	25
Figure .13 : courbe d'étalonnage de d'Osage de nickel par spectrophotométrie UV-VISIBLE (Absorbance =0.0062.concentration +0.27)	26
Figure .14 : Effet du temps de contact sur le rendement d'accumulation du nickel par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, W= 10 g Vsol = 2 L	29
Figure .15 : Effet du temps de contact sur la capacité d'accumulation du nickel par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, W= 10 g V sol = 2 L	29
Figure .16 : Effet du temps de contact sur le rendement d'accumulation du nickel par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 50 ppm, W= 10 g V sol = 2 L	30
Figure .17 : Effet du temps de contact sur la capacité d'accumulation du nickel par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 50 ppm, W= 10 g V sol = 2 L	30
Figure .18 : Effet du pH sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale =100ppm, W= 10g, V sol =2L	32
Figure .19 : Effet du pH sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, W= 10g, V sol =2L	32

Figure .20 : présentation l'impact pH sur l'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana	33
Figure .21 : Effet de concentration sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; pH =6, W= 10g, V sol =2L	34
Figure .22 : Effet de concentration sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; pH =6, W= 10g, V sol =2L	35
Figure .23 : Effet de température sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, W= 10g, V sol =2L	36
Figure .24 : Effet de température sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, W= 10g, V sol =2L	37
Figure .25 : Effet de stress salin sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, W= 10g, V sol =2L	38
Figure .26 : Effet de stress salin sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'Azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, W= 10g, V sol =2L	38

Liste des abréviations

g	Gramme
Ni	Nickel
Ppm	Partie par million
%:	Pourcentage
mg/L	Milligramme par litre
R	rendement
q	capacité de rétention
C	Concentration
PH	potentiel hydrogène
UV visible	ultra-violet visible
V sol	Volume de solution

les Mots clés

La phytoremédiation

les métaux lourds (Nickel)

plantes hyper accumulatrices (l'Azolla caroliniana)



**Introduction
Générale**

Introduction générale

La contamination de l'environnement est un facteur critique qui peut affecter la productivité des plantes, et mettre en danger la santé humaine et animale.

Une pollution globale de l'environnement par les métaux lourds et leur concentration croissante dans l'eau devient un problème écologique qui affecte les communautés humaines à tous les niveaux (Ali-Zade et Al, 2010 ; Kabata-Pendias, 2011)

Les métaux lourds ont des effets néfastes sur les populations bactériennes à l'échelle microscopique, ce qui a des conséquences sur le fonctionnement de l'écosystème. Le développement de procédures efficaces de décontamination des lieux pollués est devenu indispensable ces dernières années. L'une d'elles, la phytoremédiation, tire parti de la capacité de certaines plantes à accumuler de grandes quantités de métaux lourds (Rufus et al. 1997, Salt et al. 1998, Prabha et al. 2007).

Environ 400 espèces de plantes dites hyper-accumulatrices ont la capacité d'absorber de grandes quantités de métal. Les espèces hyper-accumulatrices produisent une petite quantité de biomasse, alors que les plantes qui produisent une grande quantité de biomasse ne peuvent absorber que de petites quantités de métal (Kabata-Pendias, 2011).

La phytoremédiation est l'utilisation de plantes pour éliminer ou dégrader les toxines organiques et inorganiques du sol et de l'eau (Suthersan, 2001). Pour la phytoremédiation, il existe deux stratégies de base : la première consiste à utiliser des plantes hyper-accumulatrices et la seconde à utiliser la phytoextraction assistée chimiquement (Wu et al, 2007). Cependant, l'un des principaux objectifs de la recherche en phytoremédiation est d'identifier la plante la plus appropriée, pour accumuler des polluants.

Ces dernières années, l'accent a été mis de plus en plus sur le développement de nouvelles usines dotées de grandes capacités de stockage de métaux lourds (Ali-Zade et al, 2010). Les plantes candidates à l'élimination des métaux lourds, en particulier, doivent être résistantes et capables de transporter des métaux toxiques (Macek et al, 2004).

La majorité des études sur ce sujet en Algérie portent sur la sélection des plantes à forte accumulation et de leurs racines, car la phytoremédiation présente plusieurs avantages : elle est économiquement moins coûteuse car les produits végétaux peuvent être valorisés et utilisés pour extraire des minéraux à haute valeur ajoutée, elle améliore le rendement, et elle est compatible avec les politiques environnementales. Peu d'études ont porté sur la phytoremédiation des eaux contaminées au Nickel (Wenzel, 2009 ; Kuffner et al. 2008).

Les diverses approches de la phytoremédiation comprennent la phytodégradation, phytoextraction, phytostabilisation, phytovolatilisation et la rhizofiltration. Cependant, l'un des principaux objectifs de la recherche sur la phytoremédiation est la sélection des espèces végétales les plus aptes à accumuler des polluants.

Les métaux lourds sont des substances qui se trouvent naturellement, généralement à de faibles niveaux, dans le sol. Cependant, les métaux les plus couramment trouvés sur les sites contaminés sont le chrome (Cr), le zinc (Zn) et le nickel. Émis par les processus industriels (Hill, 2004).

Le Nickel est considéré comme un métal toxique qui est libéré du traitement de surfaces des métaux, de la combustion du charbon et du pétrole. De plus, certaines boues d'épuration peuvent être des sources importantes de Nickel dans les eaux. Cela peut provoquer diverses maladies, principalement pour ceux qui vivent près des raffineries (Wuana et al, 2011, Kabata Pendais, 2011)

Pour répondre à ces interrogations, une expérimentation a été menée sur la serre semi-automatique (ville de Naama) avec une plante hyper accumulatrice (l'*Azolla caroliniana*.) Dans une eau par l'ajout d'une solution de nickel à différentes concentrations. Les résultats obtenus sont présentés dans ce mémoire.

Une synthèse bibliographique qui retrace la Phytoremédiation des eaux polluées en métaux lourds par l'utilisation de l'*Azolla caroliniana* et sur les mécanismes principaux de la technique de phytoremédiation sur l'accumulation de nickel dans la plante *Azolla caroliniana*. Cette synthèse est répartie en trois axes :

- Etude de processus de phytoremédiation
- L'impact des métaux lourds sur l'environnement : présence et impact
- Plantes Accumulatrices

Un deuxième chapitre, qui regroupe le matériel et le protocole où sont décrits le matériel biologique et physico-chimique utilisé, le protocole expérimental et les techniques d'analyse.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus le long de ce travail.

Enfin, le travail est clôturé par une conclusion générale.



**Etude
Bibliographique**

I. Etude de processus de phytoremédiation

1. Généralités

La phytoremédiation est un ensemble de stratégies qui utilisent les plantes pour réduire, éliminer, décomposer ou immobiliser les toxines environnementales, en particulier celles d'origine humaine, afin de remettre les sites d'une zone dans un état utilisable pour des activités privées ou publiques. (Peer et Baxter, 2000).

Les activités de phytoremédiation à base de plantes sont principalement axées sur l'utilisation des plantes. Accélérer la dégradation des polluants organiques, généralement en collaboration avec les micro-organismes racines de la zone racinaire, ou éliminer les métaux lourds dangereux du sol ou de l'eau.

La phytoremédiation des sites contaminés est une méthode relativement peu coûteuse et une technique verte pour le public par rapport à d'autres stratégies de restauration qui impliquent l'utilisation des produits chimiques sur place. La combinaison des technologies offre le plus grand potentiel pour une phyto-remédiation efficace des sites contaminés.

Le sujet principal de cette partie est l'étude de l'extraction des métaux toxiques par des plantes hyper accumulatrices (Peer et Baxter, 2000).

2. Définition de la phytoremédiation

L'utilisation des plantes pour extraire ou modifier des polluants organiques et inorganiques est connue sous le nom de phytoremédiation, et elle est définie comme "phyto" = plante et "remedium" = rétablissement de l'équilibre, remédiation. (ATMA W, 2017)

La phytoremédiation, également appelée phytodépollution, est un procédé de bioremédiation qui consiste à utiliser des plantes non polluantes et des micro-organismes associés pour assainir les sols en immobilisant, extrayant ou biodégradant les polluants. Cette technologie se concentre sur la purification de l'eau et la décontamination des sols.

3. Principe de la phytoremédiation

Le principe de la phytoremédiation repose sur l'utilisation de plantes pour éliminer les contaminants d'un environnement contaminé. En effet, certaines plantes ont la capacité de fixer, de dégrader ou d'accumuler des polluants qui présentent des similitudes atomiques ou moléculaires avec les nutriments dont elles ont besoin pour leur croissance. (Gherib, A et al ,2016)

4. Les techniques de la phytoremédiation

La phytoremédiation est une expression large qui englobe deux stratégies de remédiation : I la phytostabilisation, qui vise à réduire la mobilité des polluants, notamment les métaux, dans les sols ou sédiments contaminés, qu'ils soient organiques (pesticides) ou inorganiques (radionucléides, métaux). Il existe plusieurs méthodes de phytoremédiation (utilisant des plantes) ainsi que des approches dites de mycoremédiation (utilisant des champignons) ou de phytoremédiation (utilisant des bactéries). (Origo et al, 2012).

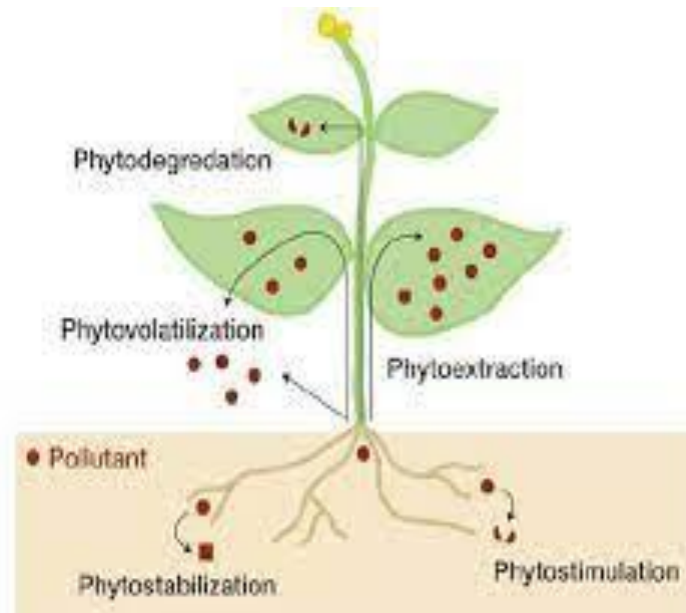


Figure .01 : Schéma représentant les différentes techniques de la phytoremédiation (Origo et al, 2012).

4.1. La phytostabilisation

La Phytostabilisation se fait par les racines. Celles d'un peuplier peuvent ainsi séquestrer des polluants (Arsenic, Nickel et Uranium) qui se seraient dispersés jusqu'à les nappes phréatiques, par exemple. Cette technique permet notamment de limiter l'infiltration profonde des métaux, mais aussi de prévenir l'érosion éolienne des poussières métalliques présentes en surface grâce au couvert végétal en surface. (Jamal et ghorbal, 2002).

4.2. La phytoextraction

La phytoextraction consiste à extraire les polluants qui sont aspirés par les racines de certaines plantes, comme le Tournesol ou l'Alyssum Murale. Les métaux captés sont ensuite valorisés, soit par réaction chimique soit par un procédé très spécifique de combustion. (Dechamp et Meerts, 2003).

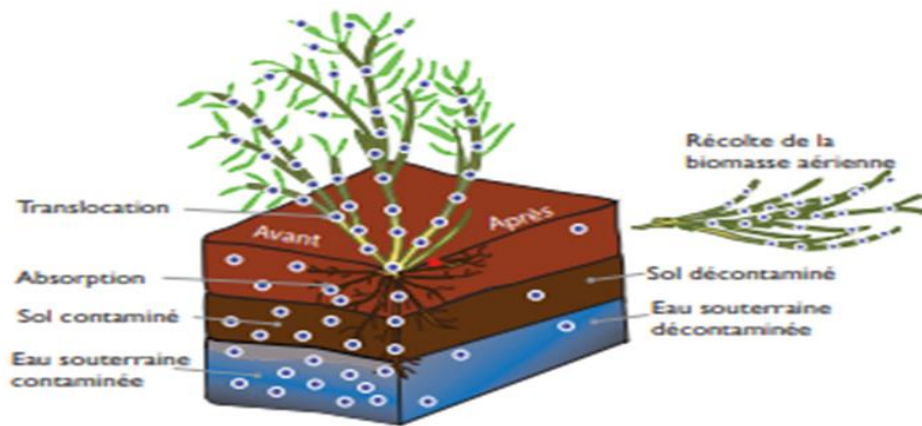


Figure .02 : La phytoextraction (Dechamp et Meerts, 2003).

4.3. La phytodégradation

Les saules sont par exemples des plantes spécialisées en phytodégradation. Leurs molécules développent des enzymes dont l'action dégrade significativement les polluants tels que les hydrocarbures, les pesticides et même les résidus d'explosifs. (Murphy, AS (2005). al).

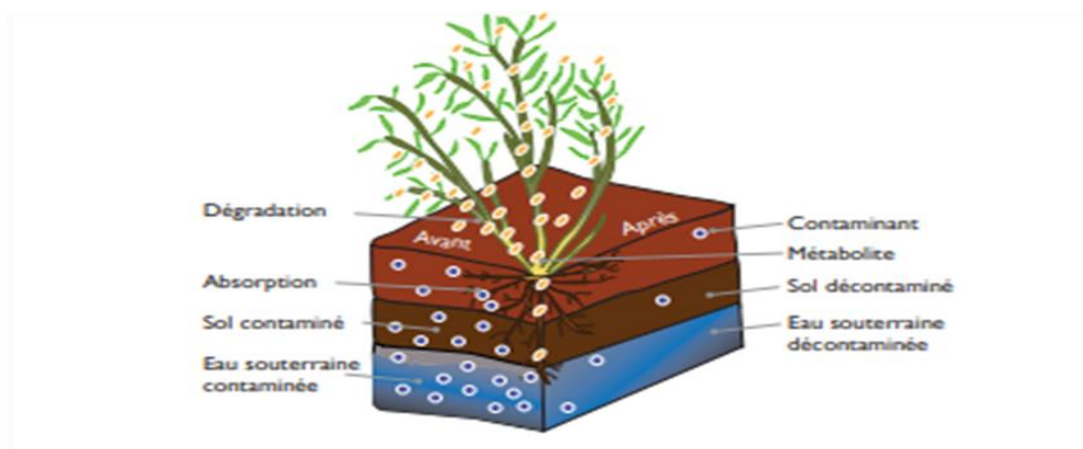


Figure .03 : exemple illustrant La phytodégradation des polluants organiques. (Murphy, AS (2005). al).

4.4. La Phytovolatilisation

Elle se base sur l'utilisation de plantes qui absorbent des contaminants toxiques tels que le mercure, le sélénium et l'arsenic (Hg, Se, As), afin de transformer certains éléments volatils du sol sous forme gazeuse (ex., le diméthylsélénide) et de les éliminer dans l'atmosphère par évapotranspiration via leurs feuilles. (Murphy, AS (2005). A1)

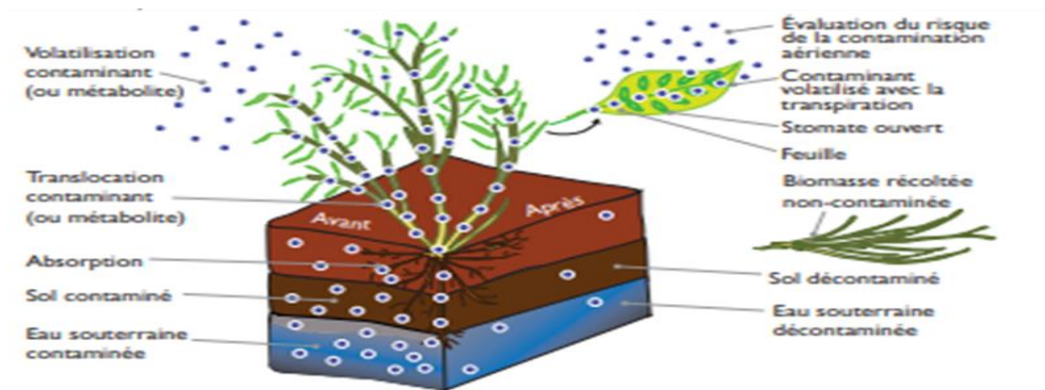


Figure .04 : La Phytovolatilisation des contaminants toxiques (Murphy, AS (2005). A1)

4.5. La Rhizofiltration

La rhizofiltration appelée également la phytoépuration (ou la phytofiltration), utilise des racines des plantes pour dégrader et/ou éliminer les polluants des effluents (eaux de surface, eaux souterraines extraites, eaux usées, boues liquides). Les systèmes racinaires favorisent la dégradation et la minéralisation de composés organiques, ils absorbent, précipitent et concentrent les métaux. (Raskin et al. 1994).

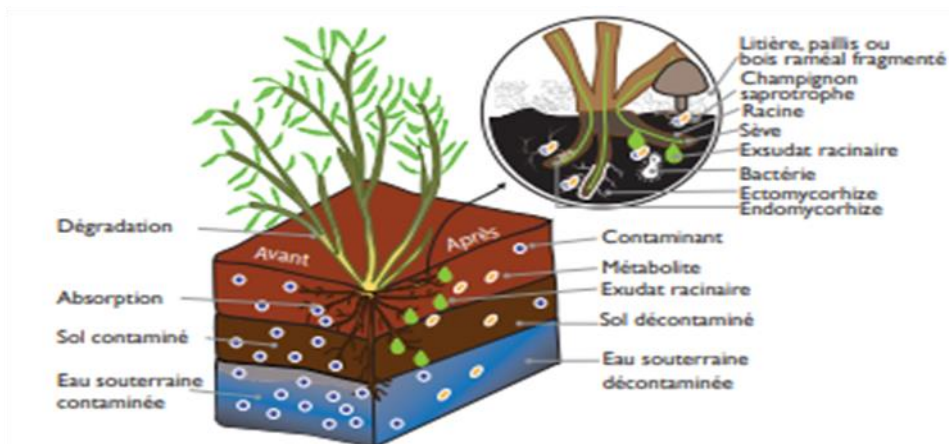


Figure .05 : La Rhizofiltration les polluants dans le sol (Raskin et al. 1994).

5. Les Limites et les avantages de la phytoremédiation

➤ Les limites de la phytoremédiation

Voici quelques-unes des limites de l'utilisation du processus de phytoremédiation :

- La méthode est inefficace lorsqu'il s'agit de niveaux élevés de contamination.
- Le contact avec la racine est nécessaire.
- La nécessité pour les polluants d'être biodégradables
- Le Risque de contamination de la chaîne alimentaire
- Les procédures de phytoremédiation nécessitent suffisamment de temps.

➤ Les avantages de la phytoremédiation

- Les Services éco-systémiques
- L'Amélioration de la biodiversité
- La Conservation de la structure et propriétés des sols
- Le Polyvalente
- Le Socialement acceptable
- Les Meilleures esthétique visuelle des sites
- L'Économique et durable

6. Les plantes accumulatrices

Les plantes hyperaccumulatrices de métaux lourds (zinc, cuivre, plomb, chrome, sélénium, arsenic, mercure, cadmium, nickel, argent et platine) sont capables d'absorber et de décontaminer les eaux et les sols pollués. Des milliers de plantes hyperaccumulatrices ou tolérantes aux métaux lourds ont été identifiées, chacune avec sa propre niche. (Jost-Tse, Y. C. (2018)).

Brassica, Thlaspi, Apocynum, Aeollanthus et Paspalum, entre autres, ont été identifiés comme ayant la capacité d'hyper-accumuler des métaux spécifiques du sol. Le nombre de groupes taxonomiques de plantes varie selon le métal ; plusieurs groupes de plantes (> 20/métal) ont été identifiés comme ayant la capacité d'hyperaccumuler Co, Cu et Zn, tandis que seuls quelques-uns (5/métal) ont été identifiés comme ayant la capacité d'hyperaccumuler Pb et Cd.

Le coefficient de phytoextraction (coefficient de partage plante-sol) de certains métaux est également important. Préoccupations. Pour certains métaux (Cr, Cd et Ni), cette valeur peut atteindre 30 ou plus, mais pour d'autres (Pb), la séparation n'est pas très bénéfique (2). (Chour, Z. (2018)).

Afin de répondre aux limitations actuelles de l'utilisation des plantes dans la phytoextraction des métaux du sol, la recherche sur les processus gouvernant l'absorption des métaux dans les usines sur :

- 1- l'amélioration de la disponibilité des métaux dans le sol
- 2- l'amélioration des caractéristiques par la sélection et la biotechnologie
- 3- l'exploration des mécanismes d'hyper accumulation des plantes

7. La phytoremédiation des sols

La phytoremédiation est le processus de décontamination des sols en utilisant des plantes capables de fixer les métaux lourds, de survivre et de se reproduire dans des environnements auparavant hostiles. Il permet également la revégétalisation des terres.

Lorsqu'un sol contient une concentration anormale de composés chimiques qui pourraient être nocifs pour l'homme, les plantes ou les animaux, on dit qu'il est pollué. . Ces contaminants environnementaux appartiennent à une classe dangereuse de produits chimiques organiques, (Koller E. 2004)

8. La phytoremédiation des eaux

La phytoremédiation des eaux usées est une technologie qui s'adapte aux conditions climatiques, géologiques et socio-économiques algériennes. Il s'agit d'un procédé d'épuration respectueux de l'environnement, propre et non polluant basé sur des éco-systèmes dans lesquels les plantes et les sources d'énergie renouvelables jouent un rôle important. (Allouche, N. F. (2006)).

Les plantes aquatiques contribuent à l'élimination de l'azote, du phosphore, des éléments nutritifs et de la matière organique, ainsi qu'à l'accumulation de métaux lourds. De plus, les colonies bactériennes attachées et leur persistance sur les rhizomes de la plante permettent une dégradation efficace des matières organiques polluantes dans l'eau. Pendant ce temps, le mécanisme de convection se charge de pousser l'air des feuilles vers la zone racinaire. (Abdel-Shafy. HI et al 2018)

II. Impact des métaux lourds sur l'environnement : présence et impact

1. Introduction

La présence de métaux lourds dans les sols peut être d'origine naturelle ou artificielle. L'origine naturelle des métaux lourds est déterminée par la base pédo-géochimique locale ainsi que la quantité de poussières et d'aérosols libérés dans l'atmosphère par l'activité volcanique, les embruns marins et d'autres facteurs. La chimie de la roche mère aura un impact sur la richesse métallique éventuelle du sol. Cela s'ajoute aux sources anthropiques telles que l'exploitation minière et le traitement des minerais, la fabrication et l'utilisation d'engrais et de pesticides, l'industrie chimique, les rejets et l'incinération des déchets ménagers et industriels, etc. L'achèvement des cycles biogéochimiques des métaux dans les sols et les végétaux modifie la forme chimique des éléments traces métalliques et contribue à leur évolution dans le sol. Enfin, les transferts pédologiques verticaux (Bert et Deram, 1999).

2. Généralités sur les métaux lourds

2.1. Définition

Les métaux lourds sont généralement définis comme des éléments métalliques naturels dont la masse volumétrique est supérieure à 5 000 kg/m³. Ils sont naturellement présents dans notre environnement et sont largement utilisés dans l'industrie. Typiquement émis sous forme de particules très fines, ils sont transportés par le vent et disséminés dans les sols et les milieux aquatiques, contaminant la faune et la flore et finissant par retourner dans la chaîne alimentaire. (Aranguren, M. M. S. (2008)).

2.2. Les Caractéristiques des métaux lourds

A. Propriétés physico-chimiques

Les métaux lourds ont les mêmes propriétés physiques que les autres métaux (conductivité thermique et électrique élevée). Ils sont fortement électropositifs et produisent des cations métalliques à charge variable par perte d'électrons. Ces cations métalliques, qui ont à la fois une densité de charge élevée et un caractère électrophile, peuvent former des liaisons ioniques, covalentes ou intermédiaires avec des ligands, conduisant à des complexes plus ou moins stables. (Diard, P. (1996)).

B. Toxicité des métaux lourds

Le caractère toxique des métaux lourds est principalement dû à : • Leur incapacité à se dégrader :

- Leur non-dégradabilité.
- Leur toxicité à faible concentration.
- Leur propension à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des chaînes trophiques.
- La toxicité d'un métal dans l'environnement est déterminée par la forme chimique sous laquelle il existe. Le cas du manganèse et de l'arsenic, par exemple, est plus toxique que le cas du II MN et de l'arsenic. (Geldmacher-von Mallinckrodt, M. (1991)).

2.3. L'Origine des métaux lourds

2.3.1. L'Origine naturelle

« Origine naturelle » est un terme utilisé pour décrire la dans la croûte terrestre, il y a certains tenseurs moyens très bas qui sont libérés lors du processus d'altération pour former la fondation géochimique. (Bourrelier et berthelin, 1998)

L'activité des volcans, l'élévation des continents et les incendies de forêt sont parmi les sources naturelles les plus importantes. (Afnor, 1988).

2.3.2. L'Origine anthropique

L'activité humaine n'a entraîné aucune modification des volumes de métaux lourds. (Dietrich ,1998).

Lorsque les métaux d'origine humaine se trouvent sous des formes chimiques si hautement. (Weiss, D. et al 1999).

Si certains métaux lourds sont déversés directement dans le sol et l'eau, la majorité d'entre eux sont rejetés dans l'atmosphère avant d'atteindre deux autres compartiments. Les métaux lourds ont un large éventail d'origines humaines. (Dietrich, 1998)

2.4. La Classification des métaux lourds

2.4.1. Les métaux essentiels

Ce sont des oligo-éléments nécessaires à divers processus cellulolytiques mais présents en très petites quantités dans les tissus biologiques. (LOUE, 1993).

Lorsque la concentration de certaines substances dépasse un certain seuil, elles peuvent devenir toxiques. C'est le cas du cuivre (Cu), du zinc (Zn) et du fer (Fe) (Fe). Le zinc, par exemple (Zn). (KABATA -PENDIAS A et al. 2001)

2.4.2. Les métaux toxiques

Ils ont un caractère polluant, avec des effets toxiques sur les organismes vivants même à faible concentration. Il n'a pas été démontré qu'ils avaient des effets bénéfiques sur les cellules. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg) et du cadmium. (Behanzin G. J., et al 2014).

3. Les impacts des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé

L'accumulation de métaux lourds dans le sol, l'eau ou l'air constitue une menace. Le fait qu'ils puissent inverser la chaîne trophique constitue une menace pour les écosystèmes et la santé des organismes vivants, avec des conséquences sociales, environnementales et économiques potentiellement catastrophiques. (Bert et Deram, 1999)

3.1. L'Effets sur la santé humaine

La toxicité des métaux et de leurs dérivés est connue depuis longtemps. Alors que l'intoxication aiguë devient moins courante, les effets à long terme de petites doses répétées sont toujours un sujet brûlant. (Poëy et Philibert, 2000).

Il a le potentiel d'avoir des effets négatifs sur la santé humaine, comme :

- Une inflammation chronique et un risque accru de plusieurs maladies (cardiaques, pulmonaires, neurologiques et cancéreuses), ainsi qu'un ralentissement du taux de croissance et de développement.
- Les perturbations du système bio-régulateur provoquant des troubles fonctionnels ou psychosomatiques (le syndrome fatigue la chronique),
- Problèmes neurologiques
- et, in fine, les lésions d'organes et les maladies cancéreuses. (Atma W, 2017)

3.2. L'Effets des métaux lourds sur l'environnement

Les métaux lourds sont dangereux pour l'environnement car ils ne sont pas biodégradables. Ils se forment par des processus minéraux et biologiques. De nombreux métaux lourds, tels que le mercure, le cadmium, le plomb, l'arsenic et le cuivre, inhibent la croissance

photosynthétique et phytoplancton que même à de faibles concentrations. (Ghodbane, L Nouri et al 2008)

4. Quantification et Dosage des métaux lourds par absorption atomique

La méthode de spectrophotométrie d'UV-visible est utilisée pour doser les éléments métalliques. Ce dosage est calculé à partir du filtrat obtenu. Celui-ci est relié à un ordinateur qui affiche les résultats en ppm (mg.L-1). Pour doser chaque métal, les solutions sont d'abord analysées à l'aide d'un spectrophotomètre avant que le filtre ne soit appliqué sur chaque échantillon. (Aduayi-Akue, A. A., & Gnandi, K. (2014).

4.1. La Technique et appareillage

Dans le domaine UV-visible, la spectrophotométrie diffère de l'optique traditionnelle. Des lampes utilisant des filaments de tungstène et des éléments optiques en verre sont utilisées dans le visible. Dans l'ultraviolet

Les lampes sont alimentées par une moyenne pression d'hydrogène ou de deutérium, et les éléments optiques sont en quartz.

La majorité des appareils ont deux faceaux (un pour l'échantillon et l'autre pour référence). Les monochromates sont des réseaux planaires (ou concaves) à 1200 caractéristiques par millimètre, et le quartz est transparent aux UV. Le verre ne sera utilisé que pour des mesures visuelles. Il est important de faire attention aux solvants car ils peuvent absorber beaucoup de lumière dans le domaine des UV. (Ferrah, N., Abderrahim et al 2011).

À l'échelle optique, un spectroscope est un appareil qui mesure les longueurs d'onde dans les gammes ultraviolette ou visible.

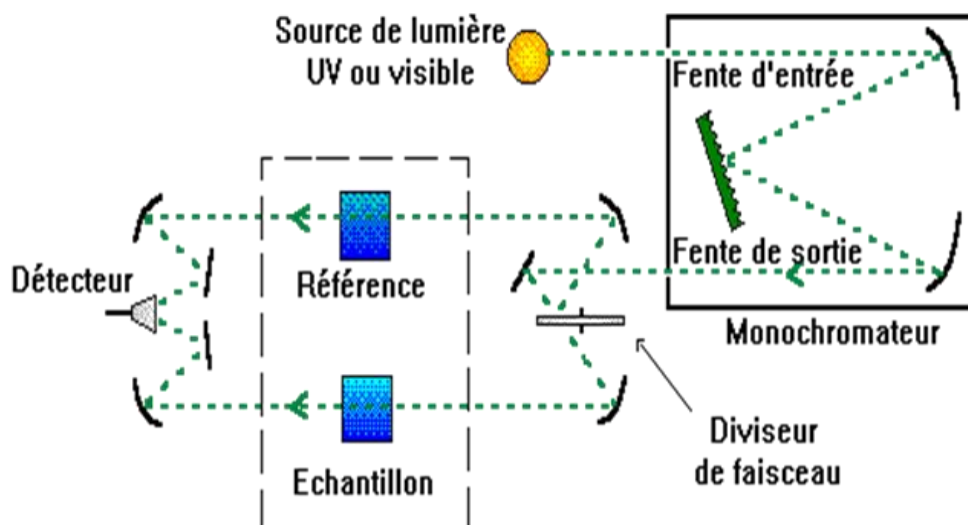


Figure .06: Schéma de principe d'un spectrophotomètre à double faisceau (Ferrah, N., Abderrahim et al 2011).

III .Plantes Accumulatrices

1. Définition

Les plantes qui ont une capacité importante à accumuler des concentrations élevées de métaux dans leurs tissus, dans leur habitat naturel, sont appelées hyperaccumulatrice (R. R. Brooks, J .al, 1977).

Les plantes normales (non hyperaccumulatrices) ne peuvent pas tolérer des concentrations élevées de métaux, cependant plusieurs espèces ont développé la capacité d'accumuler des métaux à des concentrations 10 à 1000 fois plus élevées que les autres plantes dans leurs parties aériennes. (J. Baker. Al ,2000).

Les seuils d'hyperaccumulation varient en fonction du métal considéré : 100 mg. kg⁻¹ de biomasse sèche pour le cadmium, 300 mg kg⁻¹ pour le cobalt, 1000 mg kg⁻¹ pour TR, Al, Ni, As et Pb, 3000 mg kg⁻¹ pour Zn et 10000 mg kg⁻¹ pour Mn. (V. Sheoran, A. al, 2011).

2. L'utilisation des plantes hyper accumulatrices

L'utilisation de plantes hyper- accumulatrices pour l'extraction de métaux présente de nombreux avantages :

- ✓ Ce sont des procédures peu coûteuses.
- ✓ Il existe une nouvelle génération de résidus riches en métaux (végétaux) qui sont recyclables.
- ✓ Cette méthode peut être appliquée à une large gamme de métaux et de radionucléides une fois que la plante qui accumule cet élément particulier a été identifiée.
- ✓ Au niveau environnemental, les perturbations causées par la mise en place de la phytoextraction sont minimales.
- ✓ Une fois le projet lancé, il y a très peu de maintenance à faire

Tableau .02 : Types de métaux lourds et leurs effets sur la santé humaine (Sa et al 2016 ; Singh et al, 2011). (Martin and Griswold, 2009)

polluant	Espèces préconisées	Sources	Effet sur la santé humaine
Cadmium	-Hyperaccumulateurs -Arbres et arbustes à croissance rapide et à forte biomasse - herbacées à forte biomasse	Soudage, galvanoplastie, engrais pesticides, batteries Cd et Ni, l'usine de la fission nucléaire	dysfonction rénal, la maladie du poumon, des anomalies osseuses (ostéomalacie, l'ostéoporose), l'augmentation de la pression artérielle, des lésions rénales, la bronchite, troubles gastro-intestinaux, le cancer.
Zinc	-Hyperaccumulateurs -Arbres et arbustes à croissance rapide et à forte biomasse - herbacées à forte biomasse	Raffineries, la fabrication de laiton, placage métallique, plomberie	Fumées de zinc ont un effet corrosif sur la peau, dommages à la membrane nerveuse
Nickel	-hyperaccumulateurs	anthropiques comme l'utilisation des combustibles fossiles et la production de métaux non-ferreux sont considérés comme les principales sources d'émission du nickel dans l'environnement.	immédiate et retardé. La symptomatologie immédiate se manifeste par des maux de tête, des vertiges, des nausées, des vomissements, de l'insomnie et de l'irritabilité. Elle est suivie d'une période asymptomatique avant le début de la phase retardée.
Cuivre	- herbacées à forte biomasse	Minerai, la production de pesticides, l'industrie chimique, de la tuyauterie métallique	- L'anémie, la fièvre, des lésions rénales, une irritation gastrique et intestinale
Manganèse	-hyperaccumulateurs - herbacées à forte biomasse	- Soudure, additif de carburant, la production de ferromanganèse	- L'inhalation ou le contact cause des dommages au système nerveux central
Arsenic	-hyperaccumulateurs	- Pesticides, Fongicides, les fonderies de métaux.	-Bronchite, dermatite, l'empoisonnement.
chrome	-hyperaccumulateurs	- Mines, sources minérales	Les dommages au système nerveux, la fatigue, l'irritabilité

1.2. L'*Azolla caroliniana*

1.2.1 L'Origine

L'*Azolla* fausse-filicule est originaire des régions tempérées et subtropicales d'Amérique (Ooreka, 2016).

Le nom *Azolla* vient du grec azo, qui signifie "être desséché" (Encyclopédie, 2016). Son épithète *filiculoides* vient du latin filic et oides, signifiant "fougère" et "qui ressemble à" (Dijon, 2016).

Dans la littérature, elle a pour synonymes principaux : *Azolla caroliniana* Willd., *Azolla majellanica* Willd., *Azolla arbuscule* des ou encore *Azolla squamosa* Molina. Cette plante était cultivée depuis des siècles et l'est toujours au sud de la Chine et au Vietnam comme engrais azoté pour le riz. (Kim Pham, 1982 in Rahagarison, 2005).

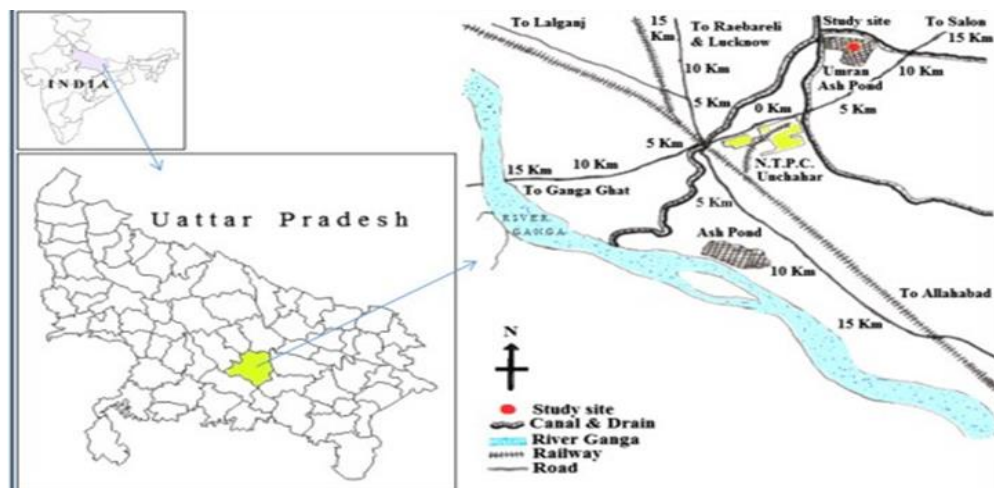


Figure .07 : Origine et distribution dans le monde de l'*Azolla caroliniana* (Ooreka, 2016).

1.2.2. La Classification de l'*Azolla caroliniana*

L'*Azolla* est une petite fougère aquatique qui flotte librement à la surface des écosystèmes tropicaux, subtropicaux et à climat chaud des zones humides intérieures d'Afrique, d'Asie et des Amériques. (Costa et al. 2009).

Elle pousse naturellement dans des environnements lents tels que les étangs, les marais, etc. Fronde est un nom commun pour une plante azolla. Chaque fronde est constituée d'une tige principale (Van Hove, 1983) d'une longueur maximale de seulement 3-4 cm, qui flotte à la surface de l'eau et est recouverte de petites feuilles étroitement entrelacées qui emprisonnent la tige.



Figure.08 : schéma présentation la plante l'azolla caroliniana (Costa et al. 2009).

Tableau .03 : Taxonomie de l'Azolla (Ramilamina, 1995 ; Reynaud P.A ; Franche C.)

Règne	<i>Plantae</i>
Embranchement	<i>Ptéridophytes</i>
Classe	<i>Liliopsida</i>
Ordre	<i>Salviniales</i>
Famille	<i>Azollaceae</i>
Genre	<i>Azolla</i>
Espèce	<i>Azolla caroliniana</i>

Il y'a d'autres des espèces de l'azolla :

- L'Azolla. Filiculoides
- L'Azolla. mexicana
- L'Azolla. microphylla
- L'Azolla. rubra

- L'Azolla. rhizosperma
- L'Azolla. nilotica
- L'Azolla. pinata

1.2.3. La Multiplication d'Azolla caroliniana

Il existe deux types de reproduction à Azolla : la reproduction sexuée et la multiplication végétative :

a) Reproduction sexuée

Elle se multiplie par la formation de sporocarpes, qui apparaissent à la fin de l'été (septembre-octobre), et les zygotes produits par fécondation correspondent à un seul pied. La production de sporocarpes pour une population de 8 kg/m² de biomasse est estimée à 380 000 microsporocarpes et 85 000 mégasporocarpes. Ils peuvent supporter des températures de 5°C pendant 3 mois et de -10°C pendant 18 jours. Après plusieurs années dans l'eau ou enfouies dans des terrains boueux, elles peuvent germer. (Janes, 1998).

b) Reproduction végétative

La plante se reproduit en cassant les tiges, en raison des perturbations physiques, les petits mammifères, les amphibiens et les plantes ont la capacité de ils s'accrochent facilement à ces animaux pour la croissance, la pièce doit simplement être placée dans de l'eau à température la serre (15 à 18°C) Contient de la matière organique en suspension. (FCBN, 2012).



Figure.09 : schéma présentation de la multiplication de la plante l'azolla caroliniana (FCBN, 2012).

c) Propagation par l'homme

Despite le fait que la plante peut être disséminée par les cours d'eau et courants naturels, les activités humaines (aquatiques...) peuvent aider à sa dissémination. De mauvaises pratiques de nettoyage dans les aquariums où il peut être utilisé contribuent à sa propagation dans le milieu naturel. (FCBN, 2012).

1.2.4 Impact de l'azolla

a) Impacts sur la santé humaine

Azolla caroliniana n'est pas toxique pour l'homme. Il est souvent difficile de se débarrasser des impuretés causées par le système racinaire, que l'on retrouve dans les préparations alimentaires à base de plantes. (Lumpkin & Plucknett, 1982 in Rahagarison, 2005)

b) Impact sur la biodiversité

La fausse-fougère Azolla forme rapidement une bande dense à la surface de l'eau, produisant l'effet suivant :

❖ Sur le fonctionnement des écosystèmes :

L'altération physico-chimique du milieu aquatique s'est produite en raison de la densité de la bande végétale qui bloque la diffusion de l'oxygène dans l'air, entraînant des conditions anaérobies directement néfastes la microfaune aquatiques. (GIS 1997 ; Muller 2006).





-Augmentation de la salinité des eaux (Hill 1999).

- Diminution de l'intensité lumineuse pour les espèces submergées en raison de l'augmentation de la réflexion du rayonnement incident due au stade de maturation de la plante (Peters et al. 1982).

- Accélération de la sédimentation de la matière organique et, par conséquent, eutrophisation des eaux. Suite à la décomposition des différentes couches de l'Azolla fausse-fougère, (GIS 1997).

1.2.5 Les Conditions écologiques pour la production et la multiplication de l'azolla :

Tableau .04 : jardinaChe de l'azolla caroliniana

Entretien	 Facile
Besoin en eau	 Important
Croissance	Rapide
Multiplication	Division
Résistance au froid	Fragile
PH du sol	Sol neutre et acide
Exposition	 Soleil  mi- ombre
Utilisation intérieure	Véranda Serre chaude
Plantation	Plante aquatique



**Etude
Expérimentale**

1. Expériences

Ce présent chapitre est consacré à la description de tous des expériences effectuées ainsi que les méthodes d'analyse utilisées, on s'est intéressé à l'accumulation du nickel à partir de la plante de l'azolla caroliniana.

Toutes les expériences ont été effectuées sous serre semi-automatiques :



Figure.10 la serre semi-automatique utilisé dans ce travail (C.U.N. Salhi Ahmed – Boutaiba .H, Kddour .N ,2022)

Plusieurs tests de l'accumulation sont réalisés pour optimiser les conditions de l'accumulation de nickel sur l'azolla caroliniana tels que :

- Effet de multiplication de l'azolla
- Effet du temps de contact de l'accumulation du nickel par azolla
- Effet du pH de l'accumulation du nickel par azolla
- Effet de la concentration de l'accumulation du nickel par azolla
- Effet du stress salin (NaCl) de l'accumulation du nickel par azolla
- Effet de la température de l'accumulation du nickel par azolla

2. Montage et protocole

a) Réactifs utilisés

Les réactifs et les solvants utilisés dans les différentes étapes de cette étude sont :







- Nickel (2000 g/L)
- tampon de pH =4.75
- Complexant (1-2-pyridylazo naphtol PAN)
- Acide chlorhydrique (HCl),
- Hydroxyde de sodium (NaOH),
- Chlorure de sodium (NaCl),

b) Matériels et instruments utilisés

Tableau .05 : les appareils utilisés

pH mètre,	Spectrophotomètre UV-visible,	Agitateur	la balance	Etuve
				

Tableau .06 : instruments utilisés

Micropipettes, de volumes variables 100 - 1000 μ L,	béchers	pipettes	éprouvettes	les tubes	les bassines
					

3. La Multiplication de l'azolla caroliniana

Pour la multiplication de l'azolla, on pèse 1 kg d'azolla dans une bassine, de l'eau potable, et on laisse se multiplier dans une serre semi – automatique.

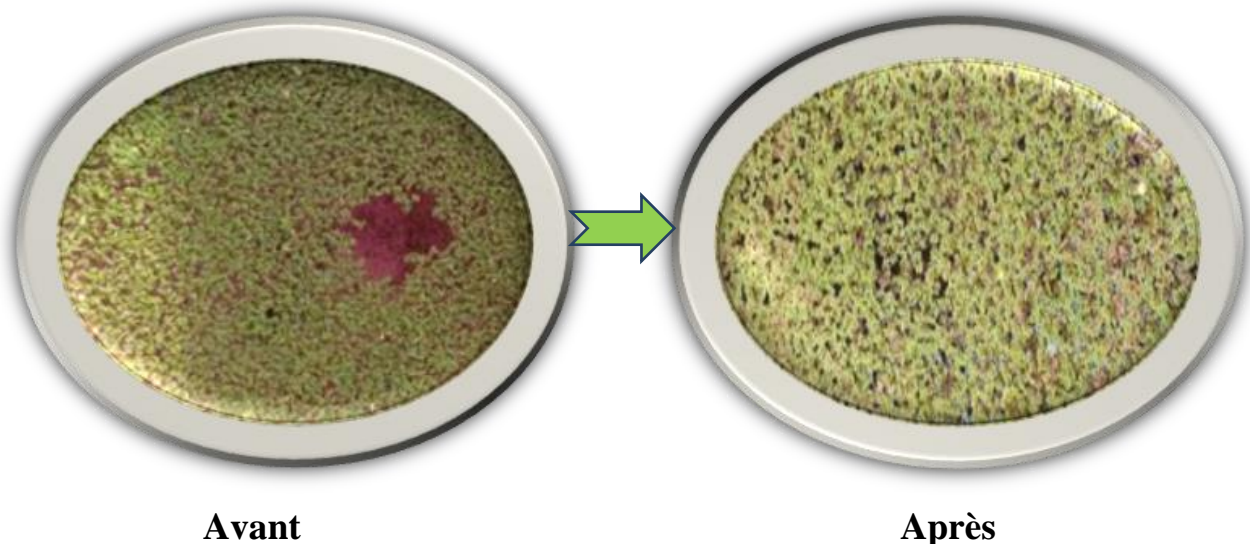
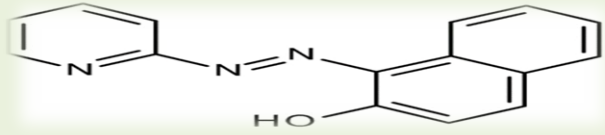


Figure.11 : représente la plante l'Azolla caroliniana avant et après la multiplication (Boutaiba .H, Kaddour .N ,2022)

4. 1.la solution de 1-2-pyridylazo naphthol PAN

Le 1-(2-pyridylazo)-2-naphtol est largement utilisé comme indicateur de complexométrie. Il est aussi utilisé comme réactif pour l'extraction et la détermination spectrophotométrique (pour l'analyse colorimétrique) de nombreux éléments métalliques de transition comme l'arsenic, le chrome, nickel le cobalt, le cuivre, le cadmium, le manganèse, le zinc et le zirconium. Il est également utilisé pour l'analyse de l'uranium et du thorium en solutions, (Ferrah, N. ,et al.2021)

Tableau .07 : les caractéristiques physico-chimiques de la solution de 1-2-pyridylazo naphtol PAN

Nomenclature	1-2-pyridylazo naphtol PAN
Formule	C₁₅H₁₁N₃O
Masse molaire (g/mol)	249,27 (g/mol)
Structure chimique	

4.2. Le tampon de pH =4.75

Un tampon pH est une solution de référence dont la valeur de pH est connue et qui est utilisée pour l'étalonnage de l'électrode. Les tampons pH sont essentiels pour garantir des mesures de pH précises (N. Ferrah, D. Merghache, G. Lebar 2022).

5. les Préparation des solutions

5.1. Préparation de la solution mère de nickel à 2000ppm

Dans un ballon titré de 1000 ml d'eau distillée, on introduit 8 g de sel du nickel, et cette quantité de nickel est dissoute. Bien mélanger la solution jusqu'à ce qu'elle devienne homogène

5.2. Préparation de la solution tampon de pH =4.75

Dans un bol, mettez 0,50 g d'hydroxyde de sodium, dilue avec l'eau distillée, puis ajoutez 1,4 ml d'acide acétique (99%).

Le pH est ajusté à 4,75 avec NaOH ou HCL, puis le mélange est placé dans un récipient de mesure de 1 L et rempli d'eau distillée jusqu'à la plage souhaitée.

5.3. Préparation de la solution de 1-2-pyridylazo naphthol PAN :

Dans une fiole jaugée de 100 ml, on introduit une masse égale à 0,0250 g de 1-2-pyridylazo naphthol, on ajoute l'éthanol pour solubiliser le composé organique jusqu'au trait de jauge.

5.4. Préparation de la solution nutritive de nickel à partir de la plante l'azolla caroliniana

L'accumulation de nickel est réalisée dans une éprouvette de 100 ml. Un volume de 1900mL de l'eau est mis en contact avec environ 10 g de la plante l'azolla des conditions temps d'agitation, de chaque, Test de l'accumulation, est analysée par spectrophotométrie UV-Visible

L'accumulation est optimisée en étudiant l'influence des paramètres opératoires suivants :

- L'effet du temps de contact est étudié sur deux préparations (mesure de 50 ml et 100mL de solution de nickel à 2000ppm) on met dans chacune 10 g de plante azolla, et on prélève des échantillons à des temps différents.
- L'effet du pH initial de la phase aqueuse est également suivi à différentes Valeurs (2,5-4-6-8-9-10-11) de pH. Le pH est ajusté par l'ajout de solution concentrée HCl ou de NaOH.
- L'influence de la concentration initiale est examinée en faisant varier la concentration de solution de nickel de (100ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400ppm ,500ppm)

- L'effet de l'ajout de sel et de force ionique est suivi en ajoutant à la solution (de nickel) les quantités mesurées de sels de chlorure de sodium (0g, 2 g, 5 g, 10 g, 15 g)
- De la même manière, l'influence de la température est réalisée en suivant l'extraction de nickel) à différentes températures (-0 ,20 et 40, 60, °C)



Figure.12 : Préparation de la solution nutritive de nickel à partir tous les effets

(Boutaiba .H, Kaddour .N ,2022)

5.5. Courbe d'étalonnage

Les solutions de nickel sont échantillonnées en prélevant régulièrement une solution de Ni + 2 (100 µl). En ajoutant 3,0 mL de solution tampon (pH = 4,75) et 200 µL de solution de chromogène 1-2-pyridylazonaphtol (PAN). La densité optique des échantillons est mesurée par spectrophotométrie UV-visible à $\lambda_{max} = 540$ nm.

Pour connaître la concentration en espèces métalliques par translation sur la courbe de titrage, on prélève alors 3 échantillons dans 3 tubes de concentrations différentes (100, 50, 25, 20,10 ppm).

Tableau .08 : les valeurs de courbe d'étalonnage de nickel

C (ppm)	10	20	25	75	100
A	0.332	0.43	0.58	0.74	0.89

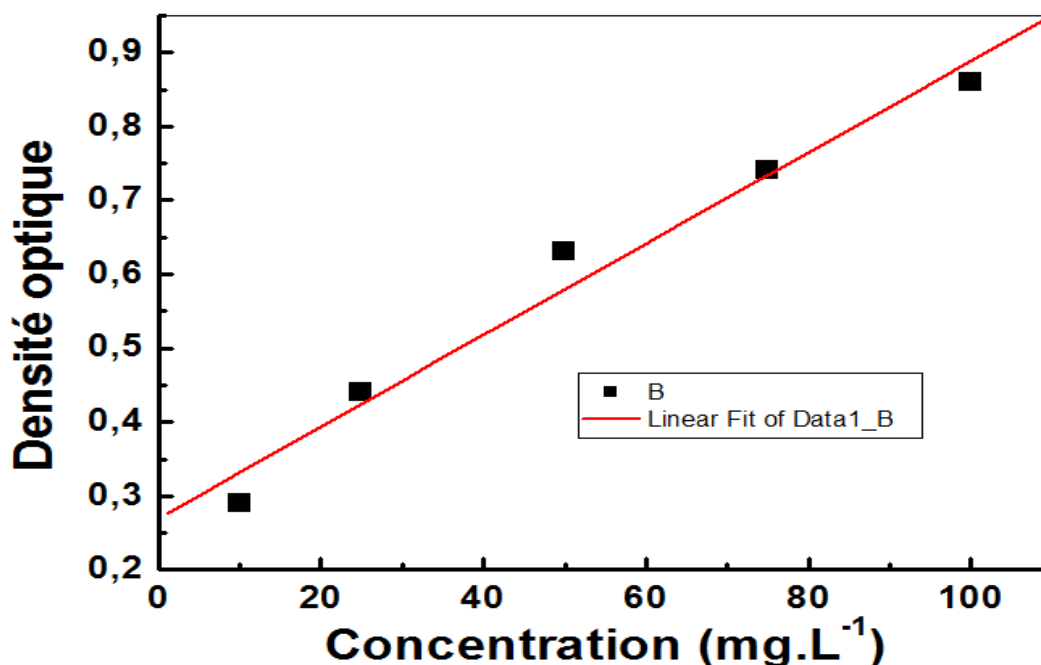


Figure .13 : Courbe d'étalonnage de d'Osage par spectrophotométrie UV-VISIBL de nickel

$$(\text{Absorbance} = 0.0062 \cdot \text{concentration} + 0.27)$$



**Etude
Résultat
&
Discussion**

. Introduction

La recherche des conditions idéales (conditions physiques et chimiques) pour la phytoremédiation de nickel par l'azolla caroliniana nous a conduits à faire une étude d'accumulation pour voir les effets des paramètres opératoires : pH de la solution, le temps de contact, la concentration en nickel et la température de l'accumulation de nickel par l'azolla caroliniana

1. Effet du temps de contact

Il est essentiel d'obtenir le temps nécessaire pour atteindre un équilibre d'accumulation, la **figure. (13 et 15)** représentent l'évolution, respectivement du rendement (R%) et de la capacité d'accumulation (C mg/g), en fonction du temps pour les concentrations du nickel respectivement C = 100 ppm et C = 50 ppm.

Dans les deux courbes d'absorption, la quantité d'absorption de nickel augmente rapidement avec le temps. L'équilibre est atteint après environ 10 jours pour une concentration en nickel C = 100 ppm et C = 50 ppm. Le temps de demi-vie d'accumulation $t_{1/2}$ est d'environ 10 heure pour une concentration de C=100ppm et C=50ppm, respectivement.

Le rendement maximal est atteint 62% pour concentration de Nickel à 50ppm est 57% pour une concentration de 100ppm du Nickel.

Le rendement d'absorption (mg/g) du nickel par l'azolla caroliniana est calculé en utilisant la formule 1 suivante :

$$\text{Rendement d'extraction (\%)} = \left(\frac{\text{Concentration initiale} - \text{Concentration à l'équilibre}}{\text{Concentration initiale}} \right) 100 \quad (1)$$

CHAPITRE III : ETUDE RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau .09 : les valeurs pour l'effet du temps de contact sur l'accumulation de nickel par l'azolla caroliniana

Concentration initial du Nickel= 100 mg.L ⁻¹														
Temps	0	1	2	3	17	24	34	39	72	144	168	192	216	360
C=100ppm	0.76	0.63	0.60	0.55	0.50	0.49	0.45	0.41	0.39	0.37	0.35	0.34	0.33	0.33
Rendements d'accumulation	0	17.11	21.05	27.63	34.21	35.5 3	40.79	46.05	48.68	51.31	53.95	55.26	56.58	56.58
Capacités d'accumulation	0	3.42	4.21	5.53	6.84	7.11	8.16	9.21	9.74	10.26	10.79	11.05	11.32	11.32
Concentration initial du Nickel= 50 mg.L ⁻¹														
C=50ppm	0.55	0.52	0.51	0.50	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.35	0.32	0.26	0.23	0.21
Rendements d'accumulation	0	5.45	7.27	9.09	10.09	14.5 5	18.18	21.82	25.45	36.36	41.82	52.73	58.18	62
Capacités d'accumulation	0	0.55	0.73	0.91	1.09	1.45	1.82	2.55	3.64	4.18	5.27	5.82	6.18	6.18

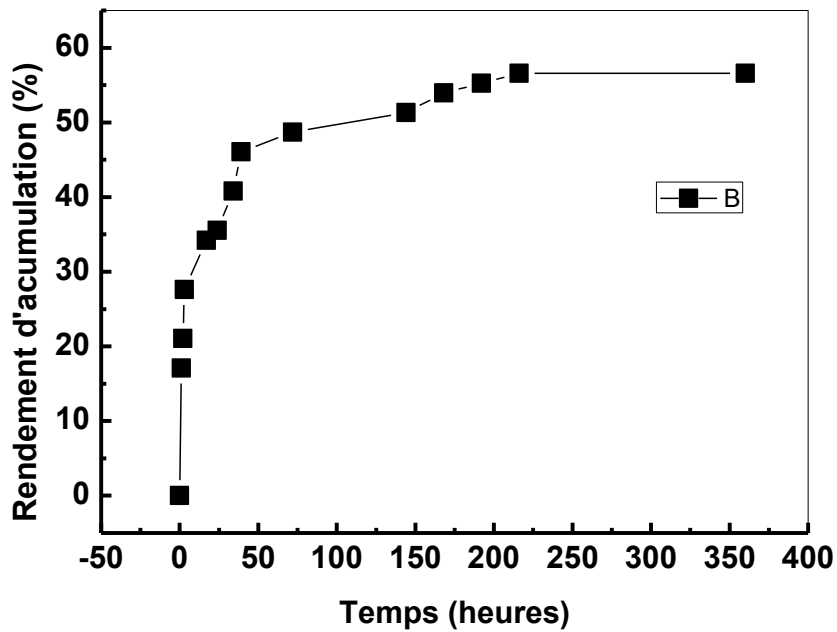


Figure .14 : Effet du temps de contact sur le rendement d'accumulation du nickel par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, m= 10 g Vsol = 2 L

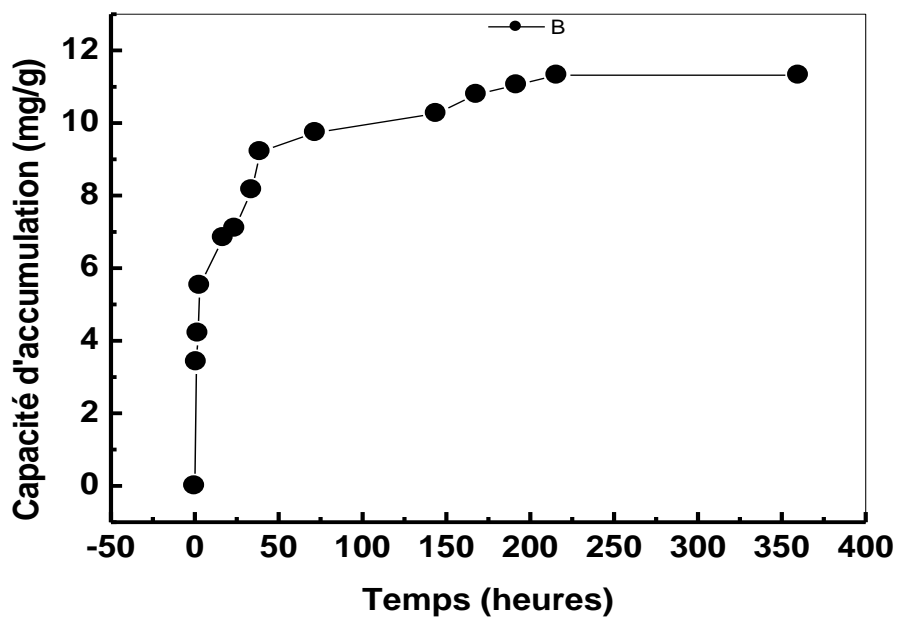


Figure .15 : Effet du temps de contact sur la capacité d'accumulation du nickel par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, m= 10 g V sol = 2 L

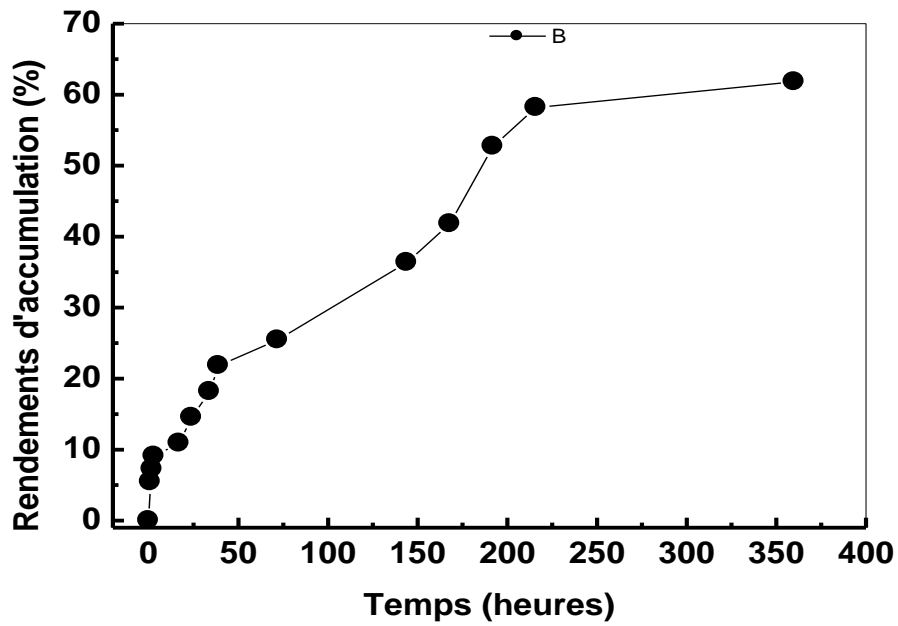


Figure .16 : Effet du temps de contact sur le rendement d'accumulation du nickel par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 50 ppm, m= 10 g V sol = 2 L

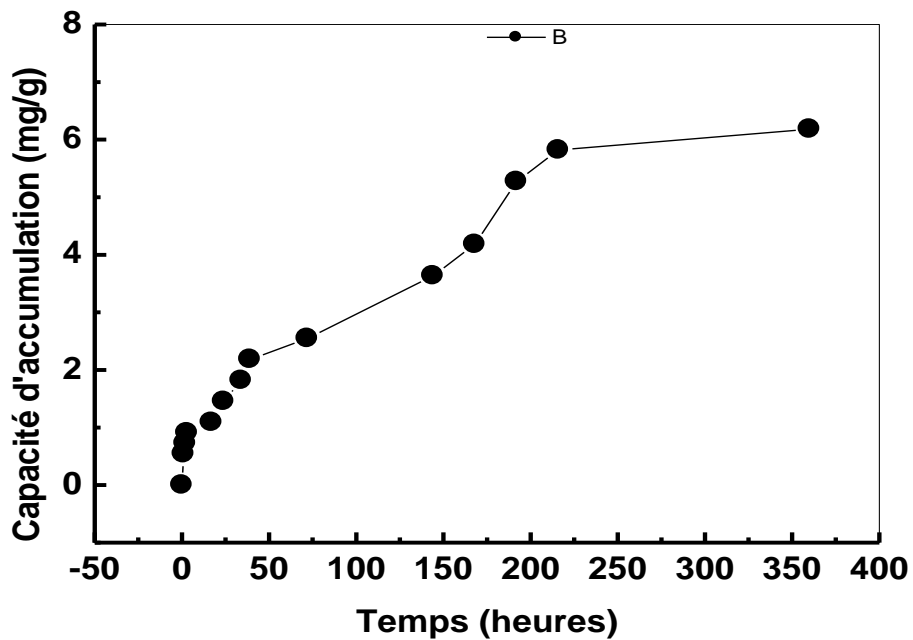


Figure .17 : Effet du temps de contact sur la capacité d'accumulation du nickel par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 50 ppm, m= 10 g V sol = 2 L

2. Effet du pH

Le pH (acidité ou basicité), joue un rôle très important sur l'accumulation du nickel par l'utilisation de l'azolla caroliniana, comme plante accumulatrice, en effet le pH influe sur le Comportement chimique des groupements fonctionnels accessibles dans la plante l'azolla caroliniana, Ainsi que sur la nature des espèces présentent en solution à un pH donné.

La capacité de l'absorption (mg/g) du nickel par l'azolla caroliniana est calculée en utilisant la formule 2 suivante :

$$\text{Capacité d'accumulation} \left(\frac{mg}{g} \right) = (C_0 - C_t) \cdot V \cdot \frac{M}{m} \quad (2)$$

Avec

C_0 : la concentration initiale du Nickel

C_t : la concentration à l'équilibre du Nickel

V : c'est le volume de la solution

M : la masse molaire du Nickel

m : la masse du l'azolla caroliniana

Tableau .10 : les valeurs de courbe d'effet du pH sur l'accumulation de nickel par l'azolla caroliniana

pH du Nickel= 100 mg.L ⁻¹							
pH	2.5	4	6	8	9.5	10	11
Rendements d'accumulation	21.15	60.71	45.83	37.73	28.57	23.91	20.59
Capacités d'accumulation	4.23	12.14	9.17	7.55	5.71	4.78	4.11

L'étude de l'effet du pH initial de l'accumulation du nickel a été réalisée en variant le pH de 2,5 à 11 par l'ajout soit d'une solution d'acide chlorhydrique ou de la base NaOH. La figure .15, montre l'évolution de la capacité de l'absorption nickel en fonction du pH. La Figure .16

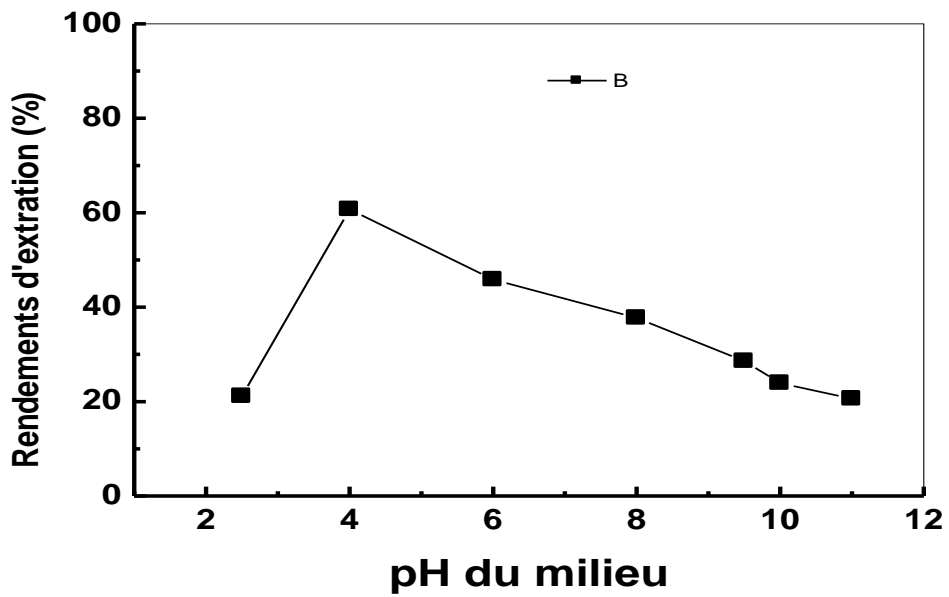


Figure .18 : Effet du pH sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ;
 Concentration initiale = 100 ppm, m= 10g, V sol =2L

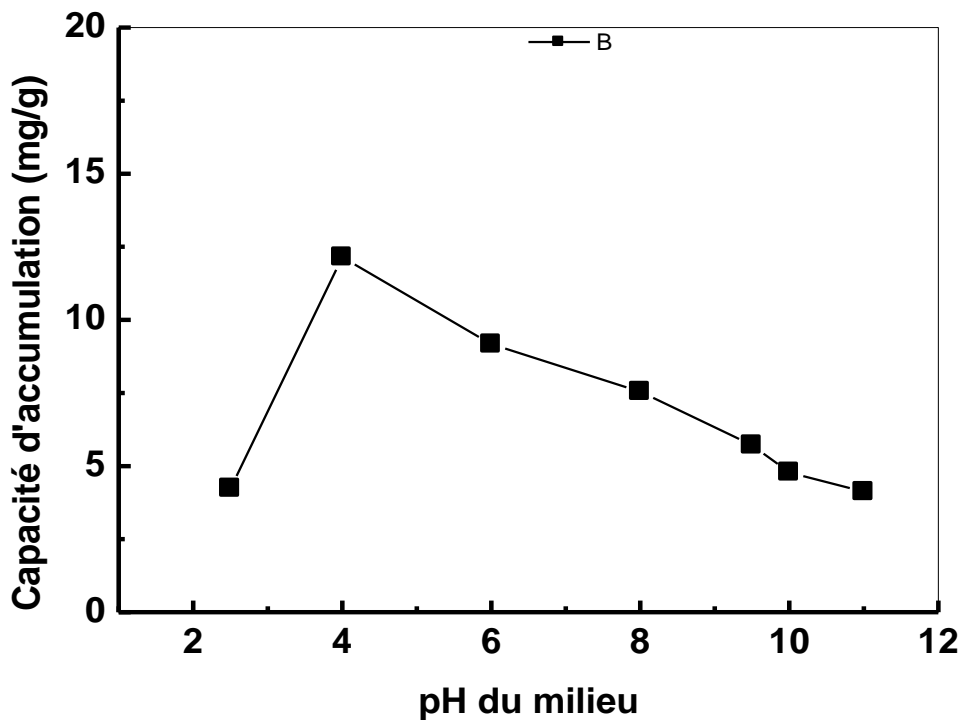


Figure .19 : Effet du pH sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ;
 Concentration initiale = 100 ppm, m= 10g, V sol =2L

Lorsque le milieu est acide $pH < 4.0$, l'azolla caroliniana est en présence d'un véritable stress chimique, c'est pourquoi le rendement de l'absorption est faible. Le pH optimal de l'absorption est coïncidé entre 4 et 6. On a obtenu une capacité de l'accumulation de 9.17 mg/g, pour un pH de solution égale à 6.



Figure .20 présentation de l'impact du pH sur l'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana (Boutaiba .H, Kaddour .N ,2022)

3. Effet de concentration

L'influence de la concentration initiale du nickel a été étudiée en variant les concentrations initiales de 100ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400ppm à 500ppm. Montre la variation du rendement de l'absorption du nickel de la concentration initiale sur la plante l'azolla caroliniana (**Figure.20**)

Le processus de l'absorption est très influencé par la concentration initiale en nickel. D'après la **figure 21** on remarque que la capacité de l'absorption augmente avec l'augmentation de la concentration initiale du nickel jusqu'à l'apparition d'un plateau indiquant une saturation. Ceci peut être expliqué par la saturation de l'azolla. La capacité de l'absorption maximale $q_{max} = 30 \text{ mg/g}$ est atteint à la concentration initiale en nickel 500ppm

Tableau .11 : les valeurs de courbe d'effet de concentration sur l'accumulation de nickel par l'azolla caroliniana

Concentration du Nickel= 100 mg.L ⁻¹					
Concentration	100ppm	200ppm	300ppm	400ppm	500ppm
Rendements d'accumulation	60.71	52.86	40.93	33.33	29.11
Capacités d'accumulation	12.14	21.14	24.55	26.66	29.11

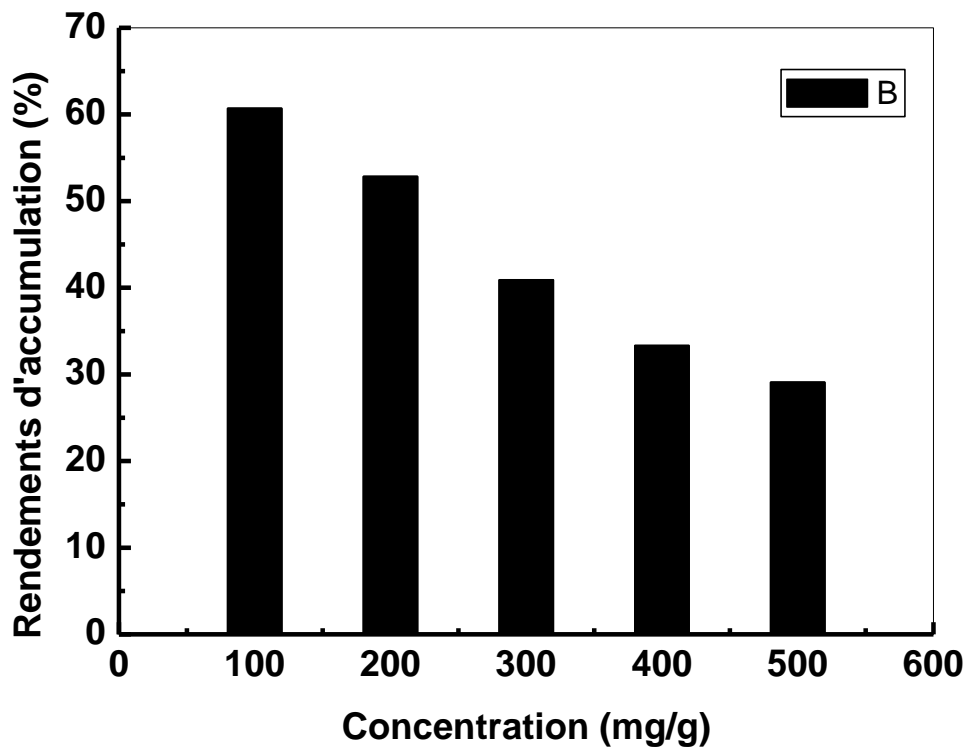


Figure .21 : Effet de concentration sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ; pH=6, m= 10g, V sol =2L

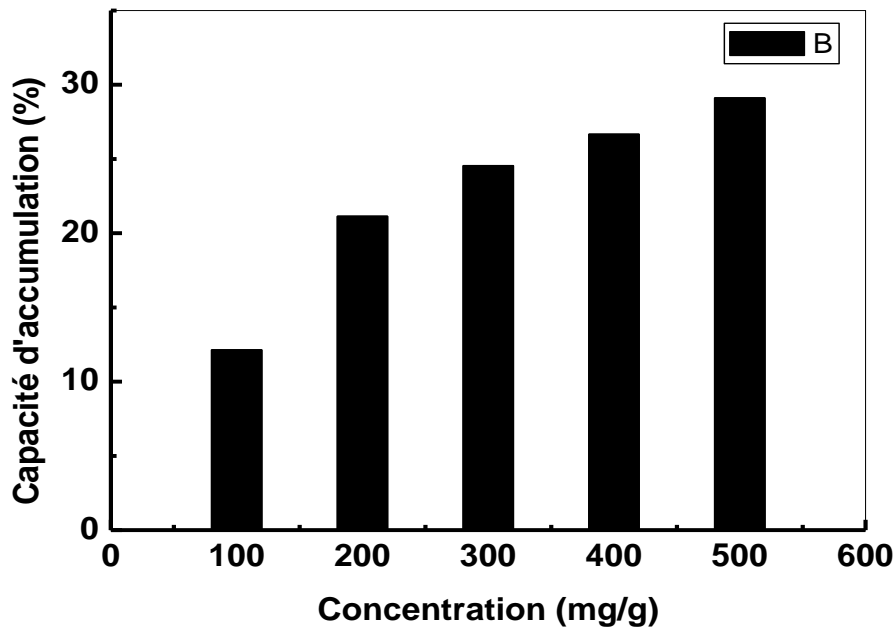


Figure .22 : Effet de concentration sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ; pH=6, m= 10g, V sol =2L

4. Effet de température

La recherche de l'effet de température sur le processus de l'absorption est une étude importante pour minimiser l'utilisation d'énergie en essayant d'avoir la meilleure efficacité. Cette étude est réalisée en effectuant des expériences à des températures allant de 0°C jusqu'à 60 °C dans un bain marie.

On constate que la température égale 0° le rendement et la capacité d'accumulation diminue et on remarque que la capacité de solution de nickel est faible

Par rapport la température égale 20 on remarque le rendement et la capacité d'absorption augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à une valeur maximale égale 60.71

Quant à la température 40 et 60 la plante meurt malgré le rendement et la capacité d'accumulation été moyen mais la plante n'a résisté dans la température très élevé

Tableau .12 : les valeurs de courbe d'effet de température sur l'accumulation de nickel par l'azolla caroliniana

Température du Nickel= 100 mg.L ⁻¹				
Température	0°	20°	40°	60°
Rendements d'accumulation	30.77	60.71	47.17	40.74
Capacités d'accumulation	6.15	12.14	9.43	8.14

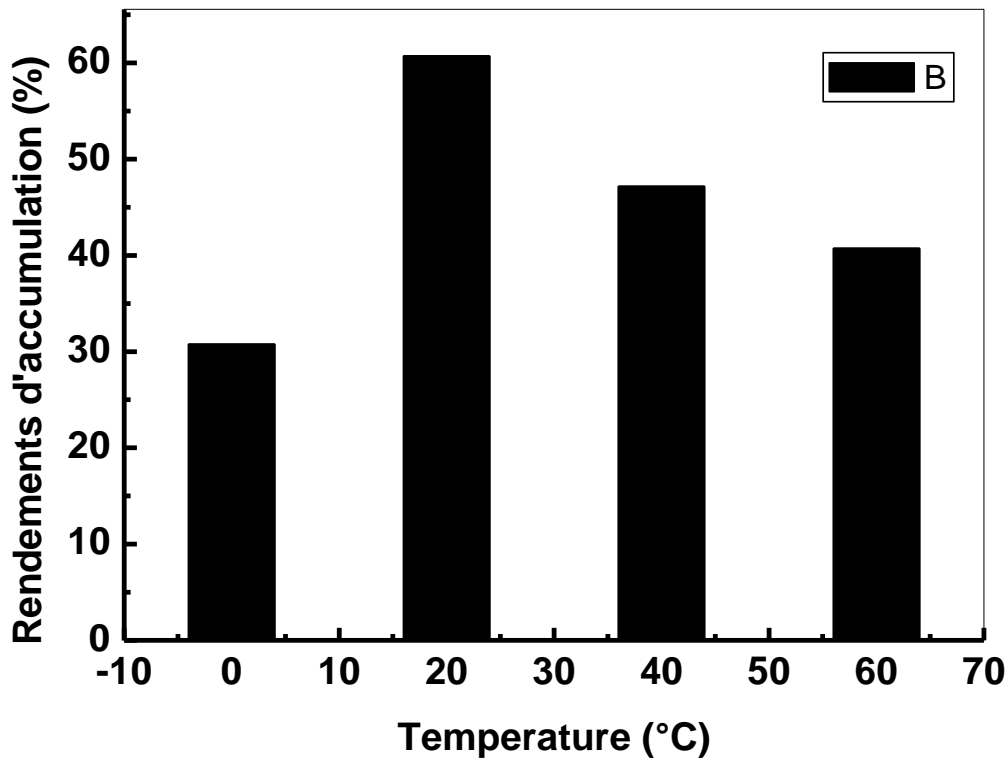


Figure .23 : Effet de température sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, m= 10g, V sol =2L

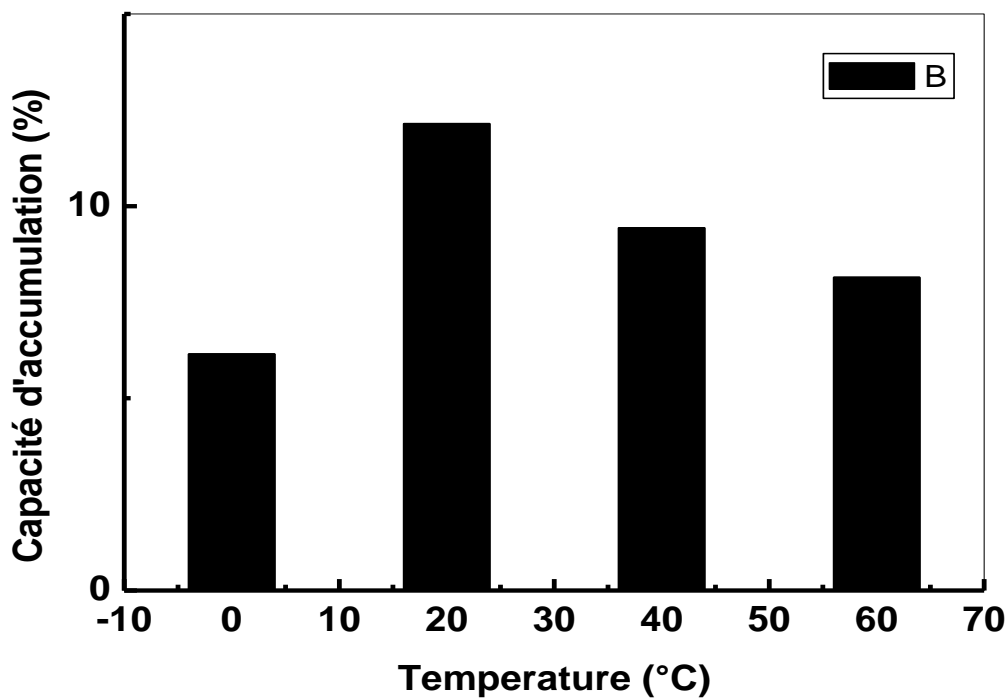


Figure .24 : Effet de température sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, m= 10g, V sol =2L

5. Effet de stress salin

La figure.24 représente l'effet de stress salin sur l'accumulation du Nickel par L'Azolla caroliniana. On remarque clairement que le deux résultats de rendement et la capacité d'accumulation du Nickel diminue fortement de 60.71% jusqu'à 18.45%, lorsque la concentration en chlorure de sodium passe de 0 à 15g/L. On peut dire l'Azolla caroliniana a été influencée par la présence de sel en milieu aqueux.

Tableau .13 : les valeurs de courbe d'effet de stress salin sur l'accumulation de nickel par l'azolla caroliniana

Stress salin du Nickel= 100 mg.L ⁻¹					
Sel g/L	0g	2g	5g	10g	15g
Rendements d'accumulation	60.71	57.67	51.54	21.78	18.45
Capacités d'accumulation	12.14	11.53	10.31	4.36	3.69

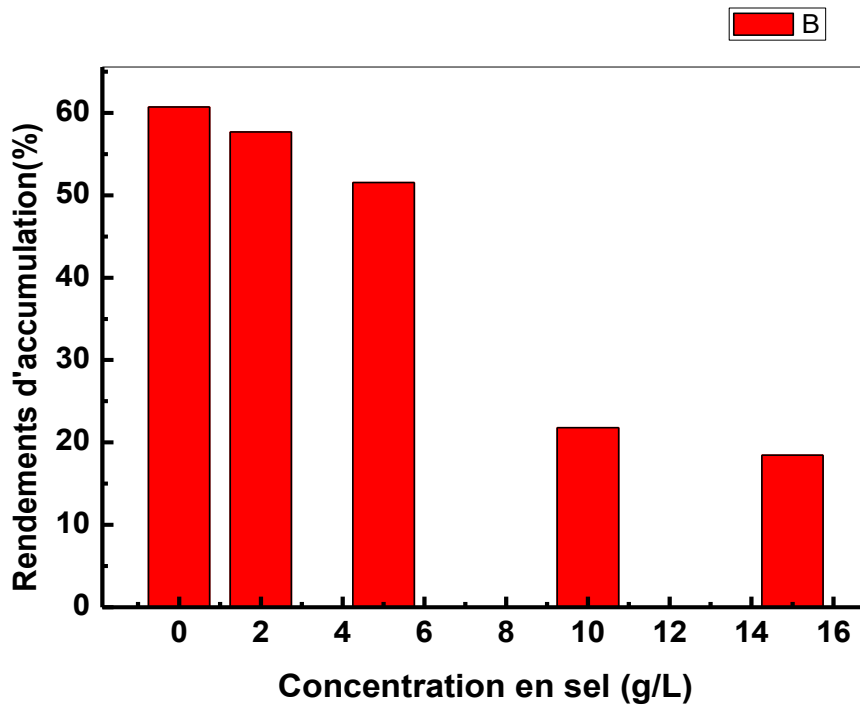


Figure .25 : Effet de stress salin sur le rendement d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, m= 10g, V sol =2L

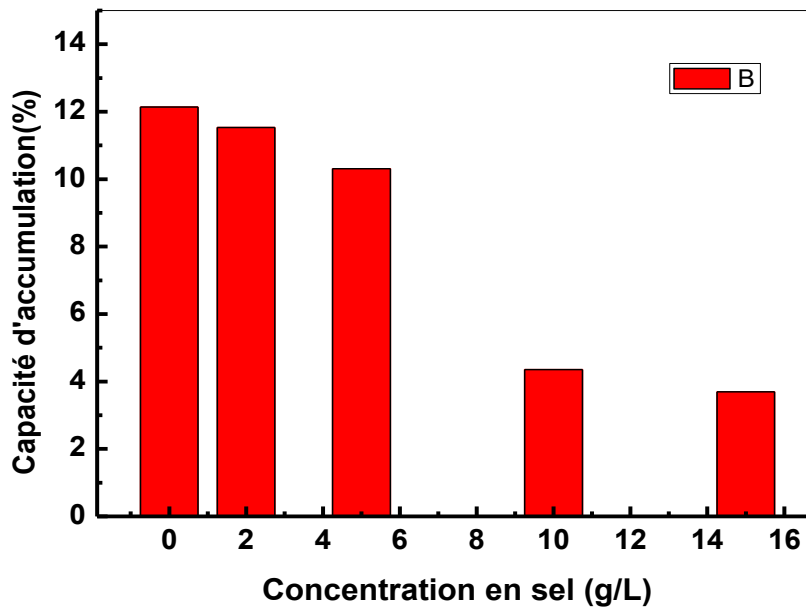


Figure .26 : Effet de stress salin sur la capacité d'accumulation du nickel Par l'azolla caroliniana ; Concentration initiale = 100 ppm, m= 10g, V sol =2L



**Conclusion
Générale**

Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté une étude sur l'absorption du nickel par l'azolla caroliniana. Les résultats obtenus le long de ce travail sont résumés comme suit :

L'étude a montré que l'Azolla caroliniana est une plante résistante en présence de stress chimique et stress salin.

L'accumulation du Nickel est rapide dans les premières heures de contact avec l'Azolla caroliniana, l'équilibre de la phytoremédiation du Nickel est atteint au bout de 10 jours d'accumulation.

Le pH optimale pour l'absorption de nickel sur l'azolla caroliniana est coïncide entre 4 et 6, respectivement. L'efficacité de l'absorption est faible en milieu acide. Au de la de pH= 6.0, le rendement de l'absorption diminue, qui est probablement dû à la présence d'un stress chimique de l'Azolla caroliniana en milieu basique.

La capacité de l'absorption augmente avec l'augmentation de la concentration initiale en nickel jusqu'à un maximum égal à 13 mg/g pour une concentration égale à 100ppm et 30 mg/g, pour une concentration initiale du Nickel de 500 ppm. Cette capacité de rétention est très importante ce qui montre que notre plante présente une grande affinité envers le nickel.

L'augmentation de la force ionique de la solution, par l'ajout du NaCl, conduit à la diminution de l'absorption du nickel par la plante Azolla caroliniana. Le rendement passe de 60.70% lorsque la concentration en sel est de 0g/L à 18.45 % lorsque la concentration en NaCl est de l'ordre de 15g/L.

Le rendement et la capacité de l'absorption augmentent avec l'augmentation de la température la solution de nickel jusqu'à un maximum égal à 60.71 % pour une température égale à 20°C et l'absorption est faible lorsque la température est 0°C

Enfin, on peut dire que l'Azolla caroliniana est une très bonne plante accumulatrice pour l'extraction du Nickel à partir des milieux aquatiques, même en présence de différents stress physico-chimique.



**Références
Bibliographiques**

Références bibliographiques :

{A}

Abdel-Shafy, HI, & Mansour, MS (2018). Phytoremédiation pour l'élimination des métaux, pesticides, HAP et autres polluants des eaux usées et du sol. Dans *Phytobiont et restitution des écosystèmes* (pp. 101-136). Springer, Singapour.

Aduayi-Akue, A. A., & Gnandi, K. (2014). Evaluation de la pollution par les métaux lourds des sols et de la variété locale du maïs *Zea mays* dans la zone de traitement des phosphates de Kpémé (Sud du Togo). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(5), 2347-2355

AFNOR ,1988. Prélèvement et dosage du plomb dans les aérosols. Paris-La Défense, sept 1988.

Allouche, N. F. (2006). La phytoremédiation pour la dépollution des eaux usées. *Bulletin des Energies Renouvelables*, (10).

Ali-Zade V, Alirzayeva E, and Shirvani T, 2010. Plant Resistance to Anthropogenic Toxicants: Approaches to Phytoremediation; in: Ashraf M, Ozturk M, Ahmad M S A, eds. *Plant Adaptation and Phytoremediation*, Springer Science Business Media B.V. 173-186

Aranguren, M. M. S. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

ATMA, W. (2017). Etude du pouvoir auto épurateur de quelques plantes (la phytoremédiation).

{B}

Baker A.J.M., Morel J.L. et Schwartz C. (1997) Des plantes pour dépolluer les friches industrielles.

BERT V., DERAM A. (1999), Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds, France, Environnement et Développement alternatif.

BEHANZIN G. J., ADJOU E.S., YESSOUFOU A.G., DAHOUEON A.E. et SEZAN A., 2014. Effet des sels de métaux lourds (chlorure de Cobalt et chlorure de Mercure) sur L'activité des hépatocytes, Journal Applied Biosciences, Vol 83, pp 7499-7505.

BOURRIE B., TOURLIERE P.Y., BERNHARD-BITAUD C., 1998. Etude au champ de la mobilisation par le maïs de Cd, Pb, Cu et Zn : résultat de 4 années d'expérimentation. Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, août 1998.

{C}

Chour, Z. (2018). Valorisation de terres rares à partir de plantes hyper accumulatrices (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

Costa ML, Santos MCR, Carrapico, F, Pereirac, AL, 2009. Azolla-Anabaena's behaviour in urban wastewater and artificial media-Influence of combined nitrogen. Water Resource. 43, 3743-3750

{D}

Dechamp, C., & MEERTS, P. (2003). La phytoremédiation : Panacée pour l'environnement ou menace pour la biodiversité ? Les Naturalistes belges, (82), 135-148.

Diard, P. (1996). Etude de la biosorption du plomb et du cuivre par des boues de stations d'épuration : mise en œuvre d'un procédé de biosorption à contre-courant (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).

Dijon, 2016. Azolla filiculoides. Biologie Végétale, UFR Sciences de la Vie [en ligne].

[Consulté le 6 décembre 2016].

{E}

E. M. Chenery, « Aluminium in the plant world », Kew Bull., p. 463–473, 1949.

{F}

Fédération des Conservatoires Botaniques Nationaux (FCBN), 2012. Fiche Azolla filiculoides. FCBN [en ligne]. [Consulté le 5 décembre 2016]. Disponible à l'adresse

Ferrah, N., Abderrahim, O., Didi, MA, & Villemin, D. (2011). Élimination des ions cuivre des solutions aqueuses par un nouveau sorbant : l'acide polyéthylèneimineméthylène phosphonique. *Dessalement*, 269 (1-3), 17-24.

Ferrah, N., Merghache, D., Meftah, S., & Benbellil, S. (2021). A new alternative of a green polymeric matrix chitosan/alginate-polyethyleniminemethylene phosphonic acid for pharmaceutical residues adsorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13.

{G}

Geldmacher-von Mallinckrodt, M. (1991). Acute metal toxicity in humans. *Metals and their compounds in the environment*, Edit Merian E., VCH, Weinheim, Germany, 481-489.

Gherib, A., Boufendi, M., Temime, A., & Bedouh, Y. (2016). Applications of phytoremediation in wastewater treatment in Algeria. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (27), 23-37.

GHODBANE, L NOURI, O HAMDAOUI, M CHIHA. Kinetics and equilibrium study for sorption of cadmium (II) ions from aqueous phase by eucalyptus bark. *Journal of Hazardous materials*, Volume 152, Page 148-158, Issue 1, 21 March 2008.

GIS Groupement d'Intérêt Scientifique 1997. Biologie et écologie des espèces végétales proliférant en France. Synthèse bibliographique. Les Etudes de l'Agence de l'Eau 68. 199 pp.

{H}

Hill, M. K, 2004. Metals, in: *Understanding environmental pollution*, two nd Ed. Cambridge University Press, and 350-371

{J}

Jamal F et Ghorbal M H ,2002 – phytoremediation Revue H.T.E.N°122

Janes R, 1998b. Growth and survival of *Azolla filiculoides* in Britain. 2. Sexual reproduction. *New Phytologist* 138: 377-384

Jost-Tse, Y. C. (2018). Les plantes hyperaccumulatrices de métaux lourds : une solution à la pollution des sols et de l'eau ? Editions Publico.

J. Baker, S. P. McGrath, R. D. Reeves, J. A. C. Smith, N. Terry, et G. Bañuelos, « A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils », *Phytoremediation Contam. Soil Water Met. Hyperaccumulator Plants*, p. 85–107, 2000

{K}

KABATA-PENDIAS A., et PENDIAS H., 2001. Trace elements in soils and plants. 3rd CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.

Kabata-Pendias A. 2011, Trace elements in soils and plants, 4th Ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton London New York.

Kim Pham, 1982. *Azolla pinnata*, plante miracle des rizières du Vietnam. *Biofutur*, 1, 11-21.

KOLLER E. 2004. Traitement des pollutions industrielle (eau, air ; déchet, sol, boues) Edition DUNOD. Paris, 424p

Kuffner, M., Puschenreiter, M., Wieshammer, G., Gorfer, M., and Sessitsch, A. (2008). Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows. *Plant and Soil* 304, 35-44.

{L}

Loue, S. (1993). An epidemiological framework for the formulation of health insurance policy. *Journal of Legal Medicine*, 14(4), 523-564.

Lumpkin T& Plucknett D, 1982. *Azolla* as a green manure: Use and Management in crop production. Westview Tropical Agriculture Series No. 5. Westview Press, Bolder, Colorado. 230pp.

{M}

Martin S., W. Griswold, 2009, Human Health Effects of Heavy Metals, Environmental Science and Technology Briefs for Citizens, Issue 15. 1-5, Center for Hazardous Substance Research, Kansas State University

Marques Ana P.G.C, Moreira H, Rangel Antonio O.S.S, Castro Paula M.L, 2009b. Arsenic, lead and Nickel accumulation in *Rubus ulmifolius* growing in contaminated soil in Portugal. *J. Hazard. Mater.* 165, 174–179

Macek T, Pavlikova D. and Mackova M, 2004. Phytoremediation of Metals and Inorganic Pollutants. In: Singh A, and Ward O P, eds. *Soil Biology, Volume 1: Applied Bioremediation and Phytoremediation.* 135-15

Murphy, RA et Rembold, CM (2005). L'hypothèse du pont de verrouillage de la contraction des muscles lisses. *Revue canadienne de physiologie et pharmacologie*, 83 (10), 857-864.

M. DIETRICH. Les métaux lourds et leurs effets sur la santé, conférence, l'école polytechnique de Zurich, 14 mai 1998.

{N}

N. Ferrah, D. Merghache, G. Lebar (2022) Al₂O₃@SiO₂-chitosan synthesis via sol-gel process and its application for ciprofloxacin adsorption - Desalination and Water Treatment. 255 136–144. doi: 10.5004/dwt.2022.28334

{O}

Ooreka, 2016. Fiche plante : Azolla. Ooreka.fr [en ligne]. [Consulté le 5 décembre 2016].

Origo, N., Wicherek, S., & Hotyat, M. (2012). Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation. *Vertigo : la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12(2).

{P}

Peer, WA, Baxter, IR, Richards, EL, Freeman, JL ET Murphy, AS (2005). Plantes de phytoremédiation et hyper accumulatrices. Dans Biologie moléculaire de l'homéostasie et de la désintoxication des métaux (pp. 299-340). Springer, Berlin, Heidelberg.

Peters G.A., Calvert H.E., Kaplan D., Ito O., Toia Jr. R.E. 1982. The Azolla-Anabaena symbiosis: morphology, physiology and use. Israel Journal of Botany 31: 305-323. In: GIS Groupement d'Intérêt Scientifique 1997. Biologie et écologie des espèces végétales proliférant en France. Synthèse bibliographique. Les Etudes de l'Agence de l'Eau 68. 199 pp.

Poëy, J., & Philibert, C. (2000). Toxicité des métaux. Revue Française des Laboratoires, 2000(323), 35-43.

{R}

Ramilamina, 1995. Utilisation de l'azolla comme source de protéine pour l'alimentation animale à Madagascar Antsirabe p18 (ONG Ramilamina)

Rufus, L.C., Minnie, M., Yin, M.L., Sally, L.B., Eric P.B., Scott-Angle J., and Alan, J.M.B. (1997). Phytoremediation of soil metals. Current Opinion in Biotechnology 8, 279-284.

R. D. Reeves, A. J. M. Baker, A. Borhidi, et R. Berazain, « Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba », Ann. Bot., vol. 83, no1, p. 29–38, 1999.

R. L. Chaney, J. S. Angle, C. L. Broadhurst, C. A. Peters, R. V. Tappero, et D. L. Sparks, « Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies », J. Environ. Qual., vol. 36, no 5, p.1429–1443, 2007.

R. R. Brooks, J. Lee, R. D. Reeves, ET T. Jaffré, « Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants », J. Geochem. Explores. vol. 7, p.49–57, 1977

{S}

Sáa I., Semedob M., Cunha M. E... 2016, Kidney cancer. Heavy metals as a risk factor, Porto Biomed. J. 2016; 1(1):25-28

Salt, D.E., Smith, R.D. and Raskin, I. (1998). Phytoremediation. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 49, 643–68.

Suthan, Suthersan, S. 2001. Natural and enhanced remediation systems, Ed. ArcadisGeraghty & Miller science and engineering. p. 240-267.

{T}

T. Jaffré et M. Schmid, « Accumulation du nickel par une Rubiacée de Nouvelle-Calédonie, *Psychotria douarrei* (G. Beauvisage) Deniker », *Comptes Rendus Académie Sci. Sér. Sci. Nat.*, vol. 278, no 13, p. 1727–1730, 1974.

{V}

van der End, A. J. Baker, R. D. Reeves, A. J. Pollard, et H. Schat, « Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction », *Plant Soil*, vol. 362, no1-2, p. 319–334, 2013.

Van Hove C, DIARA H & GODARD P, 1983. *Azolla en Afrique de l'Ouest (ADRAO)*.

V. Sheoran, A. Sheoran, ET P. Poonia, « Role of Hyperaccumulators in Phytoextraction of Metals from Contaminated Mining Sites: A Review », *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* vol. 41, no2, p. 168-214, 2011.

{W}

WEISS D., SHOTYK W., KEMPF O., 1999. *Archives of Atmospheric Lead Pollution. NaturWissenschaften. Mémoire de magister de l'université de Tlemcen-Algérie.*

Wenzel, W.W. (2009). Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils. *Plant and Soil*, 385-408.

Wu L. H, Luo Y. M, and song J, 2007. *Manipulating Soil Metal Availability Using EDTA and Low-Molecular-Weight Organic Acids*, In : Willey N., ends, *Methods in Biotechnology*, vol. 23: *Phytoremediation: Methods and Reviews*,. Humana Press Inc. 291- 299

Wuana R. A, Felix E. O, 2011. *Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation*, international Scholarly Research Network: ISRN Ecology Volume 2011, Article ID 402647