

Mémoire présenté en vue de l'obtention du :

Diplôme de master

Option

«Phytotechnologie appliquée aux sols pollués»



Présenté par :

Mme TADJOURI HOURIA

Mme BLALTA KARIMA

Mme LAYADI FATIMA ZOHRA

Intitulé :

Phytoextraction du cuivre par *Atriplex canescens* (Pursh)Nutt. dans un milieu salin, étude des paramètres biométriques et biochimiques de la plante.

Laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols, Université de Mostaganem.

Soutenu le : 02/06/2016 - Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité	Appartenance administrative
REGUIEG Yssaad Houcine A	PR	Président	U. Ibn Badis Mostaganem
BESSAFI LAID	MAA	Examineur	U. Ibn Badis Mostaganem
GHAMNIA Youcef	MAB	Co-encadreur	U. Ibn Badis Mostaganem

Année Universitaire : 2015- 2016

Remerciement

La thèse bien au-delà du diplôme, est une expérience professionnelle très enrichissante, et plus que formation. Son aboutissement n'aurait pas été possible, ou en tout cas pas tel qu'il a été, sous l'implication et le soutien de très nombreuse personnes qu'on souhaiterait remercier ici.

On voudrait en premier lieu remercier notre Professeur et directeur du mémoire Mr **REGUIEG YSSAAD HOUCINE ABDELHAKIM**, professeur à l'université de Mostaganem de nous avoir accueilli dans son équipe de la phytotechnologie appliquée aux sols et sites pollués ;sa disponibilité ; sa qualité d'écoute et sa compétence nous a été particulièrement précieuse .

Toute notre gratitude à Mr **BESSAFI LAID**, Maitre Assistant A à l'université de Mostaganem , pour nous avoir fait l'honneur d'examiner notre mémoire , qu'il veuille trouver ici l'expression de notre profonde reconnaissance .

Ce mémoire a été réalisé en collaboration avec notre co-encadreur Mr **GHAMNIA YUCEF**, que nous remercions pour sa disponibilité ,ses orientations et ses remarques fructueuses.

Une mention particulière à Mr **BENAKRICHE**, Mr **AIT SAADA DJAMEL**, Mr **Medjehed** , et Mme **Benhmimed** pour leurs soutient morales, la qualité de leurs conseils et leurs légendaires.

Nos remerciements à toutes les personnes ayant attribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci énormément.

DÉDICACES

Cette thèse représente l'aboutissement du soutien et des encouragements de mes parents frères et sœurs m'ont prodigué tout au long de mon chemin d'étude.

La patience et l'encouragement de ma mère et mon mari m'ont aidé à surmonter toutes Les difficultés rencontrées au cours de ce travail à mes enfants je dédie ce travail à : ALAE, MARAM, ABDELKADER.....

Houria

DÉDICACES

Je dédie ce travail à mes chers parents à mes très chers enfants

(MOHAMED, SARAH, ALAA EDDINE)

A ma famille, frère, neveux et nièces.

A tous les enseignants qui m'ont contribué à ma formation.

karima

DÉDICACES

*Je dédie le fruit de mes études avec toute sincérité à mon père ma
mère et à mes frères et sœurs, AMINE, MOHAMED, FETAH.*

*A toutes mes amies et collègues du Master phytotechnologie
appliqués aux sols et sites pollués.*

FATIMA

Résumé

Depuis la révolution industrielle, l'intensification des activités polluantes a contribué à la contamination des sols et elle s'étend à l'échelle planétaire.

Compte tenu de ce phénomène, certains végétaux, ont développé, la capacité d'accumuler les contaminants dans leurs tissus.

Néanmoins ce n'est que très récemment que la phytoremédiation qui se désigne comme étant un ensemble de techniques utilisant les plantes afin d'extraire, de dégrader ou d'immobiliser les contaminants présents dans les sols.

La forte accumulation des sels aussi bien dans les sols que dans les eaux d'irrigation perturbe énormément la croissance et le développement de la quasi-totalité des plantes.

L'étude de ses perturbations chez les halophytes permet d'apporter des meilleurs indications sur l'effet détériorant de la salinité et des métaux lourds.

Notre thème phytoextraction du cuivre dans un milieu salin par cette plante *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt halophyte qui est de la famille chénopodiacées cultivé dans une serre contrôlée située à Mazagran (Wilaya de Mostaganem), porte sur son étude conduite dans un milieu salin à base de NaCl aux doses de 0.5% et 3% et du soufre de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$) aux doses de 2000 ppm, 2500 ppm et 3000 ppm séparément et combinés.

Dans l'objectif de suivre et de mesurer l'influence et l'effet des stress métalliques et salins sur les paramètres biochimiques et biométriques.

Les résultats obtenus ont montré que l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt est résistant à l'excès de cuivre et de la salinité à des concentrations de $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ à partir de (2000 ppm - 3000 ppm) et 3% de NaCl.

Il a été enregistré également que le stress salin et métallique n'ont pas affecté d'importantes perturbations biométriques sur la longueur des tiges, la surface foliaire et aussi le volume racinaire

Tandis que l'étude du comportement biochimique de la plante, les résultats montrent une diminution de la concentration en chlorophylle et une augmentation considérable de la proline et les sucres solubles dans le système foliaire et surtout dans l'interaction des deux facteurs sulfate de cuivre, NaCl.

Les Mots clés : phytoextraction, *Atriplex canescens* (pursh) nutt, cuivre, salinité, paramétré biochimique, biométrique.

Abstract

Since the industrial revolution, the intensification of polluting activities contributed to the contamination of soil and it is extending to the planetary scale. Considering this phenomenon, some plants developed, the ability to accumulate contaminants in their tissues. Although it is only very recently that phytoremediation which is designated as the techniques using plants to extract, degrade or immobilize contaminants present in the soil. The strong accumulation of salts in soils as well as in irrigation water greatly disrupts the growth and development of almost all plants. The study of its disruption in halophytes helps bring better guidance on the deleterious effect of salinity and heavy metals.

Our study on the phytoextraction of copper in saline soil by the halophyte plant *Atriplex canescens* (push) Nutt belonging to Chenopodiaceae family cultivated in a controlled greenhouse of Mazagran station (Wilaya of Mostaganem). The experiment was conducted using saline-based NaCl (0.5%) and 3% and copper sulfate $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (2000, 2500 and 3000 ppm) separately and combined.

The aim was to monitor and measure the influence and the effect of metal and salt stress on biochemical and biometric parameter.

The results showed that *Atriplex canescens* (push) Nutt is resistant to copper excess salinity up to 2000 and 3000pp; and 30g/l NaCl.

It was also recorded as the metal salt and stress have led biometric disturbance significantly affecting the lengths of stems, leaf area and also the root volume and the concentration of chlorophyll.

While the study of the biochemical behaviour of the plant, the results showed an increase of proline and soluble sugars in the leaf system and especially where a combination of the two salts were used.

Keywords: phytoextraction, *Atriplex Canescens* (Push) Nutt, Copper, Salinity, biochemical parameter, biometric.

والتي نتج عنها تلوث

الى ظهور الـ يـ

يس او تجميع الملوثات في خلايا

وفي سياق هذه الظاهرة

أنسجتها .

طريقة العلاج بالنباتات
تقنيات

على ضوء هذه الخصائص المميزة للنباتات تم
"فيتوريمدياسيون "

لهدف تفكيك او تثبيت

اضطراب كبير في

مياه الري يـ

تسمح بتقديم أفضل

لتأثيرات للملوحة والمعادن الثقيلة.

Atriplex canescens (Pursh)nutt

المسمى بالعامية " المتواجد في وسط مالح من العائلة النباتية كينوبودياسي .

Atriplex canescens ع في البيوت الزجاجية (ولاية مستغانم)

Atriplex canescens(Pursh)nutt

كلوريد الصوديوم ذات تراكيز 0.5 3 الكبريت

CuSO₄ 5 H₂O ذي تراكيز ppm 2000 ppm 2500 ppm 3000

سابقا انفراديا في التراكيز 0.5 3% من كلوريد الصوديوم و

وجهة بين وسطي المالح و المعدني, ppm 3000 ppm 2500 ppm 2000

, 0.5% من كلوريد الصوديوم و ppm 2000 , 0.5% من كلوريد الصوديوم و ppm 2500

, 0.5% من كلوريد الصوديوم و ppm 3000 , 3% من كلوريد الصوديوم

, 3% من كلوريد الصوديوم و ppm 2500 , ppm 2000

الصوديوم و ppm 3000

الهدف من هذه الدراسة هو المتابعة وقياس مدى تأثير

البيومترية (المرفولوجية) و البيوكيميائية.

النتائج المحصل بينت على ان نبات *Atriplex canescens(Pursh)nutt* لتراكيز عالية

كلوريد الصوديوم و النحاس ppm 2500 Cu / 30 NaCl .

التأثير لم يؤ مرفولوجية (بيومترية)

حيث أن الفرق في متوسطات طول السيقان المساحة الورقية الحجم الجذري للنباتات لم يكن

بينما بينت البيوكيميائية *Atriplex canescens* بالتأثير

، وأظهرت النتائج تركيز الكلوروفيل زيادة في البرولين والسكريات الذائبة في

الهوائي وبالتحديد في الأوراق خاصة في الوسطين الممزوجين.

Atriplex canescens(Pursh) nutt

البيوكيميائية والم البيومترية.

Liste des tableaux

Tableau n°01 : Caractéristiques principales des sols salins et sodiques .

Tableau n°02 : Classification des eaux salées.

Tableau n°03 : Répartition des espèces d'*Atriplex* dans le monde .

Tableau n°04 : Composition minérale d'*Atriplex canescens* Pursh Nutt.

Tableau n°05 : Composition de la solution nutritive de Hoagland .

Tableau n°06 : Concentration du chlorure de sodium.

Tableau n°07: Concentration du sulfate de cuivre.

Tableau n°08: Concentration du chlorure de sodium et sulfate de cuivre.

Tableau n°09 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la surface foliaire des plante *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)2000,2500,3000 ppm.

Tableau n°10 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la surface foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)2000,2500,3000 ppm.

Tableau n°11 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la surface foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)2000,2500,3000 ppm.

Tableau n°12 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la longueur des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°13 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la longueur des tiges des plante *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°14: Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la longueur des tiges des plante *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)2000,2500,3000 ppm.

Tableau n°15 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de volume racinaire des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°16 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de volume racinaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°17 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de volume racinaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°18: Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) du chlorophylle a des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°19 : Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de Chlorophylle a des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°20 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle a des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°21:Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) du chlorophylleb des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°22 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°23 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°24 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) du chlorophylle a+b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°25 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle a+b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°26 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle a+b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n° 27 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en proline des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°28 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en proline des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°29 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en proline des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n°30 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en sucre soluble des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Tableau n° 31 : des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm.

Tableau n°32 :Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en sucre soluble des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre ($\text{CuSo}_4.5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500,3000 ppm

Liste des figures

Figure .1- la surface foliaire des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après stress salin et métallique (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .2 la surface foliaire des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après stress combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure.3- la surface foliaire des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après stress combiné (NaCl 3% + CuSo4,5H2O: 2000/2500/3000ppm).

Figure .4- Le volume racinaire des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .5- Le volume racinaire des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure.6- Le volume racinaire des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl 3% + CuSo4,5H2O: 2000/2500/3000ppm).

Figure .7- la longueur des tiges des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après stress salin et métallique (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .8- la longueur des tiges des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après stress combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .9- la longueur des tiges des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après stress combiné (NaCl3% + CuSo4,5H2O: 2000/2500/3000ppm).

Figure .10- le chlorophylle a des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après stress salin et métallique (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .11- le chlorophylle a des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .12- le chlorophylle a des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl 3% +CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .13- le chlorophylle b des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après stress salin et métallique (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .14- le chlorophylle b des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .15- le chlorophylle b des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl 3% +CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .16- le chlorophylle a +b des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après stress salin et métallique (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .17- le chlorophylle a +b des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .18- le chlorophylle a+b des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesuré après combiné (NaCl 3% +CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .19- La proline des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après stress salin et métallique (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .20- La proline des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .21- La proline des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurée après combiné (NaCl 3% +CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .22- les sucres solubles des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurés après stress salin et métallique (NaCl0,5% ;NaCl 3% ; CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure 23- les sucres solubles a des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurés après combiné (NaCl0,5% + CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Figure .24- les sucres solubles des plantes *d'Atriplex canescens (pursh)nutt.* mesurés après combiné (NaCl 3% +CuSo4,5H2O:2000/2500/3000ppm).

Liste des photos :

Photo n°01: Origine des métaux lourds dans le sol .

Photo n°02: Impacts du Cu à l'échelle de la plante entière et des cellules.

Photo n°03: différentes techniques de la phytoremédiation .

Photo n°04 Processus de phytoextraction, absorption des contaminants présents dans le sol

Photo n° 05: Arbuste d'*Atriplex canescens*.

Photo n° 06: Feuilles d'*Atriplex canescens* Purch Nutt.

Photo n°07: Graines d'*Atriplex canescens* Purch Nutt.

Photo n°08: Fruits d'*Atriplex canescens* Purch Nutt..

Photo n°09 : Site expérimentale de Mazagran.

Photo n°10 : Site expérimentale laboratoire de biodiversité.

Photo n°11 : Graine de *l'Atriplex canescens (pursh)nutt.*

Photo n°12: *Atriplex canescens* après 25jours de semis.

Photo n°13 : Préparation du substrat

Photo n°14 : Des plantules repiquées dans des pots

Photo n°15 :Dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex canescens* avant le stress

Photo n°16: Dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex canescens* après le stress

Photo n°17 : Prélèvement des feuilles dans des sachets Krafts

Photo n°18 :Mesure de_Volume racinaire

Photo n°19:Extraction et Dosage de la chlorophylle

Photo n°20:Extraction et Dosage des sucres solubles

Photo n°21 :Extraction et Dosage de la proline

liste des abréviations :

- Ca : Calcium.
- CaCo3 : Carbonate de calcium.
- Chla : Chlorophylle. type a.
- Chlb : Chlorophylle type b
- Cm : Centimètre
- Cm3 : Centimètre cube
- C° : Degré Celsius.
- Cu : Cuivre.
- DO : Densité Optique
- ETM : Elément Traces Métalliques.
- FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
- Fig : Figure
- F : Test de Fisher
- Gr : Gramme.
- Has : Hectares
- INRA : International Center Of Agriculture Research in The Dry Area.
- ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures
- K : Potassium.
- L : Litre.
- MF : Matière Fraiche.
- Mg : Magnésium
- mM : Milimole.
- M : Mètre.
- Mm : Millimètre
- NaCl : Chlorure de Sodium.
- Na : Natrium (sodium).
- N : Normalité.
- P : Probabilité.
- Ph : Potentiel hydrogène
- Ppm : Partie par million
- r : Coefficient de Corrélation.
- ROS : Réaction Oxygen Spieces..
- SAR : Sodique absorption ration.
- SOS : Salt Overly Sensitive.
- SPSS V20 : Statistical package of social science ,version 20
- Test-t : Test Student
- UV : Ultra Violet.
- µg : Microgramme.
- % : Pourcentage
- HS: haute significative
- NS: Non significative
- S : Significative

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Abstrat	

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I. La salinité et ses effets sur le sol et la plante

I.1 Définition de la salinisation.....	1
I.2 Origine des sols salés.....	1
I.2.1 Salinisation primaire.....	1
I.2.2 Salinisation secondaire.....	1
I.3 Caractéristiques des sols salés.....	1
I.4 Processus de salinisation.....	2
I.5 Mise en valeur des sols salés.....	3

II La salinité et la plante

II.1 Le Stress	3
II.1.1 la Notion et la définition de stress	3
II.1.2. Catégories de stress.....	4
II.2 Effet du stress sur la plante	5
II.2.1 sur la germination.....	6
II.2.2 sur l'absorption.....	6
II.2.3 sur la translocation.....	6
II.2.4 sur la photosynthèse	7
II.2.5 sur la croissance et développement.....	7
II.3 Mécanismes d'adaptation aux contraintes abiotiques.....	7
II.3.1 Adaptations phénologiques.....	8
II.3.2 Adaptations morphologiques	8
II.3.3 Adaptations physiologiques.....	9

III. La pollution métallique et ses effets sur le sol et la plante

III.1 Définition de la pollution.....	10
III.2 Généralité sur la pollution métallique.....	10
III.3. Origine de la contamination des sols par les métaux lourds	10
III.3.1. Origine naturelle	11
III.3.2 Origine anthropique.....	11
III.4. Spéciation et mobilité des métaux lourds.....	12
III.4.1 Spéciation.....	12
III.4.2 La mobilité	12
III.5.Tolérance aux métaux lourds chez les végétaux.....	12
III.5.1' absorption racinaire	13
III.5.2 Translocation.....	13
III.5.3 accumulation.....	14
III.6 Contamination par le cuivre	14
III.6.1 Présentation Générale.....	14
III.6.2 le cuivre dans le sol.....	15

III.6.3 Impacts de la contamination en Cu	17
III.6.4 Le cuivre dans la plante.....	20
III.6.5 La déficience en cuivre et sa correction.....	22
III.6.6 L'excès de cuivre et sa correction.....	23
IV. La phytoremédiation	
IV.1 Les techniques de phytoremédiation.....	24
IV.1.1 Rhizofiltration.....	25
IV.1.2 Phytostabilisation.....	25
IV.1.3 Phytoextraction.....	26
IV.1.4 Phytodégradation.....	27
IV.1.5 Rhizodégradation.....	28
IV.1.6 Phytovolatilisation.....	29
V. Les avantages et les limites	
V.1 L'efficacité.....	29
V.2 avantages.....	30
V.3 limites.....	31
V.4 Les cout.....	31
VI. Présentation de l'espèce étudié	
VI.1 Description botanique des chénopodiacées	32
VI.2 Géobotanique de l' <i>Atriplex</i>	33
VI.3 Mise en Culture des <i>Atriplex</i>	34
VI.4 Physiologie des <i>Atriplex</i>	34
VI.5 Intérêts des <i>Atriplex</i>	34
VI.5.1 Intérêt fourrager	34
VI.5.2 Intérêt écologique.....	35
VI.5.3 Intérêt économique	35
VI.5.4 Intérêt thérapeutiques	35
VI.6 Présentation d' <i>Atriplex canescens</i> Purch Nutt.....	36
VI.6.1 Systématique de l'espèce	36
VI.6.2 Origine de l'espèce.....	37
VI.6.3 Description morphologique.....	37

Chapitre II : Matériel et méthodes

I. Objectif de notre travail	41
II .Sites experimentation	41
III .Matériel végétal	42
III.1 Origine du matériel végétal.....	42
IV. Méthodes.....	42
IV.1 Préparation des graines.....	42
IV.2 Préparation des plantules	43
IV.3 Préparation du substrat	44
IV.4 Repiquage	44
IV.5 Préparation de la solution de l'arrosage	45
IV.6 Préparation de la solution de stress et salin et métallique	46
IV.7 Dispositif expérimental.....	47
IV.8 Prélèvement de matériel végétale pour les analyses	49
IV.9 Applications du stress salin	49
IV.10 Mesures des paramètres biométriques	49

IV.11 Mesures des Paramètres biochimiques.....	51
IV.12 Schémas du protocole expérimental.....	55

Chapitre III: Résultats et discussions

I. Les paramètres biométriques

I.1 La surface foliaire.....	56
I.2 La longueur des tiges	59
I.3 Le volume racinaire	61

II. Les paramètres biochimiques

II.1 Le chlorophylle a	64
II.2 Le chlorophylle b	67
II.3 Le chlorophylle a+b	70
II.4 La proline	73
II.5 Le sucre soluble	76

Conclusion et discussions.....	80
---------------------------------------	-----------

Références bibliographiques

Annexe

Annexe photothèque

Introduction

La perte de fertilité des sols et la gestion inefficace de l'eau sont deux des grandes causes possibles de l'effondrement des civilisations (**Jean-paul le Gros, 2009**). Ainsi la dégradation des terres touche d'une façon ou d'une autre un habitant de la planète sur trois d'après les estimations les plus récentes, près de deux milliards d'ha dans le monde, soit deux fois la superficie de la chine sont déjà fortement dégradés. La faiblesse de la production agricole en algérie constitue une des principales contraintes pour répondre aux besoins de la consommation .En effet, la pression démographique à entrainé la raréfaction des sols cultivés sur les terres et une diminution des jachères .

Une faible conscience environnementale à générer une mauvaise gestion des déchets issus d'activités industrielles et plus généralement les activités polluantes.

Le problématique des sols contaminés est un fardeau environnementale qui touche plusieurs pays, elle résulte entres autres du développement industrielles étaient dans bien des cas inadéquates ou la disparition de certains fonctions des sols et la possibilité de polluer les eaux souterraines (**Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie ; ADEME, 2015**), Compte tenu de la pollution des sols certains végétaux ont développé la capacité d'accumuler les contaminants dans leurs tissus (**Chevrier, 2013**).

Les métaux lourds sont des éléments non biodégradables et doivent par conséquent être extraits des sols pollués, si l'on souhaite les limiter, parmi les contaminants dues aux activités agricoles, la contamination par le cuivre est une problématique particulièrement préoccupante à l'échelle mondiale. ainsi la phytoremédiation des sols pollués (**Pilon-Smits, E. (2005) ; et Vangraosveld et al., 2009**).

La phytoextraction consiste, plus particulièrement à extraire les composés métallique biodisponibles présents dans les sols pour les stocker dans les parties aériennes de la plante, certaines plantes dites métalophytes sont particulièrement intéressantes, car elles sont capables de se développer normalement sur les sites fortement contaminés par divers métaux. Certains de ses végétaux qualifiés d'hyperaccumulateurs sont capables de stocker une grandes quantités des métaux dans leurs parties aériennes .

L'Atriplex est une espèce réputée par sa grande rusticité, amplitude écologique polymorphisme et a sa reproduction allogame dominante .

Elle attire l'attention de nombreux chercheurs et constitue le matériel de choix pour plusieurs investigations.

En fait des études récentes ont permis de souligner le caractère promoteur de l'espèce qui a montré de grandes capacités d'absorption de certains cations métalliques tels que le cuivre, cadmium, zinc, le sélénium et le plomb (**Lutts et al.,2004 ;vickeman et al.,2002 ;Belarbi, 2008**). Elle est capable d'accumuler des quantités importantes de ces éléments sous présenter d'inhibition de croissance ou de mortalité.

L'objectif de notre travail consiste à étudier l'effet du Cuivre dans un milieu salin sur les paramètres biométriques et biochimiques de *l'Atriplex canescens (pursh) nutt*,

Ce travail comporte trois chapitres :

- Le premier concerne la synthèse bibliographique sur *l'Atriplex canescens (pursh) nutt* , la salinité ,la salinité et la plante,la pollution métallique ,la phytoremediation et l'atriplex canescens (push)Nutt .
- Le deuxième est consacré au protocole expérimental adopté pour la réalisation de notre travail.
- Enfin la troisième partie concerne les résultats, discussions et conclusion .

I. La salinité et le sol :

I.1 Définition de la salinisation :

Plusieurs auteurs ont défini la salinité des sols comme étant la présence de concentration excessive de sels solubles, ou lorsque les concentrations en Na, Ca, Mg sous formes de chlorures, carbonates, ou sulfates sont présentes en concentrations anormalement élevées (**Asloum, 1990**). Un sol salé indique la prédominance de NaCl.

La salinité des sols et des eaux, constitue un obstacle majeur sur la croissance des végétaux, dans les régions arides et semi-arides.

La salinité est un facteur limitatif majeur de la productivité agricole, ces charges en sels soumettent les plantes à un stress permanent (**Gupta et Abrol., 1990 in Bennabi., 2005**).

I.2 Origine des sols salés

D'après **Cherbuy (1991)**, la salinisation d'un milieu, implique la présence d'une source de sels qui peut être naturelle, dénommée primaire, et une salinisation anthropique, généralement liée à l'irrigation, que l'on appellera secondaire.

I.2.1 Salinisation primaire

La salinisation primaire, d'origine géologique, marine ou lagunaire correspond à une salinisation liée au fonctionnement naturel des terrains, sous l'influence du climat, de l'altération des roches et de la dynamique des eaux.

I.2.2 Salinisation secondaire

Dans les zones à climat aride et semi-aride, la pratique de l'irrigation représente l'une des plus importantes causes de la salinisation secondaire.

Actuellement, on dénombre environ 350 millions d'hectares irrigués dans le monde (**Szablocs, 1994**). Ces chiffres sont susceptibles d'être augmentés à l'avenir.

En effet, (**Hamdy et al ,1995**) ont constaté que les terres irriguées affectées par la salinité correspondent à 27% de la surface irriguées dans le monde. Cette menace selon **Cheverry (1995)** occasionne, chaque année des pertes de terres, variables selon les auteurs de 10 à 12 millions d'hectares.

I.3 Caractéristiques des sols salés

La formation des sols salés est en relation étroite avec la présence de l'ion sodium Na^+ sous l'une ou l'autre de ses formes: saline (NaCl , Na_2SO_4) ou échangeable, parfois les deux. Les sols salés sont riches en sels solubles (Sols salins) ou en sodium adsorbé (sols sodiques ou alcalins) :

Les sols salins (Solontchaks) ont pour principales caractéristiques leur richesse en sels de sodium neutres (NaCl chlorure de Sodium, Na_2SO_4 sulfate de sodium) mais contenant également

des quantités appréciables d'ions chlorites et de sulfates de sodium, calcium et magnésium. Ces sols sont généralement dominants dans les régions arides et semi - arides. Les sols alcalins (Solonetz) sont riches en sodium échangeable et en revanche pauvres en sels solubles (sels alcalins, carbonates et bicarbonates de sodium, Na_2CO_3 principalement) Les sols alcalins se trouvent plutôt dans les zones semi - aride et sub - humide. Ces deux types de sols ont en fait des propriétés chimiques et physiques distinctes, d'où des effets sur les plantes, des traitements pour leur remise en valeur, une distribution géographique et une qualité des aquifères adjacents différents (Maillard, 2001) (Tableau n°01).

Tableau n°01 : Caractéristiques principales des sols salins et sodiques (Maillard, 2001).

Caractéristiques	Sols salins	Sols sodiques (alcalins)
Chimiques	- Dominés par des sels solubles neutres : chlorures et sulfates de sodium, calcium et magnésium.	- Peu de sels solubles neutres mais généralement des quantités appréciables de sels capables d'hydrolyse alcaline telle que les carbonates de sodium (Na_2CO_3)
	- Le pH de l'extrait de sol saturé généralement de moins de 8,2 (8,7 dans d'autres ouvrages)	- Le pH de l'extrait de sol saturé de plus de 8,2 (ou 8,7) et atteignant souvent 9 ou 10 .
	- Conductivité électrique à 25°C ; CE >4Ms/cm	- Conductivité électrique à 25°C CE <4Ms/cm
Physiques	En présence excessive de sels solubles neutres, la fraction argileuse est floculée et le sol est stable.	Un excès en sodium échangeable couplé à des valeurs de pH élevées rend l'argile dispersée et une instabilité structurale du sol.
	La perméabilité à l'eau et à l'air de ces sols est généralement comparable à ceux des sols «	La perméabilité à l'eau et à l'air est restreinte. Les propriétés physiques de ces sols s'aggravent avec
Distribution Géographique	Les sols salins dominent dans les régions arides à semi- arides.	Les sols alcalins se trouvent principalement dans les régions semi-arides et sub - humides.

I.4 Processus de salinisation

Selon PHILIPPE (2001), trois processus responsables :

La salinisation : Elle se produit lorsque la minéralisation de la solution du sol dépasse un certain seuil sous l'influence d'un mécanisme physique (évaporation, drainage interne insuffisant,

altération de minéraux et accumulation).

- **la sodisation** : Ce processus se produit lorsque le complexe organo-minéral d'échange est progressivement saturé par l'ion Na^+ .
- **L'alcalisation** : C'est la libération de l'ion Na^+ dans la solution du sol, ce qui élève le PH et disperse les feuillets d'argile. Ce processus intervient lorsqu'un sol à complexe saturé en Na^+ se transforme physiquement suite aux réactions d'échange entre l'ion sodium et les protons au moment d'une humectation, (**PHILIPPE, 2001; MICHEL, 2005**).

I.5 Mise en valeur des sols salés

Une bonne utilisation agricole des sols salés nécessite :

- L'élimination des excès en sels (lixiviation) et la suppression de la source de sodium (drainage de la nappe salée).
- Ces pratiques seront d'autant plus aisées que le sol est perméable et que l'eau (pluie, irrigation) est abondante et de bonne qualité.
- L'utilisation des plantes résistantes à la salinité.
- La reconstitution de la fertilité par des amendements qui enrichissent les argiles en calcium échangeable.
- Des pratiques culturales particulières, labour de défoncement, ratissage des sels en surface (**Girard et al., 2005**).

II. La salinité et la plante:

II.1 Le Stress

II.1.1 La Notion et la définition de Stress:

Levitt (1980) décrit la physiologie du stress en l'abordant dans son aspect physique. Le stress est une contrainte qui peut se résumer à une (ou plusieurs) forces de déformation appliquées à un corps. Par analogie à la physiologie des plantes, une contrainte environnementale va provoquer une tension interne dans l'organisme exposé. Selon (**Hopkins, 2003**) on appelle stress toute pression dominante exercée par un paramètre, perturbant le fonctionnement habituel de la plante.

Par ailleurs, la réponse du végétal dépend, entre autres, de ces paramètres environnementaux, (le type de contrainte, son intensité et sa durée) et génétiques (espèce et génotype).

II.1.2 Catégories de stress

On distingue deux grandes catégories de stress :

a - stress biotique : imposé par les autres organismes (insectes, herbivores.....).

b - stress abiotique : provoqué par un déficit ou un excès de l'environnement comme la sécheresse, la température extrême, la salinité (**Hopkin, 2003**). Les stress abiotiques ou environnementaux affectent la croissance et le rendement des plantes contrairement aux animaux qui peuvent se déplacer lorsque les conditions de vie ne leur sont plus favorables.

a - Stress salin

Le stress salin est une brusque augmentation de la concentration en sels qui conduit d'une part, à un afflux plus élevé d'ions dans la cellule suite à la chute de la concentration du milieu externe, d'autre part, à une perte d'eau par voie osmotique (**Nultsh, 1998**).

La concentration en sels dans l'environnement d'une plante varie énormément, elle peut être insuffisante ou excessive. Le terme de stress salin s'applique surtout à un excès d'ions en particulier, mais pas exclusivement aux ions Na^+ et Cl^- (**Hopkins, 2003**).

b - Stress thermique

Chaque plante possède une température optimale de croissance et de développement, qui ne peut se dérouler qu'entre des limites supérieures et inférieures. Lorsque la température avoisine ces limites, la croissance diminue et au-delà elle s'annule (**Hopkins, 2003**).

c - Le stress ionique

Des concentrations excessives d'ions chlorures et sodium dans la solution du sol peuvent causer une toxicité dans la plante. Ces ions peuvent être absorbés soit par les racines soit par contact direct avec les feuilles. Si l'eau d'irrigation a une salinité proche de concentrations critiques, il sera nécessaire d'en doser précisément les concentrations en ions chlorites et sodium. Les symptômes de toxicités typiques aux ions sodium Na^{2+} sont des brûlures de feuilles, le dessèchement et la mort des tissus sur les bords externes des feuilles, contrairement aux symptômes causés par des ions Cl^- qui apparaissent normalement à l'extrême pointe des feuilles.

On peut noter également que la présence excessive d'ions sodique, chlorique et borique peut provoquer une augmentation du pH du sol, ce qui a un effet indirect sur l'impossibilité d'absorption des ions ferreux, phosphate, zinc et manganèse indispensable pour la croissance des plantes (**Maillard, 2001**).

d- Le stress nutritionnel

Les effets nutritionnels de la salinité incluent les deux actions primaires du sel sur les plantes: la toxicité directe due à l'accumulation excessive des ions dans les tissus et un déséquilibre nutritionnel provoqué par l'excès de certains ions. Des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale des plantes (**Levigneron et al., 1995 in Haouala et al., 2007**). L'accumulation des ions Na^+ dans la plante limite l'absorption des cations indispensables tels que K^+ et Ca^{2+} . Il y aurait une compétition entre Na^+ et Ca^{2+} pour les mêmes sites de fixation apoplasmique (**Haouala et al., 2007**).

Les effets osmotiques du stress salin peuvent également limiter la croissance des racines, ce qui limite les possibilités d'absorption des éléments nutritifs du sol (**Tester et Davenport, 2003 in Jabnoute, 2008**).

e- Stress oxydatif

Les plantes sont constamment soumises à des variations environnementales. Ces changements peuvent engendrer un stress qui modifie l'homéostasie cellulaire. Une conséquence de ces stress environnementaux, comprenant le stress salin, est l'apparition d'un stress oxydatif, c'est-à-dire l'accumulation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui endommagent les structures cellulaires (**Appel et Hirt, 2004 in Attia, 2007**).

Dans des conditions optimales, les feuilles sont dotées d'enzymes et de métabolites antioxydants suffisants pour faire face aux ROS. L'accumulation phytotoxique de ces différents radicaux oxygénés peut entraîner la mort de la plante; cependant, ils ont récemment été identifiés comme étant des acteurs essentiels de la réponse au stress et leur rôle comme messenger secondaire est maintenant clairement établi. Leur implication dans la régulation de l'expression génique a aussi permis de démontrer leur rôle d'inducteurs de la mort cellulaire programmée, mort génétiquement contrôlée que l'on retrouve non seulement dans les processus de développement, mais également typiquement observée dans la réponse au stress (**Parent et al., 2008**).

II.2 Effet du stress salin sur la plante

II.2.1 sur la germination

La germination est régulée par des caractéristiques génotypiques mais aussi par les conditions environnementales et, en particulier, par la disponibilité de l'eau dans le sol et la présence de sel (**Sharma, 1973, Gutterman, 1993 ; in Ndour et Danthu, 2000**). Ainsi, la germination des graines est le stade le plus sensible aux stress salin et hydrique (**Boulghalagh et al., 2006**). Plusieurs auteurs ont montré un retard de la germination causé par la salinité chez plusieurs espèces (**Ndour et Danthu, 2000; Boulghalagh et al., 2006, Benata et al., 2006**), même chez des espèces halophytes (**Debez et al., 2001; Bajji et al., 2002; Belkhoja et Bidai, 2004; Bouda et al., 2006 et Rahmoune et al., 2008**).

II.2.2 sur l'absorption

Chez les plantes cultivées sur milieu témoin sans sel, la concentration totale de la solution foliaire en solutés organiques tend à diminuer avec l'avancement en âge des plantes, alors qu'un effet opposé est noté pour la concentration inorganique totale de la feuille (**Rahmoune et al., 1997 ; Ben Naceur et al, 2002**).

Irriguer avec de l'eau chargée en sels réduit la faculté des racines des plantes à puiser de l'eau du sol. Entre deux irrigations, alors que l'humidité du sol diminue, les sels de la solution du sol peuvent se concentrer à hauteur de 2 à 5 fois leur valeur initiale. Ceci cause une augmentation de la pression osmotique de la solution du sol et rend encore plus difficile pour les racines d'extraire l'eau du sol. C'est ce qu'on appelle une sécheresse physiologique (**Maillard, 2001**) Les effets osmotiques du stress salin peuvent également limiter la croissance des racines, ce qui limite les possibilités l'absorption des éléments nutritifs du sol (**Tester et Davenport, 2003 in Jabnoue, 2008**).

II.2.3 sur la translocation

La régulation du transport et de la distribution des ions dans les différents organes de la plante et à l'intérieur des cellules est un facteur essentiel du mécanisme de tolérance au sel. les plantes les plus résistantes sont celles qui évitent une absorption trop importante d'ions. Certaines glycophytes, comme le cotonnier ou l'orge, transportent et accumulent de grandes quantités de Na^+ dans leurs feuilles. D'après **Greenway et Munns (1980)**,

Les espèces incapables de compartimenter Na^+ dans leurs feuilles sont nettement plus sensibles à la salinité. En effet, ces espèces semblent peu efficaces pour abaisser la concentration cytoplasmique de Na^+ , ce qui est peut-être l'une des causes essentielles de leur sensibilité au niveau cellulaire. Cependant, l'incapacité de débarrasser le cytoplasme de Na^+ a pour conséquence que cet ion est facilement transporté dans le phloème de ces plantes (**Zid et Grignon, 1986 in Haouala, 2007**)

II.2 .4 sur la photosynthèse

La teneur en sel élevée dans les tissus influence directement les enzymes photosynthétiques et par voie de conséquence les réactions d'échange de lumière et de gaz (**El Hendawy, 2004**).

La fluorescence chlorophyllienne est utilisée comme outil de diagnostic de l'état fonctionnel du photosystème II en conditions de stress salin (**Smillie et Nott, 1982, El Mekkaoui, 1990 et Belkhodja et al., 1994 in Bouaouina et al., 2000**). La salinité affecte en premier lieu la croissance de la plante puis la photosynthèse, causant, suit aux phénomènes de « feed-back », une réduction de la capacité photosynthétique

II.2.5 sur la croissance et le développement

La salinité est une contrainte majeure qui affecte la croissance et le développement des plantes (**Bouaouina et al., 2000**). La salinité des sols et des eaux demeure, pour les régions arides et semi arides, un obstacle majeur à la croissance des végétaux. En effet, les sels accumulés dans le sol peuvent limiter ou complètement arrêter la croissance du végétal suite à une élévation de la pression osmotique du milieu et/ou à l'effet toxique spécifique des éléments (**Arbaoui et al., 1999**).

Un stress salin extrême conduit au nanisme et à l'inhibition de la croissance racinaire. Les feuilles deviennent sclérosées avant même d'avoir fini leur croissance et l'organisme tout entier risque de dépérir assez vite (**Calu, 2006**).

II.3 Mécanismes d'adaptation aux contraintes abiotiques

Pour lutter contre la contrainte abiotique, les plantes développent plusieurs stratégies adaptatives qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu, et la variété tolérante développe plusieurs mécanismes de résistances et pas un seul mécanisme (**Bouatrous et al.,**

2009). La résistance d'une plante à une contrainte abiotique peut être définie, du point de vue physiologique, par sa capacité à survivre et à s'accroître et, du point de vue agronomique, par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles.

La résistance globale d'une plante aux contraintes abiotiques apparaît comme le résultat de nombreuses modifications phénologiques, anatomiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques qui interagissent pour permettre le maintien de la croissance, du développement et de la production (**Hsissou, 1994**).

II.3.1 Adaptations phénologiques

Pour éviter les périodes difficiles pour la croissance et le développement, certaines variétés accomplissent leur cycle de développement avant l'installation de la contrainte hydrique. La précocité constitue donc un important mécanisme d'évitement de la sécheresse de fin de cycle (**Ben Naceur et al., 1999**).

Des recherches ont montré que, le rendement en grains est positivement corrélé à la précocité d'épiaison (**Gonzalez et al., 1999**). Selon les travaux effectués par **Slama (2002)**, la variété la plus précoce a donné le rendement en grains le plus élevé ainsi que des grains plus volumineux.

Le transfert des assimilés et le remplissage des grains semblent être plus efficaces chez cette variété. En effet, les variétés qui ont une vitesse de croissance élevée ont la capacité de mieux utiliser les sources nutritives à la fin du cycle de développement lorsque celles-ci deviennent militantes (**Poorter, 1989**). La précocité de l'épiaison peut donc être utilisée comme critère de sélection pour améliorer les productions dans les zones sèches. C'est l'un des traits les plus importants dans l'adaptation des plantes au déficit hydrique terminal. Ainsi, en conditions méditerranéennes, la recherche d'une plus grande précocité a été, jusqu'en 1992, le moyen le plus utilisé pour éviter les effets négatifs sur le remplissage des grains du déficit hydrique et des hautes températures de fin de cycle (**Ali Dib et al., 1992**).

II.3.2 Adaptations morphologiques

L'effet de la sécheresse peut se traduire, selon la stratégie adaptative de chaque espèce ou variété, par des modifications morphologiques pour augmenter l'absorption d'eau et/ou pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes pour les assimilés. Ces modifications affectent la partie aérienne ou souterraine par réduction de la surface foliaire et du nombre des tiges, enroulement des feuilles et/ou meilleur développement du système racinaire. Les travaux effectués par **Slama (2002)** ont montré que la variété ayant le système racinaire le plus développé en conditions de déficit hydrique (Khar) a donné le rendement le plus élevé. En comparant trois

variétés de blé dur, la variété ayant la barbe la plus développée sous contrainte hydrique présente le meilleur rendement.

II.3.3 Adaptations physiologiques

a- État hydrique de la plante

La diminution du potentiel hydrique du sol en conditions de sécheresse ou de salinité provoque une perte importante de la turgescence au niveau de la plante (**Benderradji et al., 2010**). L'augmentation de la production, dans ces conditions, dépend des mécanismes de tolérance qui assurent l'hydratation cellulaire et diminuent la perte en eau en maintenant un statut hydrique favorable au développement foliaire (**Bouatrous et al., 2009**). Le maintien d'un potentiel hydrique élevé est lié à l'aptitude à extraire l'eau du sol et à la capacité à limiter les pertes d'eau par transpiration (**Sorrells et al., 2000 ; Bousba et al., 2009**).

b- Fonctionnement stomatique

L'augmentation du nombre de stomates par unité de surface pourrait être un des facteurs de résistance au déficit hydrique chez les céréales si elle est accompagnée par une bonne activité physiologique (**Salama, 2000**). L'accroissement de la densité stomatique peut augmenter l'assimilation nette du CO₂ et diminuer la perte en eau. En effet, un nombre élevé de stomates peut engendrer des stomates de petite taille et à fermeture rapide. La variété ayant le rendement le plus élevé et les grains les plus volumineux se distingue des autres variétés étudiées par une densité stomatique plus élevée au niveau de la barbe et de la feuille étendard. Ce résultat est en accord avec celui de **Erchidi et al. (2000)** qui ont constaté que les variétés ayant une conductance et une densité stomatique élevées sont plus résistantes à la sécheresse en donnant le rendement en grains le plus satisfaisant.

c- L'Exclusion

La plante empêche le sel de remonter jusqu'aux feuilles. Une première barrière existe au niveau de l'endoderme, couche interne de cellule de la racine. Cependant, cette barrière peut être interrompue, en particulier lors de l'émergence des ramifications de la racine (**Levent Tuna et al., 2007**) ; d'autres mécanismes limitent le passage de sel des racines vers les feuilles mais les gènes qui gouvernent sont encore largement inconnus (**Berthomieu et al., 2003**).

d- L'inclusion

La plante capte le sel, qui parvient aux feuilles, au même titre que l'eau, par le mouvement ascendant de la sève dans les vaisseaux. A l'intérieur des cellules, le sel est alors stocké dans les vacuoles grâce à des systèmes de pompe moléculaire. Les vacuoles sont des compartiments fermes au sein de la cellule. Le sel est ainsi isolé des constituants cellulaires vitaux (**Berthomieu et al., 2003**).

III. La pollution métallique**III.1 Définition de pollution :**

La pollution désigne la dégradation d'un biotope par l'introduction généralement humaine, de substances ou de radiation, entraînant une perturbation plus ou moins importante de l'écosystème (Miw. Holdgale (1979)).

III.2 Généralités sur la pollution métallique

L'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante et qui n'a ni fondement scientifique, ni application juridique.

Les métaux lourds sont réputés toxiques, alors que certains sont des oligo-éléments (Cu, Zn, Fe). C'est pourquoi le terme de métal lourd est souvent appliqué à tort à des éléments en raison de leur toxicité. De plus, certains éléments sont déclarés métaux lourds alors qu'ils sont des métalloïdes (Se, As) ou qu'ils ne sont pas « lourds » (Be, Al). De fait, il est préférable de ne pas utiliser ce vocable, devenu ambigu (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd) (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

III.3 Origine de la contamination des sols par les métaux lourds

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Dans la croûte terrestre, les métaux lourds sont présents sous forme de minerai, d'où ils peuvent être mobilisés par des phénomènes naturels comme l'érosion ou les éruptions volcaniques, mais également par des activités anthropiques. (**Zorrig, 2010**) (Figure n° 02).

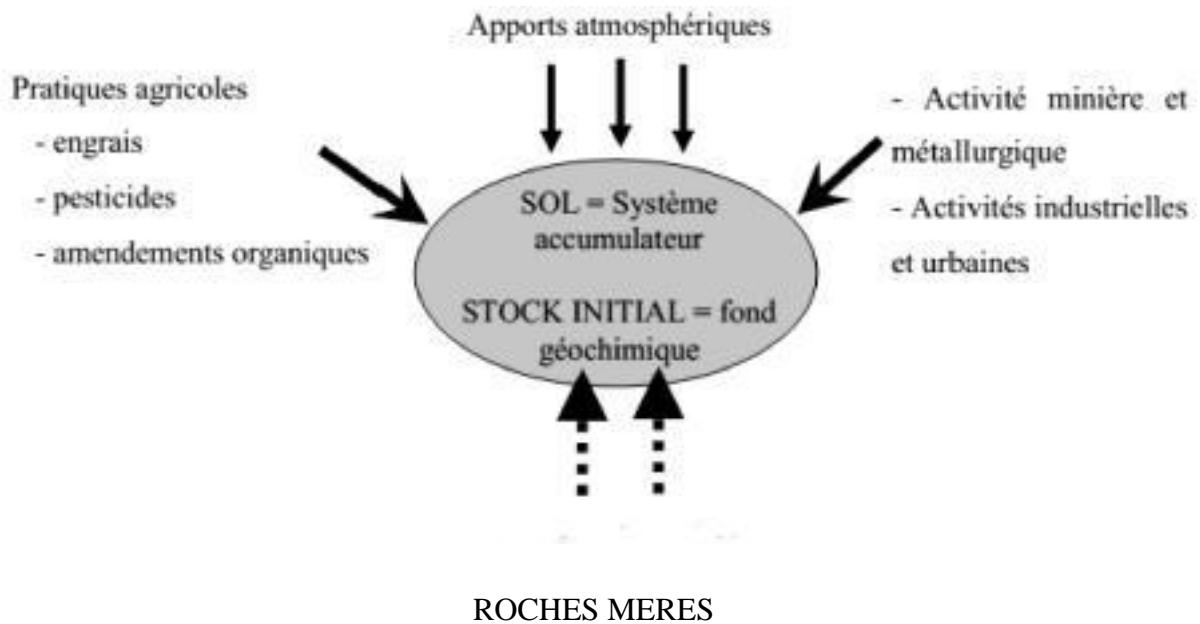


Photo n°1: Origine des métaux lourds dans le sol d'après Robert et Juste, 1999

III.3 .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 (Baize, 2009).

III.3 .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 (Bourrellet et al, 1998).

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 (Naval, 2011), fonderies, combustions et incinérateurs des déchets (Nagajyoti et al, 2010).

III.4. Spéciation et mobilité des métaux lourds

III.4.1 La spéciation

La spéciation est définie comme la distribution des espèces chimiques d'un élément au sein d'un système, solide ou liquide (**Templeton et al., 2000**). Ces espèces sont différenciées selon leur composition isotopique, leur structure électronique, leur état d'oxydation, et/ou leur structure moléculaire. Cependant, le terme de spéciation d'un élément dans un sol est souvent utilisé dans un sens plus large englobant la distribution ou les processus d'identification des différentes phases d'un élément dans le milieu solide ou liquide (**Ure et Davidson, 2007**). Pour décrire cela, l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) a proposé d'utiliser le terme « fractionation » et de garder au terme « spéciation » son sens classique (**Templeton et al., 2000**).

III.4.2 La mobilité

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 (**McBride, 1994**). A l'échelle d'un sol, la mobilité d'un élément peut être évaluée en étudiant sa distribution verticale ou latérale.

a) La biodisponibilité

La notion de biodisponibilité des ETM est définie par le passage d'un élément au travers d'une membrane biologique, végétale ou animale (**Lebourg et al, 1996**). 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 (**Michel et Ludwig, 2005**).

III.5 Tolérance aux métaux lourds chez les végétaux

Parmi l'ensemble des métaux lourds, une vingtaine d'entre eux sont indispensables aux processus physiologiques majeurs, en particulier la respiration, la photosynthèse ou l'assimilation des macronutriments (*e.g.* azote, soufre...) (**Kabata-Pendias and Pendias, 2001**). Nombre de ces métaux, Cu, Zn, Ni, Fe, Co, Se et Ba sont aussi impliqués au niveau de processus moléculaires tels que le contrôle de l'expression des gènes ; la biosynthèse des protéines, des acides nucléiques, des substances de croissance, de la chlorophylle et des métabolites secondaires ; le métabolisme lipidique ou la tolérance au stress (**Rengel, 1999**). En outre, certains éléments trace peuvent se présenter sous différents états d'oxydation (*e.g.* $\text{Cu}^{2+} + e^- \text{Cu}^+$). Ils jouent ainsi un rôle

d'accepteurs ou de donneurs d'électrons, très important dans les multiples systèmes enzymatiques mettant en jeu des réactions d'oxydoréduction (**Chaignon, 2001**). Pour autant, les métaux lourds n'ont pas tous une fonction connue à ce jour dans le métabolisme de la plante, et malgré la grande diversité des besoins et des niveaux de tolérance aux métaux lourds chez les plantes, certains restent considérés comme des poisons cellulaires pour lesquels les doses admissibles sont très faibles. On retrouve parmi les plus toxiques, Hg, Cr, Ni, Pb et Cd (**Kabata-Pendias and Pendias, 2001**).

III.5 .1 Absorption racinaire

La voie principale d'absorption des métaux se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme (voie apoplastique). Le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de concentration) par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines. Cependant, une partie des ions peut être adsorbés par les charges négatives de surface de l'acide polygalacturonique des pectines, qui agissent comme des échangeurs d'ions . Puis au niveau de l'endoderme, le transport peut devenir actif au niveau de la membrane plasmique des cellules de la bande de Caspary (voie symplastique), autorisant cette fois un transfert contre le gradient de concentration. Cependant, les mécanismes exacts de l'absorption sont encore mal connus, en particulier pour certains éléments comme le Cu et diffèrent selon l'espèce métallique. On considère de nos jours que le plomb et le nickel sont absorbés passivement via certaines protéines de type porine, alors que le zinc et le cuivre sont absorbés activement par une protéine de transport sélective, nécessitant de l'énergie (**Kabata-Pendias and Pendias, 2001**).

Par ailleurs, bien que le transport actif soit en principe spécifique, certains cations toxiques (Cs (césium), Cd, Pb ou Cr) sont des compétiteurs potentiels vis-à-vis des cations essentiels. Par exemple, le cadmium semble être un compétiteur connu du calcium en empruntant les canaux calciques membranaires (**Sanita di Toppi and Gabbrielli, 1999 ; Greger, 1999**). 70% du Cd entrerait dans la racine par ce biais là (**Greger, 1999**).

Une partie des métaux apoplastiques peut donc rejoindre la voie symplastique puis le xylème par les plasmodesmes.

III.5 .2 Translocation

Après leur absorption, le transport des éléments dans le xylème de la plante vers les parties aériennes, appelé « translocation », peut nécessiter ou non la prise en charge des éléments par des agents complexants, tels que les acides organiques, les acides aminés et divers peptides : le fer est

pris en charge par le citrate ; le zinc peut être transporté par un complexe anionique (**Alloway, 1995**) ; la majorité du cuivre et une partie du nickel sont chélatées par un acide polyaminopolycarboxylique encore non identifié chez la tomate (**Foy et al., 1978**) ; le cadmium est transporté sous forme libre (**Greger, 1999**).

Chez certaines espèces la translocation d'éléments toxiques est plus importante que chez d'autres, pouvant conduire à une accumulation des métaux dans les feuilles et les autres parties aériennes, sans que l'on sache avec rigueur si elle est due à un transport plus actif ou une absence d'immobilisation dans les racines (**Foy et al., 1978**).

Le transport des éléments toxiques par le phloème est moins évident du fait que les cellules qui le constituent sont vivantes et forment un piège supplémentaire (**Greger, 1999**). Toutefois, chez certaines plantes, la nicotianamine, dérivée de la méthionine, pourrait être responsable du transport des métaux, Fe, Cu, Zn et Mn, dans la sève du phloème (**Briat et Lebrun, 1999**).

III.5 .3 Accumulation

Certaines plantes accumulent des quantités inhabituelles d'éléments métalliques ; 100mg/kg de matière sèche pour le Cd, 1000 mg/kg pour le Ni, le Cu, le Co ainsi que 10 000 mg/kg pour le Zn et le Mn. Ces espèces sont alors qualifiées de plante « hyperaccumulatrice » (*e.g. Alyssum bertolonii, Sebertia acuminata, Silene cobalticola, Thlaspi caerulescens, Brassica napus, Pteris vittata*) (**Brooks, 1998**). Ainsi, plus de 400 espèces hyperaccumulatrices sont recensées, dont plus de 300 pour le nickel et seulement une pour le cadmium. A part une possible résistance à la sécheresse et aux herbivores (**Boyd, 1998**), il est encore impossible d'attribuer ce phénomène à un avantage sélectif quelconque. Dans la cellule, les métaux ayant pénétré dans le cytoplasme sont pris en charge par diverses molécules afin de les stocker ou d'éviter tout dommage cellulaire.

III.6 Contamination par le cuivre

III.6 .1 Présentation générale

Le cuivre est un des rares métaux qui existe à l'état natif dans le sol. C'est pourquoi il est utilisé par l'homme depuis très longtemps, comme l'or et l'argent. Des objets fabriqués en cuivre ont été datés d'environ 8700 avant J.C. Le mot cuivre vient du latin *cuprum* signifiant « l'île de Chypre », qui était réputé pour ses mines de cuivre. Le cuivre est caractérisé par une structure cristalline cubique à faces centrées, une masse atomique de 63.546 g.mol⁻¹, et une température de fusion de 1084.62°C. Sa couleur rouge métallisée permet de le différencier des autres métaux. Dans les minerais de cuivre, celui-ci se trouve sous forme pure mais aussi principalement sous la forme de sulfures tels que les minerais de Chalcopyrite (CuFeS₂) et Bornite (Cu₅FeS₄). En 2010

les réserves mondiales de cuivre étaient estimées à 630 millions de tonnes, avec une production d'extraction de 16.2 millions de tonnes, essentiellement en Amérique du sud.

Dans cette étude, le cuivre n'est pas étudié pour ses propriétés physiques mais pour ses propriétés biologiques et écotoxiques. Il serait restrictif de définir le cuivre uniquement comme élément en trace métallique toxique. Le cuivre est un élément présent dans la croûte terrestre mais aussi chez tous les êtres vivants, car il est essentiel à de nombreux processus vitaux. Par exemple, il a été calculé qu'un européen utilisera environ 680kg de cuivre au cours de sa vie. En effet, à de très faibles doses, le cuivre est un oligo-élément indispensable à la vie, par son action sur le renforcement du métabolisme des êtres vivants et en particulier celui des protéines de plante ou d'animaux. Toutefois son ingestion chronique peut être fatale à des doses peu élevées. La propriété de fongicide du cuivre n'est qu'en partie attribuée à la destruction des spores de champignon qu'il provoque. Une autre partie de cet effet est due à son action sur le renforcement du métabolisme des protéines des cellules vivantes.

III.6 .2 Le cuivre dans le sol

a- Fond pédogéochimique et sources de contamination des sols en cuivre

Le fond pédogéochimique moyen de cuivre (Cu) s'élève à 15-30 mg kg⁻¹ (**Baker et Senft 1995 ; Baize et Tercé 2002 ; Adriano 2001**). Des émissions naturelles de Cu dans L'atmosphère provenant de poussières et d'aérosols produits par l'érosion éolienne, les éruptions volcaniques, les sels marins et les feux de forêts peuvent parvenir aux sols et modifier leurs teneurs en Cu (**Bourrelrier et Berthelin 1998 ; Cetois et al. 2003**).

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 de déchets municipaux provoquent une pollution localisée des sols. 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 (**Tiller et Merry 1981 ; Baker et Senft 1995 ; Bourrelrier et Berthelin 1998**).

Outre ces apports anthropiques, la source principale de pollution des sols en Cu est l'utilisation de fongicides à base de Cu dans les vignobles, les vergers et pour d'autres cultures sensibles à des maladies cryptogamiques (notamment pommes de terre, houblon et tomates) (**Tiller et Merry , 1981**). L'action protectrice des sels de Cu contre le mildiou (champignon

phytopathogène *Plasmopara viticola*) a été découverte fortuitement à la fin du 19^{ème} siècle. Depuis, l'utilisation de formulations à base de Cu (par exemple la bouillie bordelaise, $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CuSO}_4$) comme fongicides en viticulture s'est généralisée dans toutes les régions viticoles françaises et particulièrement en Languedoc-Roussillon, où la vigne fut de longue date la principale culture de la région (**Tiller et Merry 1981 ; Chaignon 2001**).

Le cuivre est à la fois un fongicide et bactéricide puissant capable d'altérer la structure des communautés et les processus microbiens (par exemple la respiration) et un métal particulièrement phytotoxique). Par conséquent, une telle contamination des sols viticoles en Cu entraîne un risque de toxicité élevé pour les organismes du sol et particulièrement de phytotoxicité pour les cultures. D'ailleurs, des problèmes de phytotoxicité ont été rencontrés après arrachage et replantation de jeunes plants de vignes et sur des cultures succédant à la vigne, particulièrement sur céréales comme le blé dur (**Coullery 1997 ; Brun 1998 ; Braun 2006**).

b- Spéciation du cuivre dans le sol

Le cuivre apporté au sol a tendance à s'accumuler près de la surface et à se répartir sous plusieurs formes dans la phase liquide, c'est à dire la solution du sol, et dans la phase solide (**McBride 1981 ; Adriano 2001**).

➤ Spéciation du cuivre en solution

La spéciation est strictement définie (en chimie analytique de l'eau) comme l'identification et la quantification des différentes espèces chimiques d'un élément présent en solution (**Ure 1995**). Dans la solution du sol, Cu peut se trouver sous la forme de l'espèce ionique libre ou sous des formes complexées à des ligands inorganiques et organiques (**McBride 1981**). La somme de toutes ces espèces, c'est à dire Cu soluble total, représente généralement moins de 1 à 2 % de Cu total du sol (**Sauvé et al. 1998 ; Agbenin et Felix-Hennigsen 2004**).

L'espèce non complexée de Cu correspond habituellement à l'ion cuprique Cu^{2+} ou à sa forme aqueuse ($\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$). A pH alcalin, parmi les espèces hydrolysées de Cu, la forme majoritaire correspond à la forme $\text{Cu}(\text{OH})_2^0$, non chargée et plus mobile. Selon les conditions d'oxydo-réduction, Cu peut également être sous forme d'ion libre Cu^+ , celle-ci devenant majoritaire sous conditions réductrices. Les espèces ioniques libres de Cu dans la solution du sol ne représentent souvent qu'une faible proportion de Cu soluble total, particulièrement à pH alcalin où leur proportion diminue fortement au profit d'espèces complexées (**McBride 1989 ; Sauvé et al 1998 ; Nolan et al 2003**). Le cuivre sous forme complexée est lié avec des ligands inorganiques

(OH⁻, HCO₃⁻/CO₃²⁻, H₂PO₄⁻/HPO₄²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ et S²⁻) et organiques (acides aliphatiques simples, acides aminées, acides phénoliques, peptides, protéines, polysaccharides, acides humiques et fulviques) (McBride, 1981). La capacité de complexation des ligands organiques résulte de leur contenu en groupes fonctionnels COOH, OH et C=O qui sont des sites donneurs d'électrons capables éventuellement de chélateur l'ion Cu (Lindsay 1979 ; Nolan et al. 2003). Le cuivre présent sous forme de complexes (ou chélates) formés avec de la matière organique dissoute représente généralement plus de 80 % de Cu soluble dans le sol et jusqu'à plus de 99 % dans la plupart des sols exceptés les plus acides (McBride et Bouldin 1984 ; Sauvé et al. 1997, 1998 ; Römkens et al. 1999 ; Vulkan et al. 2000 ; Aldrich et al. 2002).

➤ Spéciation du cuivre en phase solide

Le concept de spéciation, qui au sens strict s'applique uniquement à la chimie des solutions, a été étendu à la phase solide. Ainsi, la spéciation en phase solide est définie comme la distribution et la quantification des différentes formes d'un élément dans le sol, par exemple sa distribution entre les différents constituants dans la phase solide du sol capables de retenir cet élément (Cetois et al. 2003).

D'autre part, Cu présente la particularité d'être majoritairement présent dans la phase solide sous des formes liées à de la matière organique, comme dans le cas des solutions du sol (McBride 1981, 1989 ; Sauvé et al. 1997 ; Schramel et al. 2000 ; Alva et al. 2000 ; Bolan et al. 2003 ; Arias et al. 2005 ; Khan et al. 2005).

III.6 . 3 Impacts de la contamination en Cu

a-Fonctionnement de l'écosystème

Lorsque le sol est contaminé en Cu, il y a une diminution et un ralentissement des processus de nitrification (Sauvé et al., 1997) et de minéralisation (, qui se traduit par une moindre décomposition de la litière. Il peut donc y avoir une couche de litière plus importante mais l'inverse est aussi rapporté car la production de litière par les plantes est aussi plus faible.

Dans les sols contaminés, la contamination s'accompagne souvent d'une mauvaise structure physique du sol (compaction, tassement...), d'une faible rétention de l'eau, d'une pauvreté en nutriments , d'une acidité du sol (Simmons et al., 2008), d'une sécheresse et d'une forte érosion. En sol contaminé en Cu les déshydrogénases et les catalases qui sont impliquées dans la respiration du sol sont inhibées (Ratnikov et al., 2005).

❖ Communautés végétales

La contamination du sol en Cu entraîne des diminutions de la richesse spécifique, du couvert végétal et de la diversité (Desrochers & Anand, 2005). La végétation se présente sous forme de

patches et le couvert végétal peut représenter moins de 3% de la surface du sol (**Shu *et al.* ,2005**). La structure des communautés est modifiée. Les premières plantes à coloniser le sol contaminé vont être les mousses et les herbacées, en particulier les Poacées, car elles sont tolérantes à des conditions environnementales contraignantes. La proportion d'herbacées augmente tandis que celle des plantes ligneuses diminue (**Banasova *et al.* ,2006**). Les familles dominantes sont souvent les Poacées, les Brassicacées et les Fabacées avec une forte capacité d'adaptation pour les Poacées et les Brassicacées et la fixation de l'azote pour les légumineuses (**Wang *et al.*, 2004**).

b- Plante entière

❖ Les parties aériennes (Figure n°02)

Une contamination en Cu du sol entraîne une exposition des racines via la solution du sol et l'imprégnation en Cu du végétal induit une diminution de la biomasse aérienne des plantes d'autant plus importante que la contamination est élevée (**Cook *et al.*, 1997, Vinit-Dunand *et al.* ,2002**). Ces diminutions seraient dues à des faibles niveaux de Ca dans les feuilles car le Ca affecte la division et l'élongation cellulaire. Il y apparition de symptômes tels que les chloroses, les nécroses sur limbe supérieur des feuilles et l'épinastie1 (**Cuypers 2000, Demirevska Kepova *et al.* 2004**). Les chloroses seraient dues à des modifications de (**Michaud *et al.* 2007**). Les feuilles jaunissent et des spots marron apparaissent sur le limbe, c'est une réponse « dose – dépendante » .

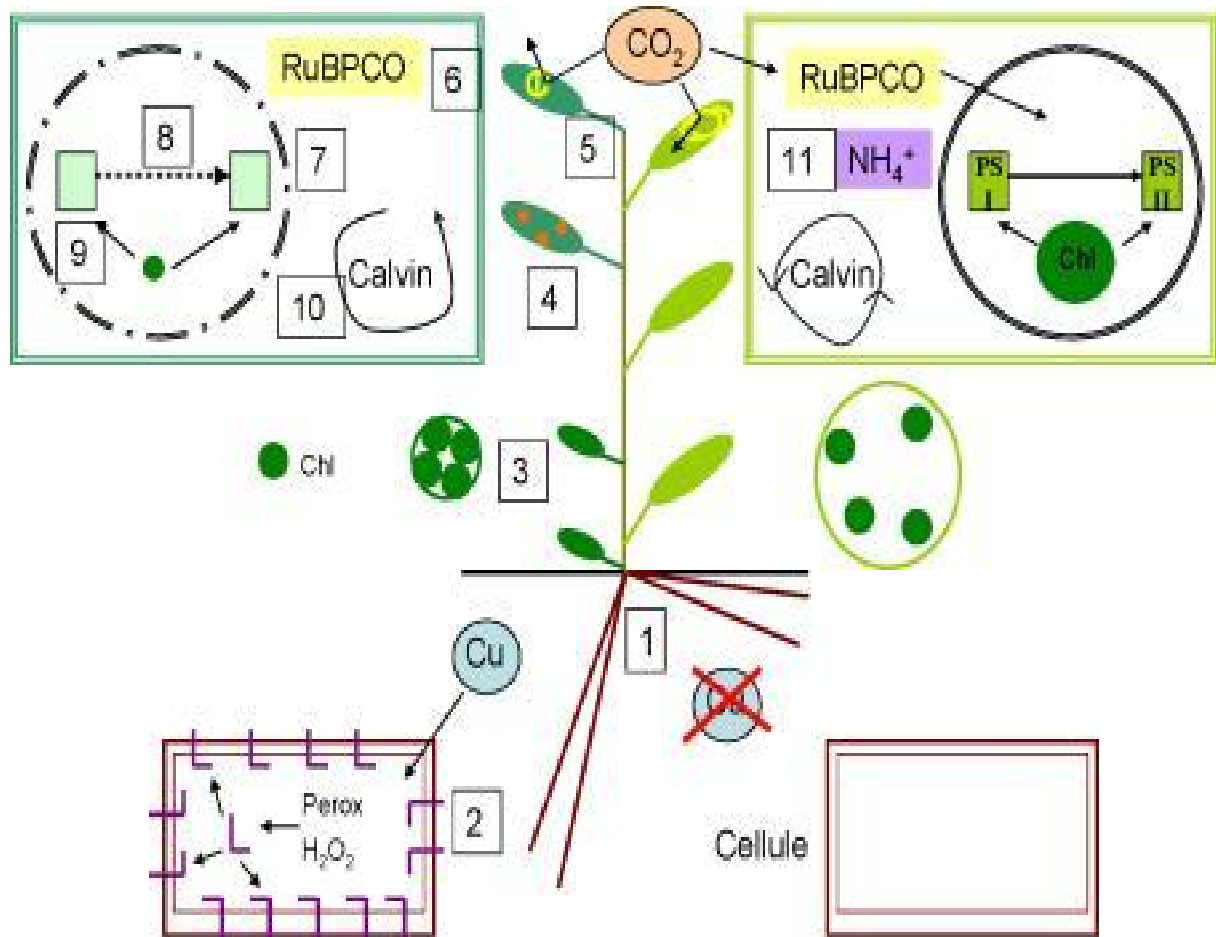


Photo n°02 : Impacts du Cu à l'échelle de la plante entière et des cellules.

- 1 Modifications de l'architecture du système racinaire.
- 2 Lignification et rigidification des cellules.
- 3 Effet « bronzing ».
- 4 Apparition de chloroses et nécroses.
- 5 Fermeture des stomates.
- 6 Inhibition de l'activité de la ribulose, 1-5, biphosphate carboxylase-oxygénase (RuBPCO).
- 7 Dégradation des chloroplastes et des thylacoïdes.
- 8 Blocage de la chaîne de transfert des électrons.
- 9 Diminution des contenus en Chl et dégradation des photosystèmes I et II (PSI et PSII).
- 10 Perturbation du Cycle de Calvin.
- 11 Perturbation de l'assimilation azotée.

III.6 . 4 Le cuivre dans la plante

Le cuivre est l'un des sept oligoéléments essentiels à la nutrition des plantes, aux côtés de Zn, Mn, Fe, B, Mo et Cl, dont le caractère essentiel a été fermement établi dans les années 1930. Cet oligoélément n'est requis qu'en très faible quantité et les teneurs adéquates de Cu dans les parties aériennes s'élèvent à 5-20 mg kg⁻¹ de matière sèche suivant le stade de développement et l'espèce considérés. Au-delà du seuil de toxicité de 15-30 mg kg⁻¹ dans les parties aériennes, Cu peut être phytotoxique (Adriano, 2001).

a. L'absorption :

Les mécanismes qui contrôlent l'accumulation des ETM par les racines ne sont pas encore bien connus (Hasan et al, 2009). Les ETM pourraient pénétrer dans la racine par diffusion passive (sans implication d'énergie et de processus métaboliques) ou par voie active (nécessitant une dépense d'énergie et l'implication de transporteurs) (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). L'absorption des ETM adsorbés aux parois cellulaires semble être contrôlée par le gradient de potentiel électrochimique entre le cytosol et l'apoplaste, lequel a une sélectivité assez faible (Clemens et al., 2002).

L'absorption de Cu à l'intérieur des cellules racinaires semble néanmoins dépendre de transporteurs spécifiques de la membrane plasmique présentant une haute affinité pour Cu⁺, les transporteurs COPT (Copper Transporter) (Puig et al., 2007). Ces transporteurs appartiennent à la famille CTR (Conserved Copper Transporter) qui est impliquée dans le transport de Cu de l'extérieur vers le cytoplasme de cellules eucaryotes (e.g. levures, mammifères). Des travaux tendent d'ailleurs à mettre en évidence le rôle de COPT1 dans l'absorption racinaire de Cu chez *Arabidopsis* (Sancenon et al., 2004). D'autre part, Cu est très fortement lié aux groupes fonctionnels de l'apoplasme dans les racines (Mengel et Kirkby, 2001). L'adsorption spécifique de Cu sur les parois cellulaires pourrait être une étape préliminaire importante dans le processus d'absorption, et, à l'instar de Fe apoplasmique, Cu apoplasmique pourrait être mobilisé sous déficience en Cu (Graham, 1981 ; Von Wirén et al., 1995).

b. Distribution du cuivre dans la plante

La distribution de Cu entre les racines et les parties aériennes varie selon l'espèce, le cultivar et les conditions environnementales, *Chloris gayana* Knuth. (Sheldon et Menzies, 2005). Le cuivre racinaire est principalement apoplasmique, donc non absorbé à l'intérieur des cellules

(Graham, 1981 ; Marschner, 1995 ; Chaignon *et al.*, 2002b). En effet, les parois cellulaires (ou pectocellulosiques) sont constituées d'un réseau de cellulose, pectines et glycoprotéines poreux et se comportent comme des échangeurs d'ions spécifiques . 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 (particulièrement les groupes -COOH). Lors de la translocation vers les parties aériennes, Cu serait principalement transporté dans le xylème complexé par des acides aminés (histidine, voire nicotianamine) et des acides organiques (citrate) (Puig *et al.*, 2007).

Le cuivre présente une mobilité limitée à la fois dans les racines et dans les parties aériennes. Les jeunes organes aériens sont par conséquent souvent les premiers sites à développer des symptômes de déficience en Cu .

D'autre part, étant donné 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 (Marschner, 1995 ; Clemens, 2001 ; Ducié et Polle, 2005).

c. Rôles physiologiques

Le cuivre est un élément de transition à activité redox avec des rôles dans la photosynthèse, la respiration, le métabolisme C et N, et la protection contre le stress oxydatif. Comme Fe, il forme des complexes très stables et participe à des réactions de transfert d'électrons. Le Cu divalent est facilement réduit en Cu monovalents qui est instable. Il est associé à de nombreuses enzymes intervenant dans des processus physiologiques clés tels que la photosynthèse et la respiration (Marschner, 2012) :

- la plastocyanine des chloroplastes : protéine participant à la chaîne de transport des électrons au cours de la photosynthèse,
- le superoxyde dismutase : responsable de la détoxification de radicaux superoxydes,
- le cytochrome oxydase : oxydase terminale de la chaîne de transport d'électrons dans les mitochondries (respiration),
- l'ascorbate oxydase : catalysant les réactions d'oxydation de l'acide ascorbique,

-les peroxydases et les phénols oxydases : enzymes impliquées dans la synthèse des plastocyanines et de la lignine, respectivement.

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.

Par conséquent, plus de 98% du Cu dans les plantes est présent dans des formes complexées et les concentrations de Cu^{2+} et Cu^+ libres sont extrêmement faibles dans le cytoplasme.

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**).

III.6 .5 La déficience en cuivre et sa correction

Le cuivre est un élément dont la plante a besoin en faibles quantités dans une fourchette de 25 à 150 g/ha. 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, la déficience en cuivre est observée au-dessus du pH 7 (**El Alaoui, 2007**).

Le cuivre est légèrement mobile dans les plantes comme il est fortement lié par l'azote et les protéines. Avec un déficit en Cu, une plante peut pousser la végétation normale 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. La carence en Cu affecte fortement les processus physiologiques et par conséquent la production des plantes (**Kabata-Pendias, 2011**).

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. Les applications foliaires de Cu sous forme de sels inorganiques, des oxydes, ou des chélates peuvent être utilisées pour corriger rapidement la carence en cuivre dans le sol et des plantes cultivées. 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**).

III.6 . 6 L'excès de cuivre et sa correction

Le cuivre, comme les autres éléments essentiels B, Mn, Mo et Zn, est un oligoélément potentiellement phytotoxique en trop forte concentration. La phytotoxicité de Cu se manifeste principalement au travers de la rhizotoxicité et parfois de la mise en place d'une déficience induite en Fe. Par ailleurs, sa phytotoxicité semble altérer l'intégrité des membranes plasmiques des cellules racinaires et affecter la perméabilité membranaire provoquant ainsi la perte d'ions (ex. K^+ , HPO_4^{2-}) et de solutés. Un excès de Cu dans le milieu environnant induit une rhizotoxicité visible au travers d'un épaissement 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 épaissement des apex et des dommages occasionnés sur les méristèmes. 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 (**Michaud, 2007**)

La correction l'excès de cuivre se fait par l'application de chaux (**Loué, 1993**), aussi on y remédie par l'apport d'amendement organique (**Cahurel, 2008**).

IV. La phytoremédiation

La phytoremédiation est définie comme étant un groupe de technologies qui utilise les plantes pour réduire, enlever, dégrader, ou immobiliser les contaminants présents dans les sols, les boues, les sédiments, les eaux de surface, les eaux souterraines ainsi que les eaux usées. Ces techniques sont applicables à une variété de contaminants, incluant les hydrocarbures pétroliers, les solvants chlorés, les métaux, les radionucléides, les nutriments, le pentachlorophénol et les HAP (**Vishnoi et Srivastava, 2008**). Les plantes ont grandement été étudiées, et ce, dans le but de comprendre les mécanismes qui régissent leur capacité à décontaminer les milieux pollués et le rôle qu'elles y jouent.

IV.1 Les techniques de phytoremédiation

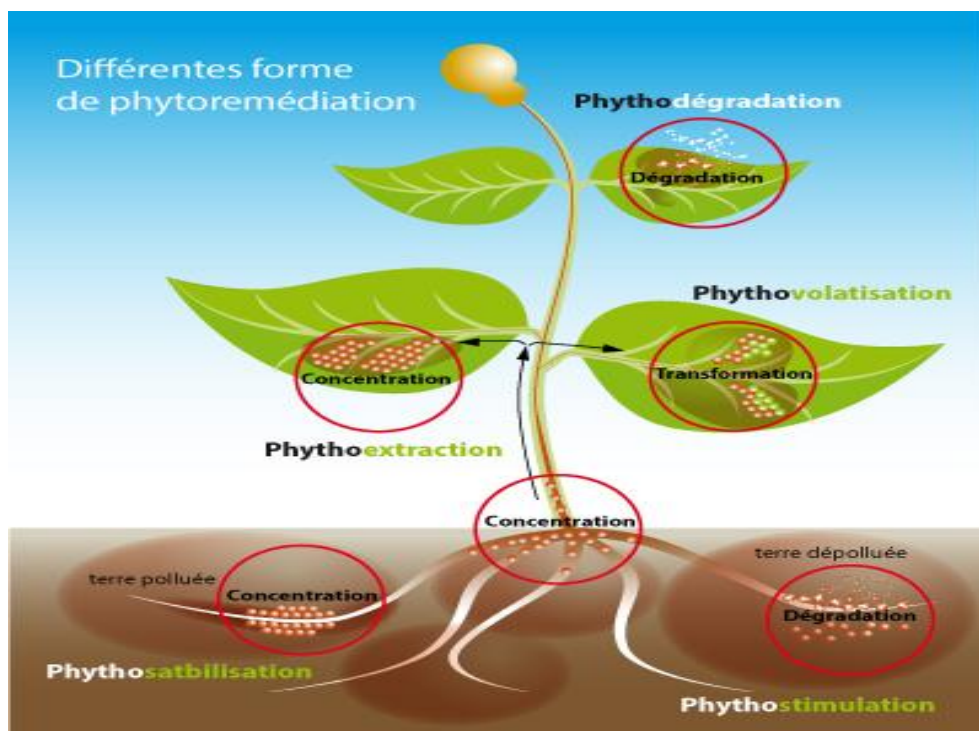


Photo n°03: les différentes techniques de phytoremédiation

Les différents types de phytoremédiation ne sont pas exclusifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent s'opérer simultanément.

IV.1.1 Rhizofiltration

La rhizofiltration consiste en l'adsorption ou la précipitation sur les racines de la plante (ou l'absorption dans les racines) des contaminants présents dans l'eau souterraine, l'eau de surface ainsi que les eaux usées (UNEP, 2002; EPA, 2000). Cette technique est généralement utilisée afin de traiter les sites contaminés aux métaux et radionucléides comme le plomb, le cuivre, le zinc, le nickel, l'uranium, le césium et le strontium (EPA, 2000).

Les plantes terrestres sont alors favorisées pour ce type de phytoremédiation puisqu'elles sont capables d'absorber une grande quantité de contaminants dans leurs racines (Eapen et autres, 2007). D'ailleurs, des études ont démontré que le tournesol (*Helianthus annuus L.*), en raison de ses racines, pouvait réduire la concentration de plusieurs contaminants. En effet, un étang près du désastre nucléaire survenu le 26 avril 1986 à Chernobyl en Ukraine a été le lieu d'une décontamination par rhizofiltration. En deux semaines, une réduction de 90% du Strontium-90 fut observée, et le mérite est octroyé à *Helianthus anal* (University of Hawaii, 2001). Malheureusement, plusieurs désavantages techniques sont associés à cette phytotechnologie dont le besoin d'ajuster constamment le pH afin d'obtenir une absorption optimale des métaux présents dans le milieu et celui de devoir d'abord faire croître les plantes en serre (Henry, 2000).

Enfin, la rhizofiltration peut engendrer des coûts qui sont estimés entre deux et six dollars par 1000 gallons d'eaux traitées (EPA, 2000)

IV.1.2 Phytostabilisation

La phytostabilisation est une technique de décontamination qui consiste à l'utilisation de plantes afin de contenir ou d'immobiliser les polluants. De ce fait, la mobilité des polluants est réduite ce qui prévient la migration du panache de contamination vers les eaux souterraines ou dans l'atmosphère (ADEME, 2013). Cette technique est principalement utilisée afin de traiter les sols, les sédiments et les boues (EPA, 2000). Sans oublier qu'elle est très efficace dans les cas où l'on désire agir rapidement afin d'immobiliser les contaminants dans le but de préserver la nappe phréatique (ITRC, 1997).

Les mécanismes biologiques impliqués durant la phytostabilisation sont l'absorption et l'accumulation des contaminants par les racines, l'adsorption sur les racines ou la précipitation dans la rhizosphère. La quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol peut entraîner la formation de

lixiviat contaminé. Ainsi, la présence des plantes réduit la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol et du même coup prévient l'érosion et le transfert de métaux toxiques vers d'autres compartiments comme la nappe phréatique et l'atmosphère (**Ghosh et Singh, 2005**). D'ailleurs, pour les métaux, qui ne peuvent évidemment pas être dégradés, la phytostabilisation est une avenue intéressante puisqu'elle prévient leur distribution dans l'eau de surface ou souterraine (**Gouvernement du Canada, 2008**).

Le choix des plantes est une étape qui ne doit pas être négligée lorsque l'on opte pour une technique de phytostabilisation. Ainsi, les plantes les mieux adaptées à la phytostabilisation sont des plantes qui doivent présenter de faibles niveaux d'accumulation des métaux dans leurs parties aériennes (**Evans, 1997**).

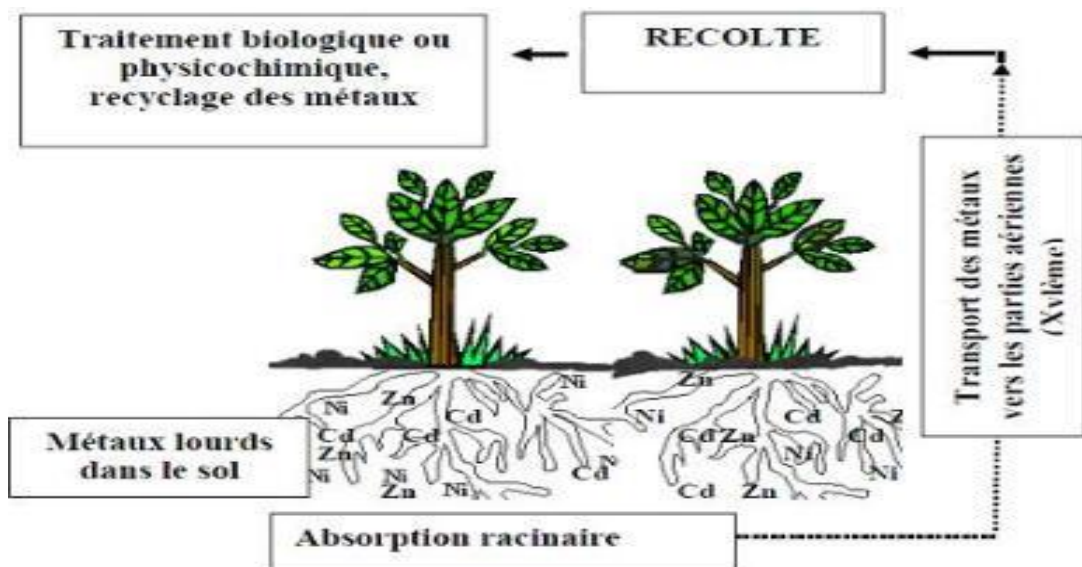
IV.1.3 Phytoextraction

La phytoextraction est la méthode de phytoremédiation la plus utilisée compte tenu du fait qu'il y a isolation des polluants, sans altérer la structure et l'activité biologique des sols (**Ghosh et Singh, 2005**). Aussi appelée phytoaccumulation, la phytoextraction réfère à l'absorption des contaminants présents dans le sol par les racines de la plante. Par la suite, ces contaminants sont transférés (ou transloqués) et accumulés dans les parties aériennes de la plante, comme les tiges et les feuilles, qui sont ensuite récoltées (**EPA, 1999**). La figure n°10 illustre le principe de phytoextraction au niveau d'un sol contaminé. Certaines plantes sont appelées « hyperaccumulatrices », puisqu'elles possèdent la capacité d'absorber une grande quantité de métaux comparativement aux autres plantes (**UNEP, 2002**). Ces plantes hyperaccumulatrices doivent être capables d'accumuler au moins 1 000 mg d'un métal spécifique par kilogramme (kg) de matière sèche, sans qu'il y ait de dommage apparent sur leur physiologie (**ITRC, 2009**).

Selon une étude menée par **Barbaroux et autres (2011)**, on apprend que les plantes du genre *Alyssum* peuvent concentrer dans leurs tissus jusqu'à 16,9 grammes (g) de nickel par kilogramme de matière sèche. Cette phytotechnologie est applicable autant au niveau des sols que des eaux polluées, il suffit de faire appel à des plantes aquatiques ayant la capacité d'accumuler de grandes quantités de polluants (**Dabouineau et autres, 2005**). Cependant, elle n'est efficace que sur les terrains possédant un niveau de contamination variant de faible à modéré afin que les plantes soient en mesure de croître convenablement (**Padmavathiamma et Li, 2007**).

On distingue deux types de phytoextraction : induite et continue (**Sait et autres, 1998**). La phytoextraction induite nécessite l'ajout de chélateurs dans le sol afin d'augmenter la mobilité et l'absorption des contaminants dans la plante (**Ghosh et Singh, 2005**). Par exemple, l'ajout d'acide éthylène diamine tétraacétique (EDTA) dans les sols, peut rendre le plomb biodisponible afin que celui-ci puisse être absorbé par la plante (**Prasad, 2011**).

Des complexes chélateurs/ions métalliques seront ainsi formés afin d'être absorbés par les racines (**Dabouineau et autres, 2005**). Tandis que la phytoextraction continue dépend plutôt des capacités génétiques et physiologiques des plantes, c'est-à-dire que les plantes doivent être en mesure d'accumuler des quantités particulièrement élevées de contaminants durant leur vie (**Peer et autres, 2006**).



Représentation schématique du processus de phytoextraction des métaux lourds

Photo n°04: Processus de phytoextraction, absorption des contaminants présents dans le sol (tiré de : <http://decouverte.entmip.fr/>)

IV.1. 4 Phytodégradation

La phytodégradation est couramment utilisée afin de dégrader les polluants organiques, comme les solvants chlorés, les herbicides, les insecticides et les hydrocarbures (**Vishnoi et Srivastava, 2008**).

Cette technique de phytoremédiation, aussi appelée phytotransformation, consiste à la dégradation des polluants organiques en des molécules moins toxiques et plus simples (**ADIT, 2006**). Ces mécanismes de dégradation qui opèrent se font soit directement par le relâchement d'enzymes produites par la plante dans la rhizosphère ou sont le résultat de l'activité métabolique dans les tissus de la plante (**Greipsson, 2011**).

Les enzymes impliquées dans la dégradation externe à la plante sont habituellement les déhalogénases, les oxygénases et les réductases (**Black, 1995**). Une fois dégradés, les contaminants vont être absorbés par la plante, incorporés aux tissus et utilisés comme nutriments afin de contribuer à la croissance de la plante (**EPA, 1999**). La phytodégradation peut être utilisée autant pour la décontamination des sols que des eaux. Cependant, elle n'est pas une technique que l'on peut utiliser afin de décontaminer les sols présentant des métaux lourds puisque ceux-ci ne se dégradent pas. Il est important de ne pas confondre phytodégradation avec rhizodégradation puisque ce sont deux techniques semblables, mais tout de même distinctes (voir plus bas). En d'autres mots, tout ce qui implique l'activité microbienne dans la rhizosphère ou la dégradation des contaminants par d'autres microorganismes comme les champignons est considéré comme étant de la rhizodégradation.

IV.1.5 Rhizodégradation

La rhizodégradation, aussi nommée phytostimulation, consiste en la dégradation des contaminants présents dans la rhizosphère par l'activité microbienne qui est favorisée par la présence des plantes.

le mécanisme qu'est la rhizodégradation. Les plantes peuvent modifier les propriétés physico-chimiques et biologiques de la rhizosphère par la sécrétion d'exsudats par les racines et à la pénétration des racines dans le sol. Ces composés (sucres, acides aminés, acides gras, nucléotides, enzymes, etc.) qui varient selon les espèces vont avoir une influence positive sur les populations de microorganismes. Ainsi, lorsqu'un site est végétalisé, on pourrait retrouver une plus grande variété, une quantité plus élevée et une activité plus importante des microorganismes, ce qui entraîne une augmentation de la biodégradation des contaminants dans le sol. Notamment, certains microorganismes (levures, champignons ou bactéries) ont la capacité de dégrader des contaminants organiques comme les solvants et les hydrocarbures afin de les utiliser comme source de nutrition et d'énergie (**UNEP, 2002**).

Dans la rhizosphère, on peut retrouver des associations plantes/microorganismes. Ces associations vont s'autosuffire, c'est-à-dire que les plantes vont fournir les nutriments nécessaires aux microorganismes tandis que ceux-ci vont s'assurer que les plantes sont en mesure de croître dans un sol approprié (ITRC, 2009). Récemment, des recherches ont démontré que lorsque le peuplier vivait en symbiose avec la bactérie *Methylbacterium populum*, il y avait minéralisation de certains explosifs, par exemple le 1,3,5-trinitroperhydro-1,3,5-triazine, mieux connu sous le nom de RDX (Van Aken, 2009). De plus, le mûrier (*Morus rubra*) qui produit des composés phénoliques peut être utilisé afin de décontaminer les sols par rhizodégradation. Ces composés stimulent la dégradation des BPC et des HAP par les bactéries (Oison et autres, 2003).

De façon générale, cette technique de phytoremédiation est préférablement utilisée sur des sites qui présentent une contamination en surface ou peu profonde étant donné que la dégradation des polluants s'effectue dans la rhizosphère qui s'étend à seulement 1 millimètre (mm) des racines de la plante (EPA, 2000).

IV.1. 6 Phytovolatilisation

La phytovolatilisation est définie comme suit : la plante va absorber les contaminants solubles par ces racines et les relâcher sous forme modifiée ou non par transpiration dans l'atmosphère au niveau de ces stomates (UNEP, 2002). Les contaminants pris en charge par cette technique de phytoremédiation sont généralement de type organique comme le trichloréthylène (TCE). Cependant, plusieurs études ont conclu que les contaminants inorganiques pouvaient aussi être dispersés sous forme volatile dans l'atmosphère par phytovolatilisation .

Bien que cette technique de phytoremédiation soit considérée comme une mesure verte en comparaison aux techniques conventionnelles, il est tout de même nécessaire de considérer les risques qui sont associés au transfert des contaminants dans l'atmosphère. On parle ici des risques pour la santé humaine et l'environnement (Vishnoi et Srivastava, 2008).

V. Les Avantages et Limites :

V. 1 Efficacité :

Lorsque l'on opte pour une technique de phytoremédiation afin de décontaminer les sols, on fait le choix d'inscrire un projet qui répond aux objectifs du DD. La phytoremédiation est efficace là où la contamination est considérée comme faible à moyenne étant donné que les végétaux doivent

être en mesure de croître convenablement. Bien que la phytoremédiation puisse prendre plusieurs années à décontaminer un site, la durée du traitement va dépendre de plusieurs facteurs. Par exemple, la concentration des contaminants présents sur le site, la zone de contamination, le type de plante sélectionnée ainsi que la durée de la saison de croissance (**EPA, 2012**). Des projets pilotes ont cours au Québec et les résultats sont prometteurs quant à l'efficacité de cette phytotechnologie (**Pitre et autres, 2010; Guidi et autres, 2012**).

V. 2 Avantages

La phytoremédiation est de plus en plus utilisée de nos jours puisqu'elle contribue au maintien de la structure des sols étant donné qu'elle ne nécessite aucune excavation (**EPA, 2012**). En plus d'être reconnue comme un choix économique comparativement aux techniques de décontamination conventionnelles, la phytoremédiation est largement acceptée par le grand public puisque peu d'impacts y sont associés. Plusieurs autres avantages sont attribués à cette technique de décontamination, dont la quantité de résidus générés par la phytoremédiation. Cela dit, lorsque l'on a recours à des technologies classiques, le volume de matière à enfouir ou à incinérer est plus élevé que si l'on utilise la phytoremédiation (réduction de plus de 95 %) (**Forget, 2004; Ghosh et Singh, 2005**). De plus, l'utilisation de ces phytotechnologies est applicable à une grande variété de sites contaminés. Que ce soit pour une contamination organique ou inorganique, une contamination au niveau des sols ou encore dans les eaux souterraines, la phytoremédiation est maintenant une option à considérer. Sans oublier que la présence de végétation sur un site contribue à réduire ou prévenir l'érosion et procure un avantage visuel au paysage (**Vishnoi et Srivastava, 2008**). L'énergie utilisée pour décontaminer les sites où des techniques de phytoremédiation ont lieu est le soleil, ce qui est avantageux pour l'environnement puisque les techniques traditionnelles vont plutôt opter pour une énergie sale. Par exemple pour l'excavation, c'est l'essence qui fait rouler la machinerie et qui malheureusement pollue énormément et créer des dérangements sonores. En plus de n'utiliser aucune énergie fossile lors de la décontamination, la phytoremédiation a en général un impact positif sur l'environnement. En effet, les végétaux sont reconnus pour améliorer la qualité de l'air et leur capacité de séquestrer les gaz à effet de serre (GES) (**ITRC, 2009**).

V. 3 Limites

Comme **Forget (2004)** l'a si bien dit dans un de ses articles : « Comme toute technique de décontamination des sols, la phytoremédiation comporte certaines limites avec lesquelles il faut composer ». Une des premières limitations est le contact entre la rhizosphère et les contaminants présents dans le milieu à décontaminer (**EPA, 2000**). La capacité des plantes à atteindre une certaine profondeur de par leurs racines dépend de l'espèce végétale et des conditions géomorphologiques et climatiques (**EPA, 2000**). Par exemple, certaines espèces d'arbres comme le peuplier ont des racines qui potentiellement peuvent atteindre une profondeur de 15 pieds (pi) dans les sols tandis que celles des arbustes vont être plus superficielles (**EPA, 2000**). Enfin, la phytoremédiation doit se restreindre aux sites présentant une contamination peu profonde et dont les concentrations sont relativement faibles pour que les plantes soient en mesure de croître de façon convenable afin de capter tous les contaminants (**Ghosh et Singh, 2005**). Ces contaminants absorbés par les végétaux peuvent aussi présenter un risque potentiel pour l'environnement puisqu'ils peuvent se retrouver dans la chaîne alimentaire si les animaux ingèrent des plantes contaminées (**Gouvernement du Canada, 2008**). D'ailleurs, plusieurs études ont démontré que certains animaux et insectes ne consommaient pas les plantes contaminées puisqu'elles avaient un mauvais goût (**Chaney et autres, 2000**). Le taux de croissance des végétaux va aussi influencer la phytoremédiation puisque plusieurs années peuvent être nécessaires afin d'atteindre un niveau de décontamination acceptable.

Finalement, bien que certaines plantes soient reconnues pour accumuler des quantités élevées de contaminants, le choix des plantes en phytoremédiation doit être réfléchi. Cela dit, il est préférable de ne pas opter pour des plantes qui ne sont pas natives au site où la décontamination *in situ* a lieu et d'éviter celles qui sont envahissantes. Ces précautions vont contribuer au maintien de la biodiversité déjà en place (**Ghosh et Singh, 2005**).

V. 4 Coût : de nombreux avantages sont associés à la phytoremédiation, dont le faible coût de décontamination qui peut être jusqu'à dix fois moins élevé que les techniques conventionnelles (**Peer et autres, 2006**). À titre de comparaison, les coûts associés aux techniques conventionnelles de décontamination, comme l'excavation sont estimés entre 400 000 \$ et 1 700 000 \$ US pour un site d'une acre contaminé au plomb à une profondeur de 50 centimètres (cm) tandis que seulement 60 000 à 100 000 \$ US seraient nécessaires afin de décontaminer ce même site selon une technique de phytoremédiation (**Khan et autres, 2004**).

VI. Présentation de l'espèce étudié

VI.1 Description botanique des chénopodiacées

Les chénopodiacées sont répandues dans le monde entier, mais ont une préférence marquée pour les terrains salés (**Crété, 1965**) vivant surtout sous climat arides et semi-aride (**Ozenda, 1958**). Ces espèces, dites " halophiles ", pour s'adapter à la salinité des sols, élèvent leur concentration osmotique à une concentration supérieure à celle du sol, elles accumulent en conséquence une grande quantité de sels (**Goldhirs et al, 1990, Achour, 2005, Roeder, 2006**). De nombreuses espèces appartenant à cette famille sont xérophiles, elles doivent leur résistance particulière à l'éventuel épaissement et à la succulence de leurs tiges, et à l'état plus ou moins charnu de leurs feuilles ou au contraire, à la réduction de leur système foliaire (**Crété, 1965**). Ces plantes sont en majorité pérennes, prenant une forme en boule ou en coussinet afin de réduire réchauffement (**Smail- Saadoun, 2005**).

Les chénopodiacées sont des plantes à fleurs sans pétales, peu visibles, hermaphrodites ou unisexuelles, elles sont regroupées en inflorescences en épi ou à cyme (**Mulas et Mulas, 2004**). D'autre part, les feuilles sont souvent recouvertes par des trichomes, ce sont des glandes pédicellées à tête formée par une grosse cellule remplie d'eau (suc vacuolaire riche en sels), en période sèche, ces poils fonctionnent comme réserve d'eau et quand celle-ci est épuisée, la couche de poils flétris forme un revêtement blanchâtre, farineux caractéristique des chénopodiacées (**Deysson et Mascré, 1951; Smail-Saadoun, 2005 ; Ighilhariz, 2008**). Certaines feuilles des chénopodiacées ont la forme d'une patte d'Oie (*Chenopodium*) d'où le nom de cette famille (du grec : khèn= oie, podos= pied) (**Guignard et Dupont, 2004**).

La famille des chénopodiacées englobe environ cent (100) genres qui peuvent être divisés, suivant la forme de l'embryon, en deux tribus (**Chadefaud et Emberger, 1960 ; Crété, 1965 ; Rosas, 1989**):

- *Spirolobae*, qui présente un embryon enroulé en spirale et l'albumen est divisé en deux parties par l'embryon;
- *Cyclobae*, qui présente un embryon en forme de fer à cheval ou en demi-cercle comprenant l'albumen en entier ou en partie. A cette dernière tribu appartient le genre *Atriplex* qui est un genre cosmopolite et qui englobe un grand nombre d'espèces

distribuées dans toute les régions arides et semi arides du monde (Crété, 1965 ; Rosas, 1989 ; Reyes-Vera *et al*, 2008).

VI.2 Géobotanique de l'Atriplex

Dans le monde, les *Atriplex* se rencontrent de l'Alaska à la Pentagone, de la Bretagne à la Sibérie et de la Norvège à l'Afrique du Sud (Franclet et Le Houerou, 1971) (Tableau n°07). En Afrique du Nord, le genre *Atriplex* comprend 15 espèces spontanées et 2 espèces naturalisées, soit 07 espèces vivaces, 01 biannuelle et 09 annuelles (Franclet et Le Houérou, 1971).

En Algérie, l'*Atriplex* est spontanée dans les étages bioclimatiques semi-arides et arides. Les plus grandes superficies correspondent aux zones dites steppiques : Batna, Biskra, Boussaâda, Djelfa, Saida, M'sila, Tébessa, Tiaret (Anonyme, 1974).

Tableau n°02 : Répartition des espèces d'*Atriplex* dans le monde

Pays ou régions	Nombre d'espèces et/ou sous espèces	Pays ou régions	Nombre d'espèces et/ou sous espèces
- Etats-Unis	110	- Baja Californie (Mexique)	25
- Australie	78	- Afrique du Nord	22
-B. méditerranéen	50	- Texas	20
- Europe	40	- Afrique du sud	20
-URSS	40	- Iran	20
- Proche orient	36	- Syrie	18
- Mexique	35	- Palestine / Jordanie	17
- Argentine	35	- Algérie / Tunisie	17
- Californie	32	- Bolivie / Pérou	16
- Chili	30		

VI.3 Mise en Culture des *Atriplex*

Les Atriplex sont des plantes qui préfèrent les sols frais, riches en humus. La multiplication se fait par semis sur sable, au printemps de mars à mai (**Achour, 2005**). La température de la germination varie selon l'espèce et son origine, elle est de 20 à 25° C pour *Atriplex halimus* (**Belkhodja et Bidai, 2004**) et de 16 à 24° C pour *Atriplex canescens*. Cependant certaines variétés originaires d'Utah (USA) peuvent germer à 0- 3° C (**Springfield, 1970**).

VI.4 Physiologie des *Atriplex*

Le genre *Atriplex* caractérisé par une anatomie foliaire de type Kranz (présence d'une gaine de cellules de grandes dimensions qui entourent les tissus vasculaires) appartient au groupe des plantes C4 (**Mulas et Mulas, 2004 ; Smail Saadoun, 2005 ; Ighilhariz, 2008**). Les feuilles des plantes en C4 sont généralement plus minces que celle des plantes en C3 (**Ighilhariz, 2008**). De nombreuses recherches ont démontré que ce type de plantes est caractérisé par une grande productivité (**Mulas et Mulas, 2004**).

Les plantes soumises aux contraintes engendrées par la salinité ou la sécheresse, réagissent par une modification de leur teneur en certains composés organiques appelés osmolytes ou osmoprotecteurs (**Hubac et Vieira Dasilva, 1980 ; Hubac, 1990 ; Ighilhariz, 1990 ; Monneveux et This 1997**). Ces réactions d'adaptation sont destinées à rétablir l'équilibre hydrique dans la plante. Parmi les osmolytes synthétisés par les plantes stressées la glycine bêtaïne (**Gérard et al., 1991**), les polyamines (**Le Dily et al., 1991**) ou des acides aminés telle la proline (**Ighilhariz, 1990, Belkhodja, 1996 ; Belkhodja et Benkabilia , 2000 ; Ashraf et McNeilly, 2004**).

VI.5 Intérêts des *Atriplex*

VI.5.1 Intérêt fourrager

C'est une source de minéraux, vitamines et protéines pour le bétail (**El-Shatnawi et Mohawesh, 2000**) ce qui permet de les utiliser comme une réserve fourragère en été et en automne, comblant la carence de fourrage qui se manifeste avant la croissance printanière des espèces fourragères herbacées (**Kessler, 1990**). Différentes observations expérimentales ont

démontré que, grâce à cet arbuste, le bétail peut supporter de longues périodes de carence alimentaire dues à la sécheresse (**Le Houérou, 1980**). En effet une bonne formation d'*Atriplex halimus* peut produire jusqu'à cinq tonnes par hectare de matière sèche et par an sur des sols dégradés ou salins inutilisables pour d'autres cultures (**Dutuit et al., 1991**)

VI.5.2 Intérêt écologique

Mulas et Mulas (2004) rapportèrent que l'association des cultures de céréales à des arbustes fourragers qui, grâce à la capacité de leurs racines de s'enfoncer dans le sol, ont des effets bénéfiques sur l'environnement et le rétablissement de la fertilité de l'écosystème. En plus les plantes de genre *Atriplex* jouent un rôle important comme brise-vent, pour la protection du sol et la création d'un microclimat favorable, permettant aux autres espèces fourragères (l'avoine, la luzerne...), d'augmenter leur productivité (**El Mzouri et al., 2000**). Selon **Abbad et al., 2004 h**) le système racinaire très ramifié, chez les *Atriplex*, joue un rôle important dans la réhabilitation des sols dégradés, la lutte contre l'érosion des sols et la désertification. Par ailleurs certaines espèces d'*Atriplex*, cas d'*Atriplex canescens* Purch Nutt. sont mycorhizées par des champignons fixateurs de phosphore (**Barrow et Osuna, 2002**). Ces champignons prélèvent du carbone à partir des racines de la plante et lui fournissent en échange du phosphore, elle augmente également la capacité d'absorption des racines ce qui augmente leur tolérance à la sécheresse (**Barrow et Osuna, 2002 ; Barrow et al, 2004**)

VI.5.3 Intérêt économique

De nombreuses études ont mis en évidence le fait qu'en associant la culture des céréales aux arbustes fourragers appartenant au genre *Atriplex*, la production des céréales a augmenté de 25% (**Brandie, 1987**), de plus en été et en automne, le bétail peut éventuellement brouter les chaumes d'orge et les arbustes d'*Atriplex* (**Mulas et Mulas, 2004**). Par ailleurs, la structure ligneuse des *Atriplex* constituent une source d'énergie intéressante (**Abbad et al., 2004b**).

VI.5.4 Intérêt thérapeutiques

Certaines espèces d'*Atriplex*, sont largement connues pour leur intérêt médicinal traditionnel, à savoir dans le traitement digestif, respiratoire, uro-génital, vasculaire, et possèdent des propriétés antihypercholestérolémiante, antipyrétique, antirhumatismale (**De Feo**

et Senatore, 1993) et antihyperglycémiant (De Feo et Senatore, 1993 ; kambouche et al., 2011).

Selon Dutuit et al., (1991) l' *Atriplex halimus* L. est utilisé comme plante médicinale dans la pharmacopée traditionnelle. En effet elle agit sur la maladie du sommeil (trypanosomiase) (Bellakhdar, 1997), et elle possède également un effet antidiabétique notamment sur le diabète type 2, car selon Dey et al., (2002), 3g/Jour de feuille d' *Atriplex halimus* L. diminue le taux du glucose dans le sang. Said et al., (2008) rapportèrent que l'utilisation du « Glucoselevel », un médicament formé par l'association d'extraits de feuilles de 4 plantes à effet anti diabétique à savoir, *Atriplex halimus*, *Olea europea*, *Juglans regia* et *Urtica dioica*, agit positivement sur le diabète type 2 et sans effets secondaires.

D'autre part les jeunes pousses et les feuilles d' *Atriplex halimus* L. étaient déjà consommées par les Égyptiens et les Grecs et en Angleterre où on conservait les feuilles dans du vinaigre à la manière des cornichons. Les jeunes pousses et les feuilles un peu charnues ont une saveur salée due au milieu où elles croissent, elles sont bonnes crues, dans les salades composées qu'elles relèvent alors que mangées seules, elles ont tendance à irriter la gorge (le salinier, 99). Sa décoction donne une teinture rouge, d'emploi analogue à celui du henné pour les mains et les pieds.

VI.6 Présentation d' *Atriplex canescens* Pursh Nutt.

VI.6.1 Systématique de l'espèce

Atriplex canescens est classée dans le taxon suivant (USDA /NRCS : United States)

Règne	Plantae
Sous règne	Tracheobionta (Plantes vasculaires)
Embranchement	<i>Spermatophyta</i> (Plantes à graines)
Sous embranchement	<i>Magnoliophyta</i> (Plantes à fleurs)
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	Caryophyllidae
Ordre	Caryophy Haies
Famille	Chenopodiaceae (Amaranthaceae)
Genre et espèce :	<i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.

VI.6.2 Origine de l'espèce

L' *Atriplex canescens* Purch Nutt. espèce introduite (Le Houérou, 1992, 2000) semble particulièrement intéressante en raison de sa plus grande résistance au froid. Cette espèce originaire d'Amérique du Nord (Mulas et Mulas, 2004) est une plante fourragère exceptionnelle grâce à sa valeur nutritive (Tab 1), sa bonne adaptabilité et son feuillage persistant (Kitchen et McArthur, 2001). De plus c'est un important arbuste pour la réhabilitation des sols dégradés et s'adapte facilement hors de son habitat naturel (Sanderson et Mc Arthur, 2004)

VI.6.3 Description morphologique

L'*Atriplex canescens* Purch Nutt. est un arbuste ligneux, dressé, robuste, et très ramifié (Figure n°14) de 1 à 1.30 m, cependant certaines variétés tel que *Atriplex canescens* var *gigantea* peuvent atteindre 3 m (Wurtele et al., 1987). La hauteur de cette espèce dépend des conditions écologiques du milieu ainsi que de son génotype. Les feuilles de 2 à 5 cm sont persistantes, alternes, sessiles, entières, étroitement oblongues ou linéaires spatulées, de couleur grise et pelliculeuse (Figure n°06) grâce à la présence de trichomes (Johnson et Hoagland, 1999 ; Ighil Hariz, 2008). Les fleurs mesurent de 2 à 3 mm de long (Mozingo et Hugh, 1987 ; Diggs et al., 1999).

C'est une espèce souvent dioïque, cependant certaines espèces monoïques peuvent se rencontrer à l'intérieur de la population, d'autres espèces peuvent montrer un caractère hermaphrodite (Barrow, 1987 ; Mozingo et Hugh, 1987 ; Ogle et al., 2003 ; Ogle et St John, 2005). Les graines sont étroitement contenu dans les valves et mesurent environ 1 à 2 mm de diamètre (Welsh et al., 1987). *Atriplex canescens* est la seule espèce de ce genre dont le fruit possède quatre (4) large ailes (Kartesz, 1988) d'où le nom anglais de cette espèce « fourwing : four=quatre, wing = aile » (Figure n°08).

Le système racinaire est très développé, formé d'une racine principale pouvant atteindre 6 m de profondeur et de racines latérales occupant les couches supérieures du sol (Barrow, 1997). Cette espèce pousse sur différents types de sols, le plus souvent sur des sols profonds, bien drainés, sableux. Toutefois, elle pousse aussi bien sur l'argile lourde et sur des sols enrichis en sélénium (Pratt et al, 2004)

Tableau n°03 : Composition minérale d'*Atriplex canescens* Purch Nutt. selon **Niekerk et al.** (2004)

Composes minérales de l'espèce	<i>Atriplex canescens</i> Purch Nutt
Calcium(Ca) (g/kg)	20.6 (\pm 4.3)
Phosphore(P) (g/kg)	1.9 (\pm 0.2)
Magnésium(Mg) (g/kg)	16.1 (\pm 3.4)
Sélénium(Se) (pg /kg)	39 (\pm 20)
Zinc (Zn)(mg/kg)	110 (\pm 18)
Manganèse (Mn) (mg/kg)	170 (\pm 59)

**Photo 05 :** L'*atriplex canescens* (push) Nutt arbustes

<http://www.perennialfavoritesnursery.com/Images/Natives/AtriplexcanescensFourWingedSaltBrush.j>



Photo n° 06: Feuilles d'*Atriplex canescens* Purch Nutt. <http://www.desert-tropicals.com/plants/chanopodiaceae/Atriplex-canescence2.jpg>.



photo n°07: Graines d'*Atriplex canescens* Purch Nutt. (Les graines possèdent 4 ailes « fourwing »)



Photo n°08 Fruits d'*Atriplex canescens* Purch Nutt.
<http://www.duke.edu/~jspippen/plants/saltbush.jpg>

I. Objectif de notre travail

Notre travail a pour objectif de déterminer le comportement écophysologique de la plante *Atriplex canescens* (pursh) nutt sous l'effet de stress salin et métallique (cuivre), induit par différentes doses de NaCl en analysant les paramètres biométriques et biochimiques.

II. Sites expérimentation

Cette expérimentation a été réalisée sous une serre en verre au sein de l'atelier agricole situé à Mazagran à 5Km environ de la ville de Mostaganem, cette serre est caractérisée par sa température contenue entre 15 et 20°C en Hiver et le laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols situé à l'université d'Abdel Hmid Ibn Badis de Mostaganem.



Photo n°09 : Site expérimentale de Mazagran. photo (2015-2016)

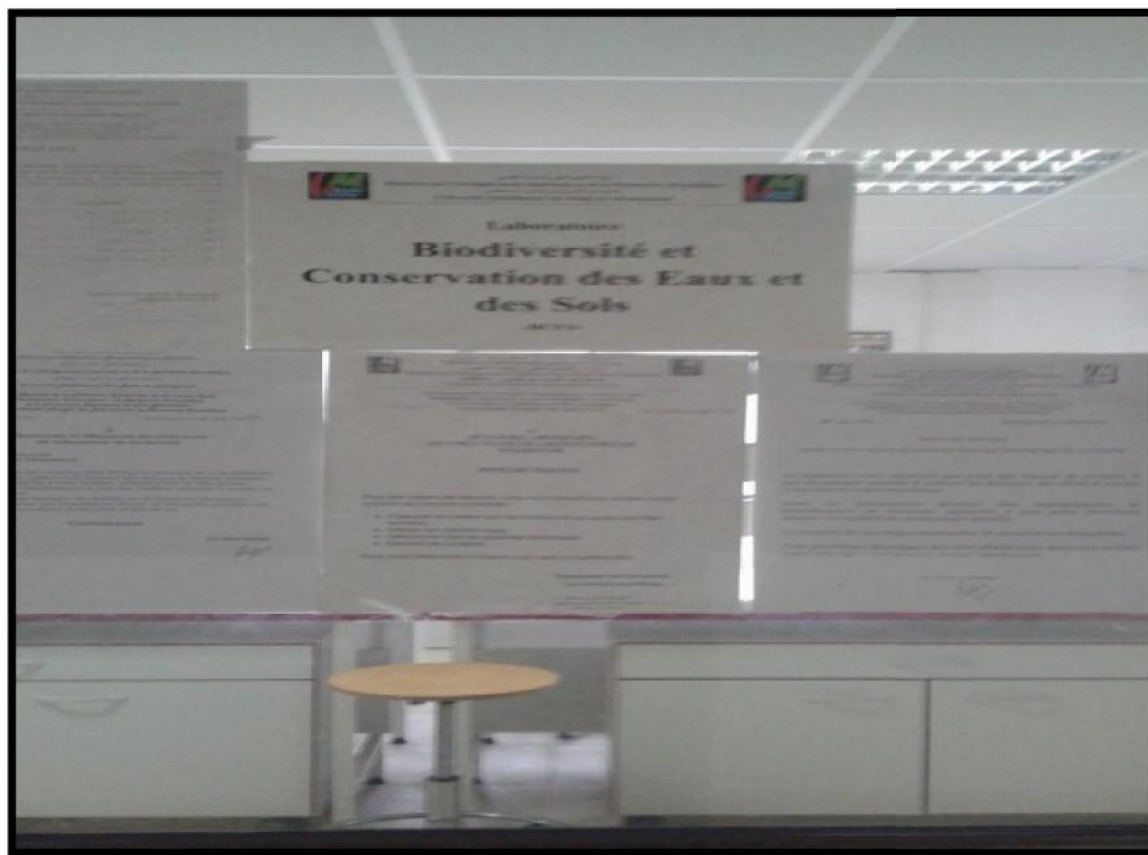


Photo n°10 : Site expérimentale laboratoire de biodiversité. Photo (2015-2016)

III. Matériel végétal :

Une espèce du genre *Atriplex canescens pursh nutt* est mise en évidence.

III.1 Origine du matériel végétal :

Les graines de l'*Atriplex canescens* proviennent de la région d'El Bayedh au mois de décembre (2014-2015).

IV Méthodes :

IV.1 Préparation des graines :

Les graines sont désinfectées à l'eau de javel à 8% pendant 5 minutes puis rincées abondamment à l'eau distillée pour éliminer toute trace de chlore. Elles sont ensuite imbibées puis sont mises à germer à moyenne de 10 graines par boîte de Pétrie tapissées de papier filtre dans l'étuve à 25°C pendant 5 à 7 jours et arrosées.



Photo n°11 : Graine de l'*Atriplex canescens* (pursh)nutt.

IV.2 Préparation des plantules :

On déplace les graines germées dans des alvéoles remplies de terreau dans laboratoire (biodiversité et conservation des eaux et des sols) de l'université de Mostaganem, et on les laisse jusqu'au stade plante de cinq à six feuilles.



Photo n°12 : *Atriplex canescens* après 25 jours de semis.

IV.3 Préparation du substrat :

Le substrat utilisé dans ce travail est constitué du sable prélevé des dunes au bord de la mer de (Sidi Mansour) et de la tourbe achetée.

Avant d'utiliser le sable, on passe par plusieurs opérations de préparation en commençant par le tamisage pour éliminer les débris végétaux, animaux et toutes les pierres, ensuite, on utilise l'esprit de sel mélangé avec de l'eau pour le lavage, dans le but d'éliminer le sel, et bien sûr on termine par le rinçage avec de l'eau distillée. A la fin de chaque lavage, on prend une petite quantité d'eau de rinçage quelque goutte de nitrate d'argent pour vérifier qu'il y a plus de sels,

Le sable est ensuite mis à l'air libre pour le séchage. Ce sable constitue un support inerte à la plante, aère les racines et présente l'avantage de ne pas fixer les ions (**DAMELON,1968**).

Après ces préparations, le sable est mélangé à la tourbe (2V/V) et mis dans différents pots à raison de 700 g par pot, en respectant la capacité de rétention nécessaire pour chaque plante.



Photo n°13 : préparation du substrat.

IV.4 Repiquage :

Les plantes des alvéoles âgées de 25 jours sont ensuite repiquées dans des pots en plastique remplis d'un mélange de sable et de terreau (2V/V) à fond tapissé d'une couche de graviers pour assurer le drainage.

Les plantes atteignent après deux mois à peu près 45 à 55 cm de hauteur de la partie aérienne.



Photo n°14: des plantules repiquées dans des pots

IV.5 Préparation de la solution de l'arrosage

Les plantes sont arrosées par de l'eau distillée deux fois par semaine et par la solution nutritive une fois par semaine, pendant 60 jours jusqu'à l'application du stress.

Tableau n°05 : Composition de la solution nutritive de Hoagland (1938).

Solution mère	Poids g/l
Macro-éléments	
KNO_3	191.90
$(\text{NO}_3)\text{Ca}, 4\text{H}_2\text{O}$	129.80
$\text{NO}_3 \text{NH}_4$	210.00
$\text{SO}_4 \text{Mg}, 7\text{H}_2\text{O}$	61.50
$\text{PO}_4 \text{H}_2\text{K}$	54.40
$\text{P}_0_4\text{K}_2\text{H}, 3\text{H}_2\text{O}$	34.23
Oligo-éléments	
$\text{Cl}_2\text{Mn}, 4\text{H}_2\text{O}$	1.80
$\text{CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$	0.176
$\text{ZnSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$	0.219
BO_3H_3	2.861
$\text{MO}_7\text{O}_{24}(\text{NH}_4), 7\text{H}_2\text{O}$	0.285
$\text{CioHi}_2\text{FeNaOs}$	0.05

IV.6 Préparation de la solution de stress : salin et métallique

Le stress appliqué sur les plants, est réalisé par la solution du chlorure de sodium et par solution du sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Les concentrations sont les suivantes :

Tableau n°06 : Concentration du chlorure de sodium.

Nombre de concentration	Concentration du NaCl
1	0%
2	0.5%
3	3%

Tableau n°07: Concentration du sulfate de cuivre.

Nombre de concentration	Concentration de $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
1	0 ppm
2	2000ppm
3	2500ppm
4	3000ppm

Tableau n°08: Concentration du chlorure de sodium et sulfate de cuivre..

Nombre de concentration	Concentration du NaCl et CuSO ₄ H ₂ O
1	NaCl 0.5%/ CuSO ₄ 2000ppm
2	NaCl 0.5%/ CuSO ₄ 2500ppm
3	NaCl 0.5%/ CuSO ₄ 3000ppm
4	NaCl 3%/ CuSO ₄ 2000ppm
5	NaCl 3%/ CuSO ₄ 2500ppm
6	NaCl 3%/ CuSO ₄ 3000ppm

Remarque : 1000ppm=1g.L⁻¹

IV.7 Dispositif expérimental :

Nous avons réalisé cette expérimentation par le biais de 12 traitements, à raison de 4 pots par traitement (4 répétitions) pour l'espèce. *Atriplex canescens* (pursh) nutt.

Le stress est débuté sur la plante âgées de 60 jours de 18/10/2015 jusqu'au 18/12/2015 en respectant la capacité de la rétention (120ml/par plante).trois fois par semaine, deux fois stress et une fois solution nutritif.



Photo n°15 : dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex canescens* avant le stress

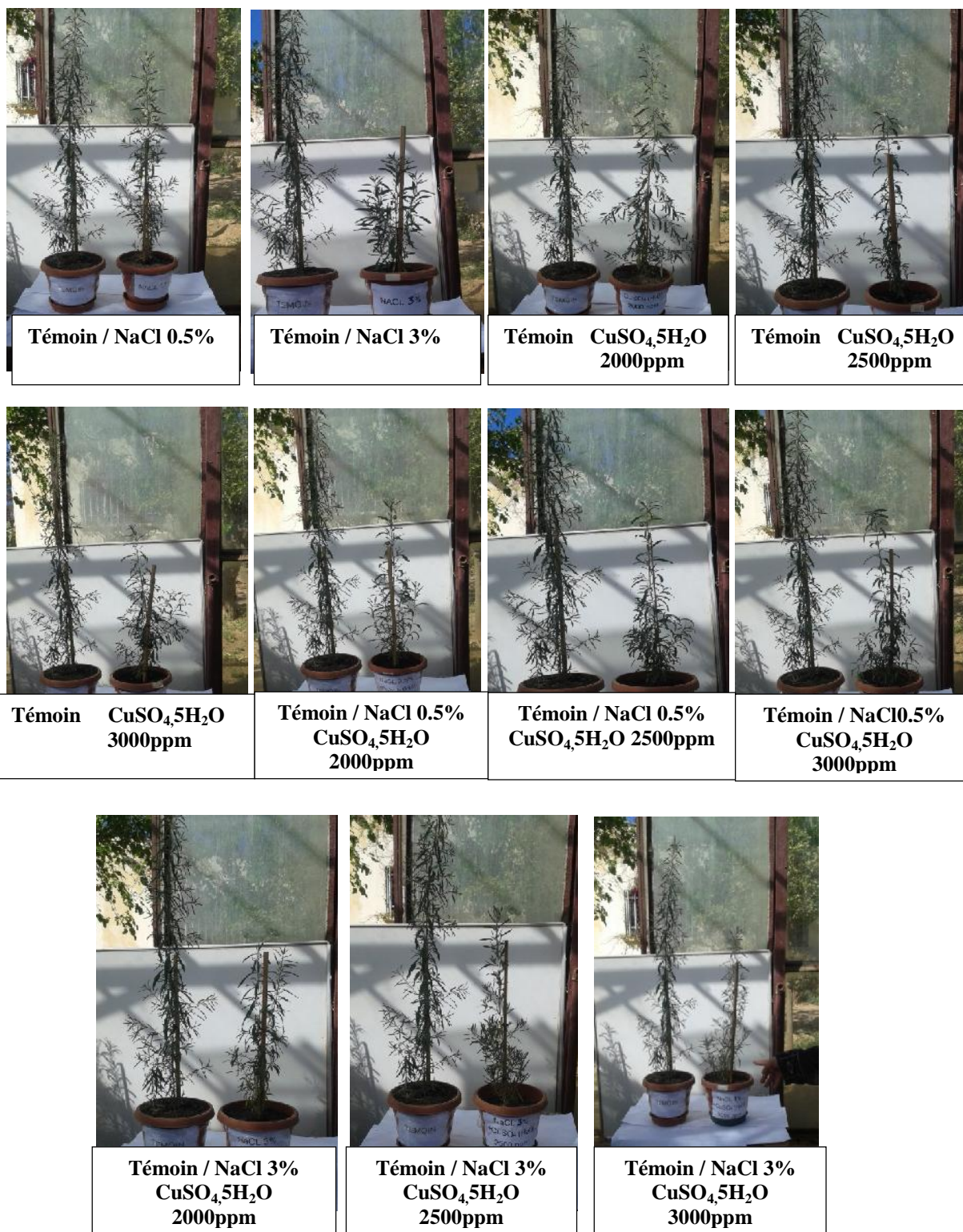


Photo n°16: dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex canescens* après le stress

IV.8 Prélèvement du matériel végétal pour les analyses :

Après l'application de stress ; les plantes ont été déterrées, et on a séparé leurs différentes parties (racines ; tiges ; feuilles), les feuilles sont prélevées et mises dans des sachets de papier kraft de manière à les protéger de la lumière, puis conservées au réfrigérateur.



Photo n°17 : prélèvement des feuilles dans des sachets krafts

IV.9 Applications du stress salin

La contrainte saline est appliquée sur les plantes âgées de 03 mois (120 jour) à raison de 120ml de solution stressante par pot.

IV.10 Mesures de paramètre biométrique :

a) Mesure de la surface foliaire

La surface foliaire a été déterminée selon la méthode de **Paul et cil, (1979)**, qui consiste à placer l'échantillon de feuille sur du papier calque, puis pesé. D'autre part, on prend 1cm² du papier calque que l'on pèse, on en déduit la surface assimilatrice par la formule suivante:

$$S/P=S1/F \Rightarrow SI= S \times F / P$$

SI: Surface foliaire (cm²).

S : 1 cm² du papier calque.

P: Poids de 1cm² du papier calque (g).

F: Poids de l'échantillon (g).

b) Le volume racinaire

Il est mesuré par immersion du système racinaire bien nettoyé et bien lavé à l'eau courante, dans une éprouvette graduée (en cm³) (500cm³) remplie d'eau.



Photo n°18 : Mesure du Volume racinaire

c) Mesure de la hauteur des tiges :

La longueur de la tige principale est mesurée en centimètres (cm) à l'aide d'une règle graduée, les valeurs obtenues sont les moyennes obtenus des 04 répétition/traitement/ espèce. la longueur des plants est mesurée

IV.11 Mesure des caractères biochimiques :**a) Dosage de la chlorophylle**

L'extraction de la chlorophylle **a** et **b** est réalisée selon la méthode de **Lichtenthaler (1987) et Shabala et al. (1998)** et au niveau de l'avant dernière feuille.

Dans des tubes à essai, on ajoute à 100 mg d'échantillon frais, coupé en petits fragments, 10 ml d'acétone à 95%, l'ensemble est conservé à l'obscurité et à 4°C pendant 48 heures.

Les concentrations de la chlorophylle « a », de la chlorophylle « b » sont effectués à l'aide d'un spectrophotomètre à UV à des densités optiques respectives de 662 nm et 664 nm.

L'appareil est étalonné avec la solution témoin à base d'acétone à 95%. Les teneurs de la chlorophylle **a**, de la chlorophylle **b** et les chlorophylles totales sont calculées par les formules suivantes :

$$\text{Chl a} = 9,784 \times \text{Do (662)} - 0,99 \times \text{Do (664)}$$

$$\text{Chl b} = 21,42 \times \text{Do (664)} - 4,65 \times \text{Do (662)}$$

$$\text{Chlorophylle totale} = \text{Chl a} + \text{Chl b}.$$



Photo n°19: Extraction et Dosage de la chlorophylle

b) Dosage des sucres solubles

L'extraction et le dosage des sucres solubles, dans les feuilles et les racines des plantes, sont faits selon la méthode de **Dubois (1956)** qui consiste à :

- mettre 100 mg de matière fraîche dans des tubes à essai.
- ajouter 2 ml d'éthanol à 80%.
- laisser le tout au repos pendant 48h.
- faire évaporer tout l'alcool en mettant les tubes à essai dans un bain Marie à 70°.
- après refroidissement, mettre dans chaque tube à essai 20 ml d'eau distillée.
- prendre 1 ml de la solution et ajouter 1 ml de phénol à 5 % en prenant soin de bien agiter.
- ajouter 2 ml d'acide sulfurique concentré et déposer les tubes à essai dans un bain de glace; les laisser reposer durant 25 min.
- procéder à la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 490 nm.
- calculer les concentrations ($\mu\text{g/g}$ MF) à partir de l'équation déduite de la gamme d'étalonnage.

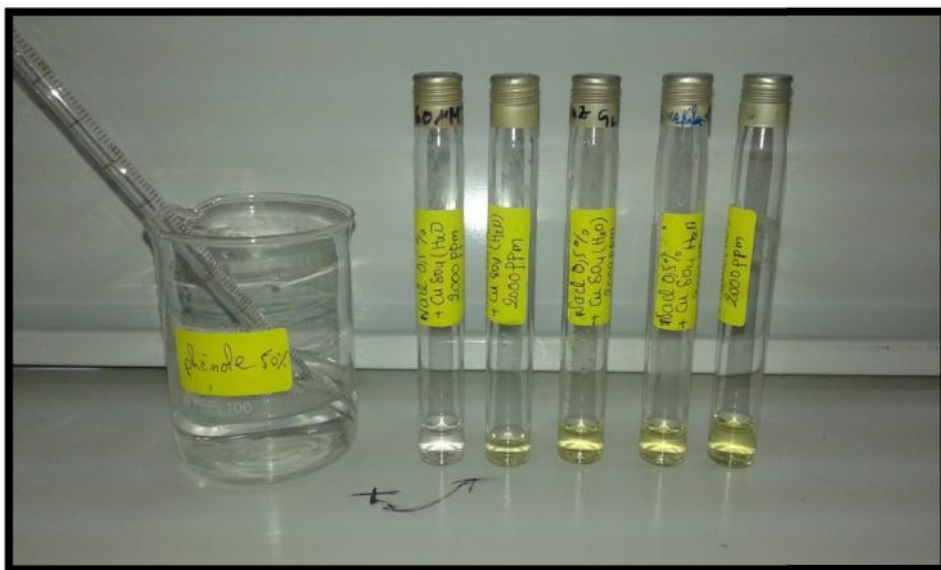


Photo n°20 : Extraction et Dosage de sucre soluble

c) Dosage de la proline

La proline est dosée selon la technique utilisée par **Troll et Lindesly (1955)**, simplifiée et mise au point par **Dreier et Goring (1974)** et modifiée par **Monneveux et Nemmar (1986)**

Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique. La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré.

L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de proline dans l'échantillon.

L'extraction de la proline consiste à :

- prélever 100 mg de matière fraîche foliaire et racinaire de chaque répétition et les mettre dans des tubes à essai.
- ajouter 2 ml de Méthanol à 40 %.
- ensuite chauffé au bain-marie à 80°C pendant 60min, les tubes sont recouverts de papier aluminium pour éviter la volatilisation de l'alcool.
- Après refroidissent, on prélève 1ml de la solution, auquel on ajoute 1ml d'acide acétique (CH_3COOH) et 1ml de mélange modifié contenant (120ml d'eau distillée +300ml d'acide acétique +80ml d'acide ortho phosphorique) et 25mg de ninhydrine.
- Les solutions sont portées à ébullition pendant 30min, elles virent au rouge après refroidissement,
- on ajoute 5ml de toluène, après agitation deux phases se séparent :
 - la phase inférieure sans proline
 - la phase supérieur qui contient la proline cette phase est ensuite récupérée et déshydratée par l'adjonction de sulfate de sodium Na_2SO_4
- Enfin, on procède à la détermination des densités optiques des échantillons à la longueur d'onde 528 nm après étalonnage de l'appareil par le mélange (acide acétique+ eau distillée + acide ortho phosphorique+ninhydrine)

Les valeurs obtenues sont reportées sur la courbe d'étalonnage :

$$Y=0.0027X$$

y : densité optique (DO), x=concentration en proline

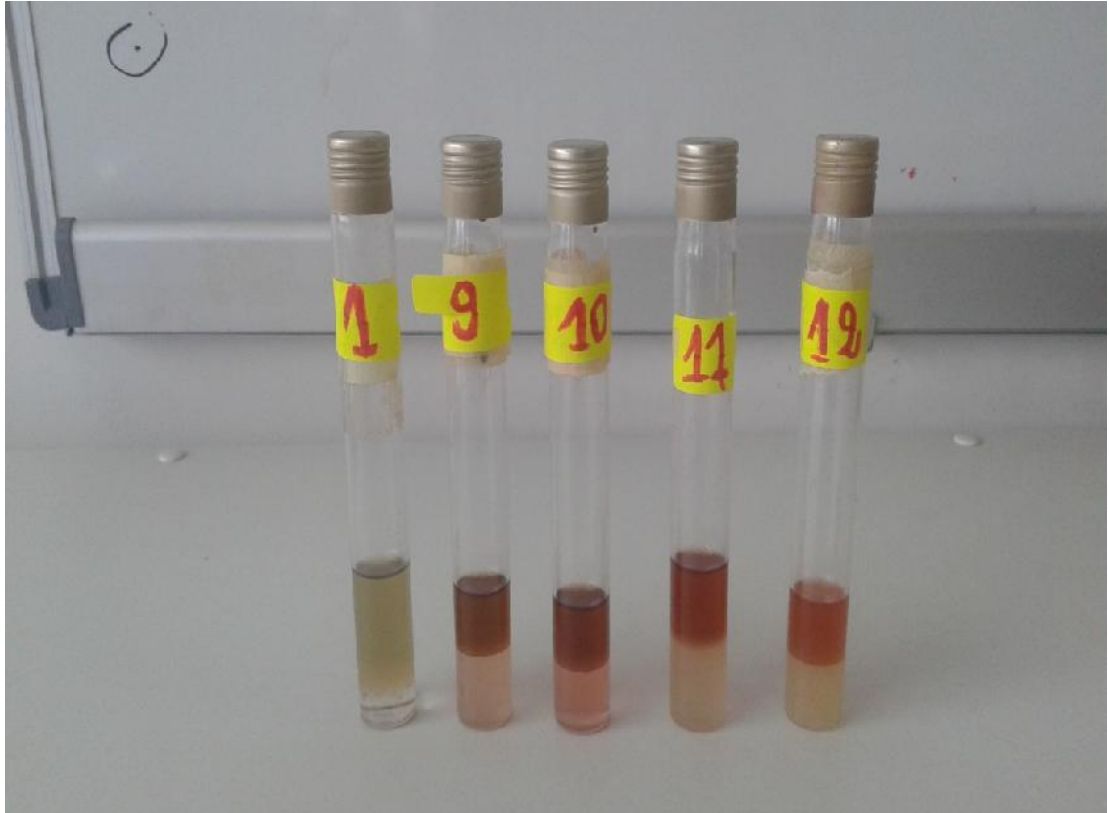
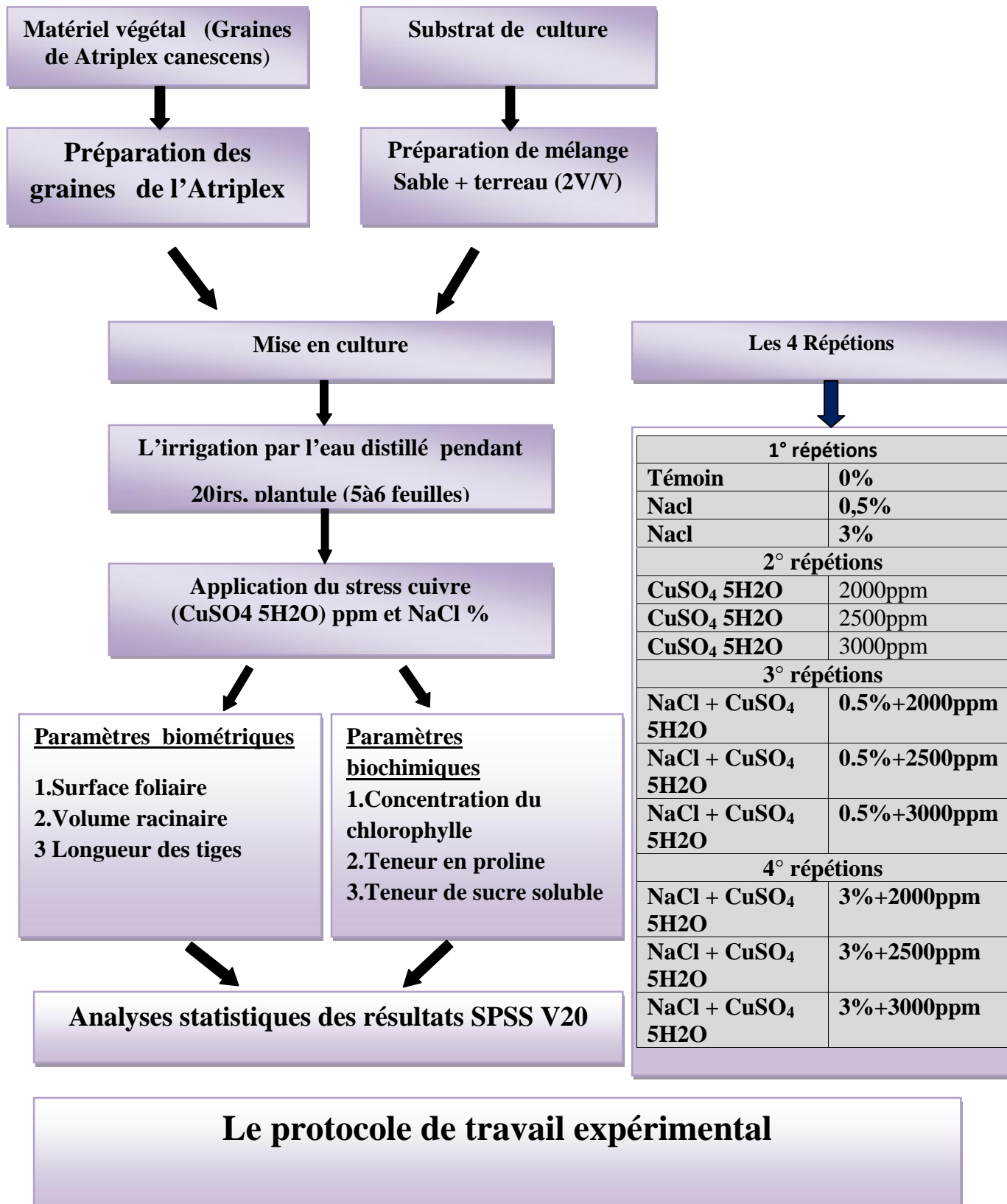


Photo n°21 : Extraction et Dosage de la proline

IV.12 Schémas du protocole expérimentale



I. Paramètres biométriques :

I.1 Surface Foliaire

a - Sous traitement de NaCl et (CuSO₄.5H₂O: 2000, 2500,3000ppm)

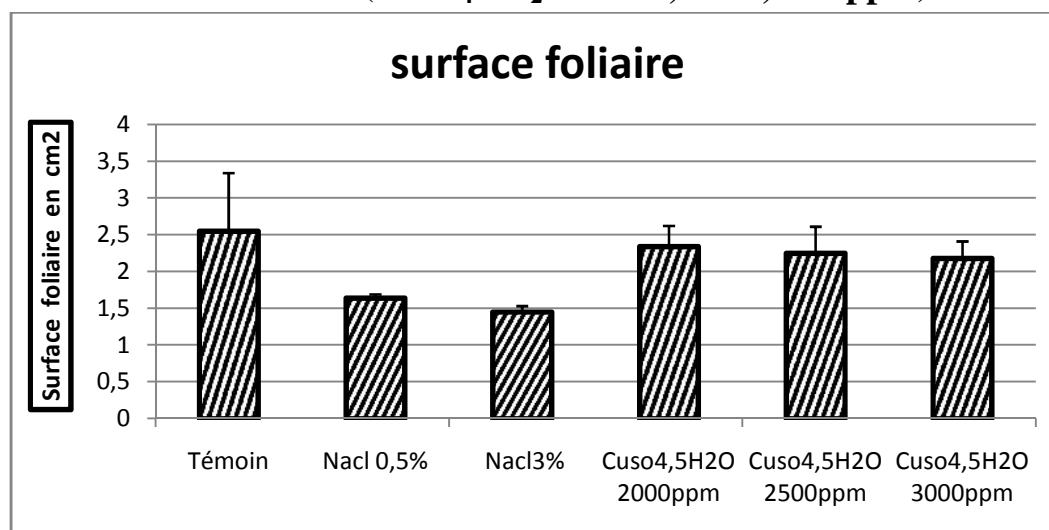


Figure .01 - la surface foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

D'après les données du tableau (09) et la figure (01) les plantes témoins ont une surface foliaire d'une moyenne de 2,55 cm² avec un écart type de 0,79. Par contre celles qui ont été mis sous traitement salin (NaCl 0,5% et 3%) leurs surface foliaire a diminué légèrement, soit d'une moyenne de 1,64 cm² pour la concentration de NaCl 0,5%, et de 1,45 cm² pour la concentration de NaCl 5%. Sous traitement métallique (CuSO₄.5H₂O) 2000-2500-3000ppm, les résultats obtenus montre une légère diminution de la surface foliaire des plantes stressées par rapport aux plantes témoins

Tableau 09 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la srfce foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et (CuSo₄.5H₂O:2000,2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	(CuSO ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	(CuSO ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	(CuSO ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Surface foliaire	2,55±0,79	1,64±0,05 NS	1,45±0,08 NS	2,34±0,28 NS	2,25±0,36 NS	2,18±0,23 NS

b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000ppm)

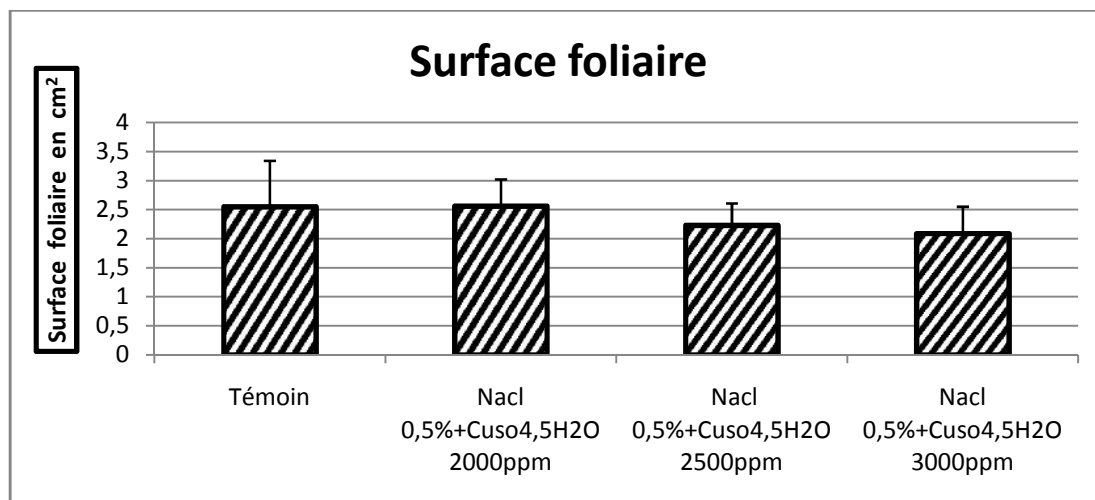


Figure .02- la surface foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

D'après les données du tableau (10) et la figure (02) : les plantes stressées au traitement combiné de la solution saline et métallique (NaCl 0,5% + CuSo₄.5H₂O:2000 ,2500,3000ppm) ,leurs surface foliaire a légèrement diminué soit d'une moyenne respective de (2,56 / 2,28 / 2,09) cm² .

Tableau 10 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la surface foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000,2500,3000 ppm).

Concentration	Témoïn	NaCl 0,5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 0,5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 0,5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Surface foliaire (cm ²)	2,55±0,79	2,56±0,46 NS	2,23±0,38 NS	2,09±0,46 NS

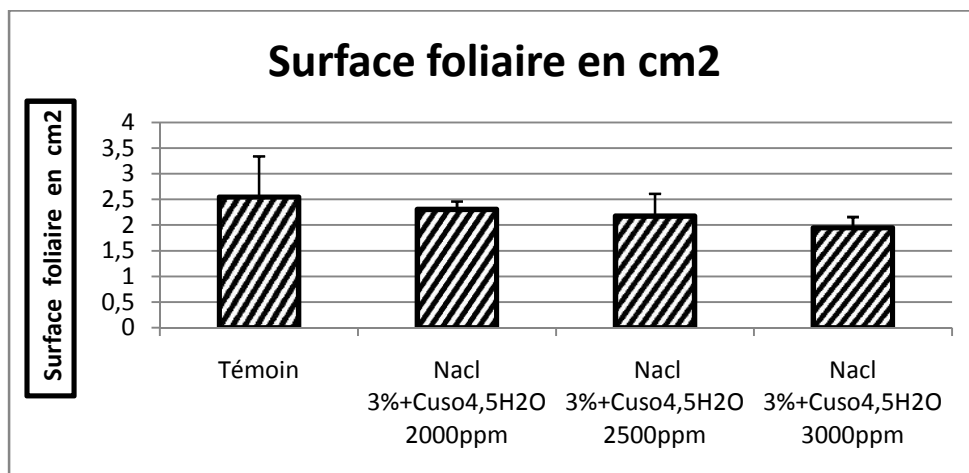
c-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000ppm)

Figure .03 - la surface foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000 ppm).

D'après les données du tableau (11) et la figure (03) les plantes stressées au traitement combiné de la solution saline et métallique (NaCl 3% +(CuSo₄.5H₂O) ,2000 ,2500,3000 ppm ,leur surface foliaire a diminué respectivement soit d'une moyenne de (2,31 / 2,18 / 1,95) cm².

Tableau 11 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la surface foliaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000,2500,3000 ppm).

Concentration	Témoins	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Surface foliaire	2,55±0,79	2,31±0,15 NS	2,18±0,43 NS	1,95±0,21 NS

❖ **Etude Statistique (surface foliaire) :** (Annexe)

l'étude statistique du Test -T (student) pour échantillons appariés établie par le logiciel **SPSS V 20** ,montre que les différences de moyennes ne sont pas significative dans la majorité des paires d'échantillons testés au dosage avec (p > 0,05) .

les résultats statistiques ont révélé que l'échantillon des plantes mis au différente concentration de stress salin et métallique avait une très faible corrélation (Corrélation de Pearson est de 0,113).

I-2 la longueur des tiges :

a - Sous traitement de NaCl et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) :

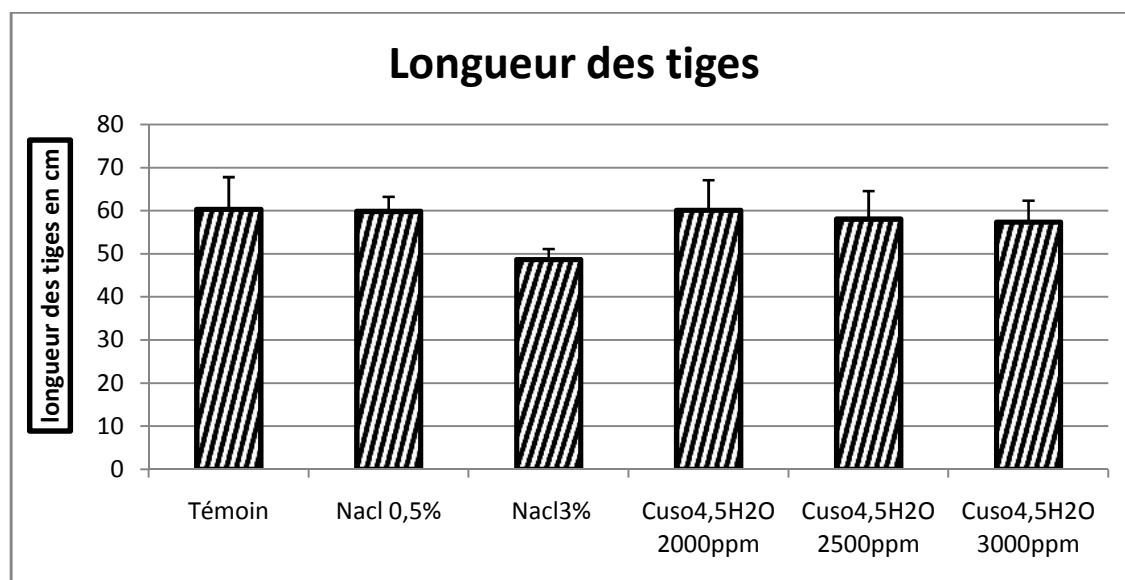


Figure .04 - la longueur des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 2000, 2500,3000 ppm).

On note d'après le tableau 12 et la figure (04) , la longueur des tiges des plantes mis au traitement salin (NaCl0,5%) est de 59,83 cm et pour le traitement métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:2000et2500ppm) est de (60,12/58,08cm) respectueusement par rapport aux plantes témoins ,par contre la moyenne de la longueur des tiges sous traitementNaCl3% et de (58,08cm) ,et sous traitement métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$;3000ppm) est de 57,36cm ,est nettement inférieure à celle des plantes témoins, ce qui résulte que les plantes ont été influencé par ce niveau de stress .

Tableau 12 –Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la longueur des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2500ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 3000ppm
Longueur des tiges	60,33±7,48	59,83±3,39 NS	48,67±2,43 NS	60,12±6,50 NS	58,08±6,50 NS	57,36±4,97 NS

b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm :

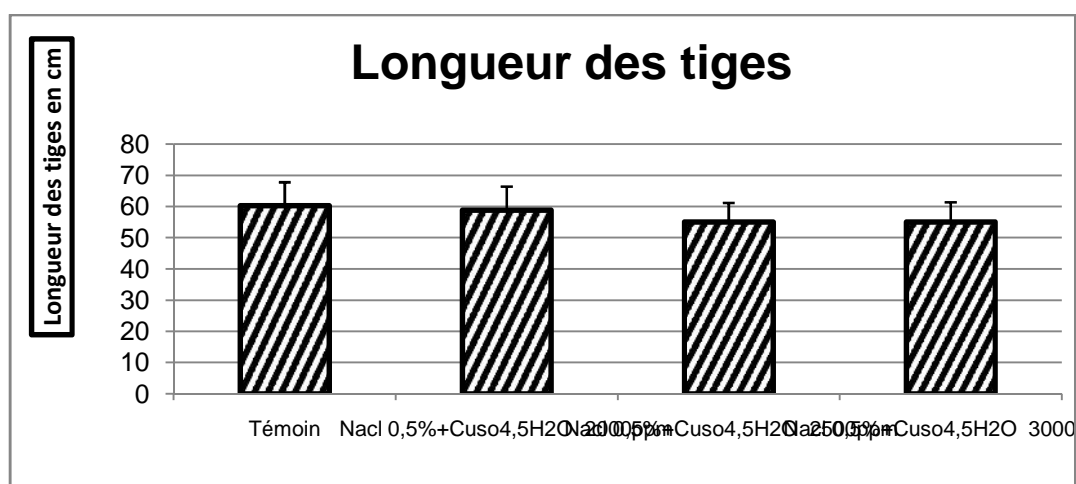


Figure .05- la longueur des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Les longueur des tiges sous traitement combiné de NaCl0.5% avec la sulfate de cuivre 2000et 2500(figure 05) sont légèrement inférieure à ceux des plantes témoin(59.83, ce qui résulte que les plantes ont été influencé par ce niveau de stress

Tableau 13 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la longueur des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%+ (Cuso ₄ 5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 0,5%+ (Cuso ₄ 5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 0,5%+ (Cuso ₄ 5H ₂ O) 2500ppm
Longueur des tiges	60,33±7,48	58,87±7,57 NS	55,12±6,11 NS	55,08±6,33 NS

c-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm :

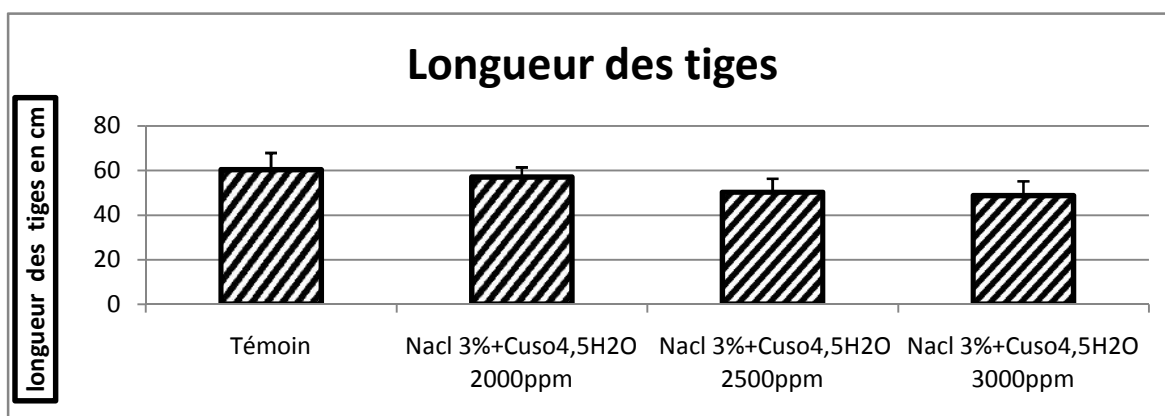


Figure .06- la longueur des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000 ppm).

la longueur des tiges des plantes sous traitement salin (NaCl3%) combiné avec le traitement métallique (CuSo₄ .5H₂O) 2000,2500ppm) qui de (57,04et 50,25cm)est proche de celle des plantes témoins ,par contre la moyenne de la longueur des tiges sous traitement salin (NaCl 3%) et métallique 3000ppm qui est de55,08cm à celle des plantes témoins(60,33 ce qui résulte que les plantes ont été influencé par ce niveau de stress

Tableau 14 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la longueur des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000,2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 3%+ (Cuso ₄ 5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 3%+ (Cuso ₄ 5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 3%+ (Cuso ₄ 5H ₂ O) 2500ppm
Longueur des tiges	60,33±7,48	57,04±4,32 NS	50,25±6 S	48,75±6,39 S

❖ **Etude Statistique de la longueur des tiges) : (Annexe)**

l'étude statistique du Test -T (student) avec (p 0,05) pour échantillons appariés établie par le logiciel (SPSS 20) qui montre que les différences de moyennes ne sont significative dans la majorité des paires d'échantillons testés au dosage

les résultats statistiques ont révélé que l'échantillon des plantes mis au différente concentration stress salin et métallique avait une faible corrélation négative (Corrélation de Pearson est de -0,176).

I-3 Volume racinaire

a - Sous traitement de NaCl et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

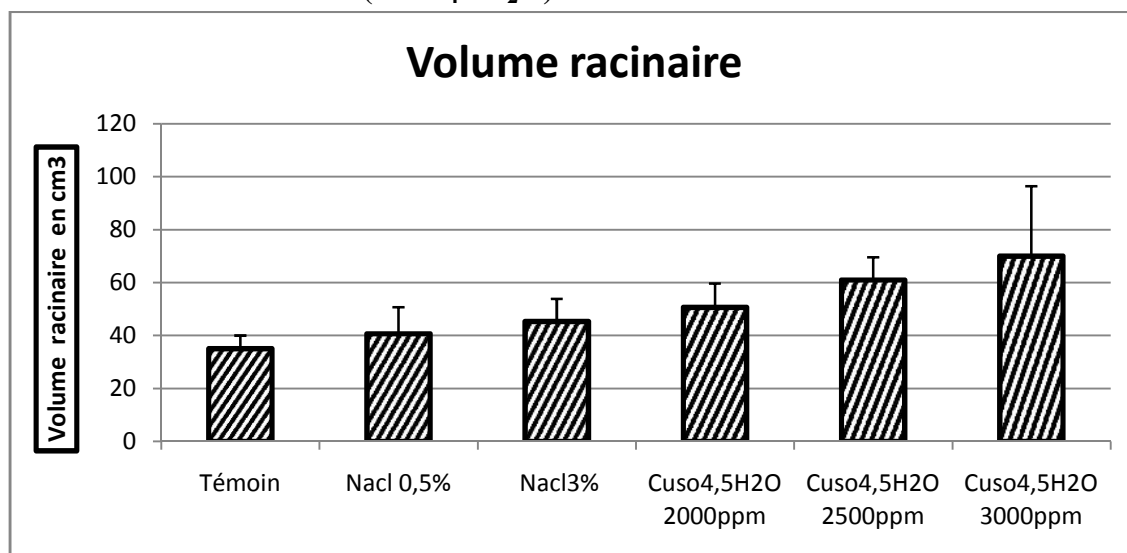


Figure .07– le volume racinaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 2000, 2500,3000 ppm).

le volume racinaire des plantes sous traitement salin (NaCl 0,5% et 3%) a augmenté soit d'une moyenne respective de (40,67. 45,33) cm^3 , en comparant avec les plantes sous solution métallique on a observé une augmentation, soit d'une moyenne(50 .67,61.70) cm^3 , alors que le volume racinaire des plantes témoins était de 35 cm^3 .

Tableau 15 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de volume racinaire des tiges des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 250 0ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 3000ppm
Volume racinaire	35±5	40,67±10,07 NS	45,33±8,50 NS	50,67±9,02 S	61±8,54 S	70±26,46 S

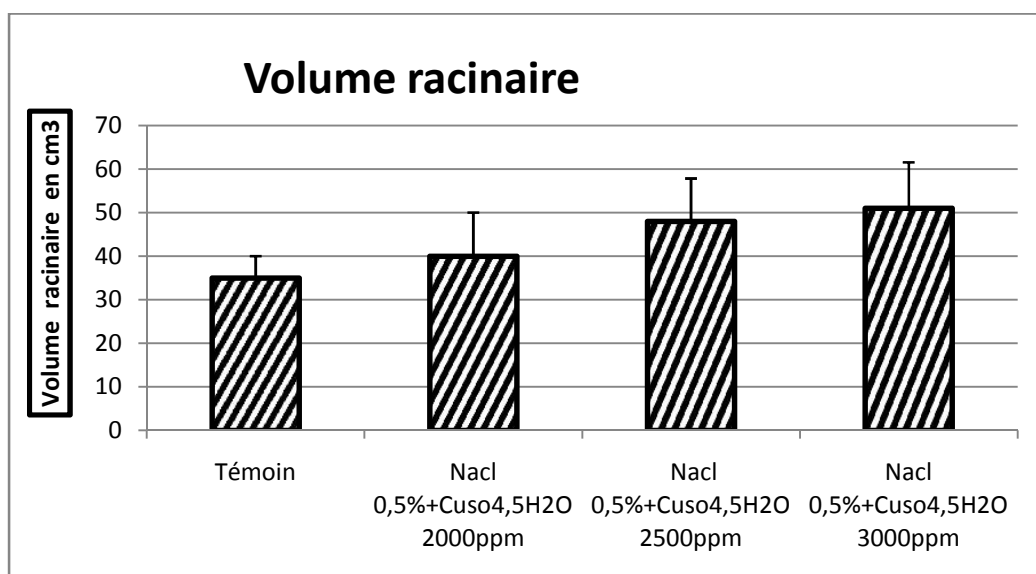
b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm :

Figure .08 – le volume racinaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm.

Les valeurs du volume racinaire chez les plantes stressées par l'effet combiné de (NaCl0,5%+ (Cuso₄ .H₂O) à 2000,2500 et3000 montrent une augmentation de (40,48,51cm³) par rapport aux plantes témoins .

Tableau 16–Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de volume racinaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoins	NaCl0,5%+ (Cuso ₄ .H ₂ O) 2000ppm	NaCl0,5%+ (Cuso ₄ .H ₂ O) 2500ppm	NaCl0,5%+ (Cuso ₄ .H ₂ O) 3000ppm
Volume racinaire	35±5,00	40±10,00 NS	48±9,85 NS	51±10,54 NS

c-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm :

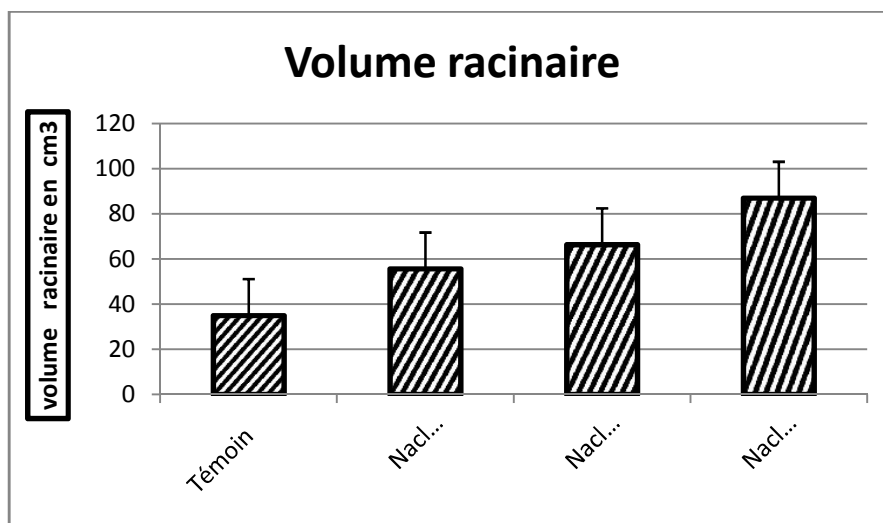


Figure .09 – le volume racinaire des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

D'après le tableau 14 et la figure (09), le volume racinaire des plantes mis au traitement combiné (Nacl 3%+ (CuSO₄ .5H₂O : 2000,2500 et3000ppm) a augmenté soit d'une moyenne respective (55,67 . 66,33. 87) cm³, comparés avec celui des plantes témoins qui est d'une moyenne de 35 cm³ .

De ce qui précède on a remarqué clairement que le volume racinaire des plantes stressés évolue relativement positif avec l'augmentation de la concentration du traitement salin ; métallique; où combiné.

Tableau 17–Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de volume racinaire des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm.

Concentration	Témoin	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .H ₂ O) 2000ppm	NaCl3%+ (CuSo ₄ .H ₂ O) 2500ppm	NaCl3%+ (CuSo ₄ .H ₂ O) 3000ppm
Volume racinaire	35±5,00	55,67±8,08 S	66,33±14,01 S	87±16,09 S

❖ **Etude Statistique du volume racinaire) :** (Annexe)

l'étude statistique du Test -T (student) pour échantillons appariés établie par le logiciel (SPSS V 20), montre que les différences de moyennes ne sont significative dans la majorité des paires d'échantillons testés au dosage avec ($p > 0,05$).

les résultats statistiques ont révélé que l'échantillon des plantes mis au différente concentration de stress salin et métallique avait une corrélation moyenne (Corrélation de Pearson est de 0,558).

II - Paramètres biochimiques

II.1- Le chlorophylle a :

a - Sous traitement de NaCl et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) :

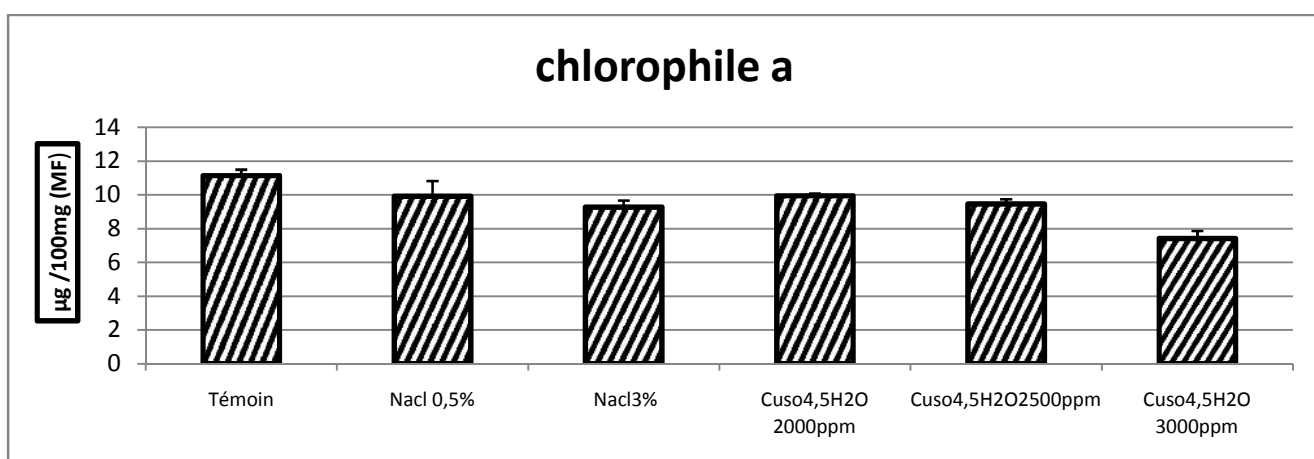


Figure .10 – le chlorophylle a des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 2000, 2500,3000 ppm).

Les résultats obtenus montre que le chlorophylle a dans les plantes stressés a la salinité et le cuivre diminue tout en augmentant la concentration des traitements ,il passe d'une moyenne de 9,91 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ pour NaCl 0,5% à 9,27 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ pour NaCl 3% on comparaison par les témoins ,ce qui concerne les plantes arrosées par le sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000,2500 et 3000 ppm les valeurs de chlorophylle montrent une légère démunissions de 9,94 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ a 7,41 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ pour ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 3000 ppm , et comparé avec celui des plantes témoins qui est de 11,13 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$.

Tableau 18 –Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) du chlorophylle a des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2500ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 3000ppm
chlorophylle a	11,13±0,35	9,91±0,90 S	9,27±0,39 HS	9,94±0,13 HS	9,45±0,28 HS	7,41±0,44 HS

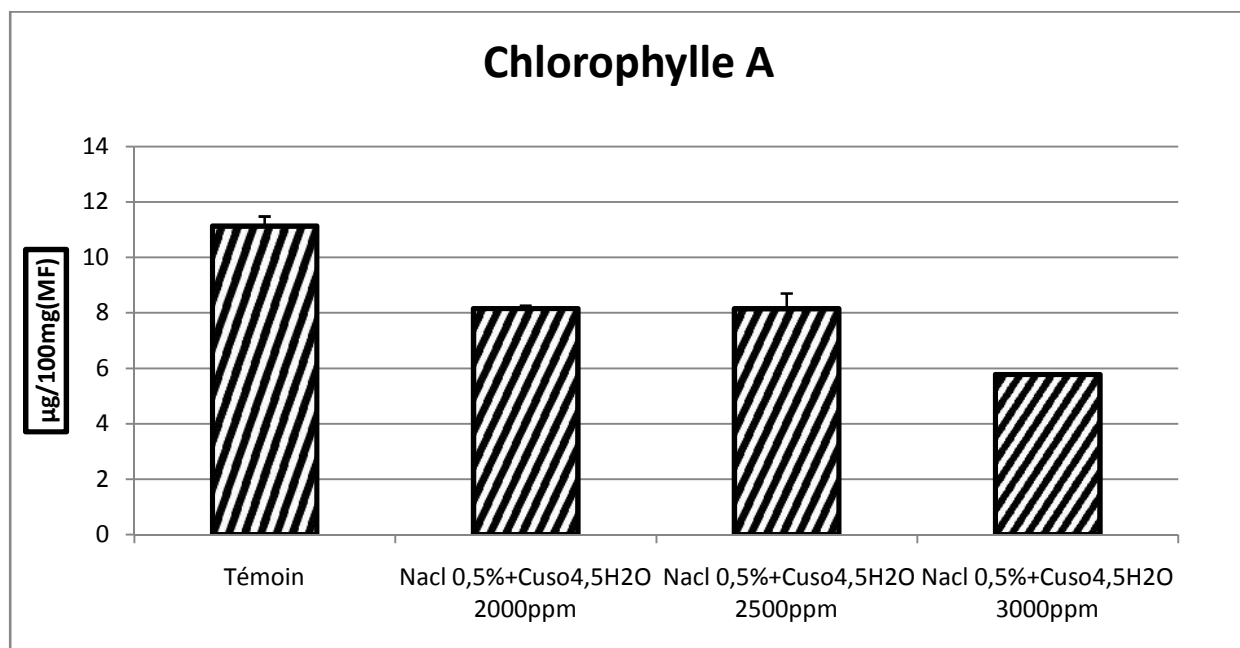
b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm :


Figure .11 – le chlorophylle a des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm) .

d'après les résultats obtenus, le chlorophylle a des plantes mises au stress salin combiné avec la sulfate de cuivre diminue avec l'augmentation de la concentration des traitements, il passe d'une moyenne de 8,16µg/100mg(M.F) pour NaCl (0,5%)+ (CuSo₄.5H₂O) 2000ppm à 8,15µg/100mg(M.F) pour NaCl(0,5%)+CuSo₄.5H₂O) et une faible diminution 578, µg/100mg(M.F) (M.F) en comparant a celui des plantes témoins qui est de,11,13 µg/100mg(M.F) .

Tableau 19 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle a des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%+CuSo ₄ 2000ppm	NaCl 0,5%+CuSo ₄ 2500ppm	NaCl 0,5%+CuSo ₄ 3000ppm
Chlorophylle a	11,13±0,35	8,16±0,10 HS	8,15±0,55 HS	5,78±0,05 HS

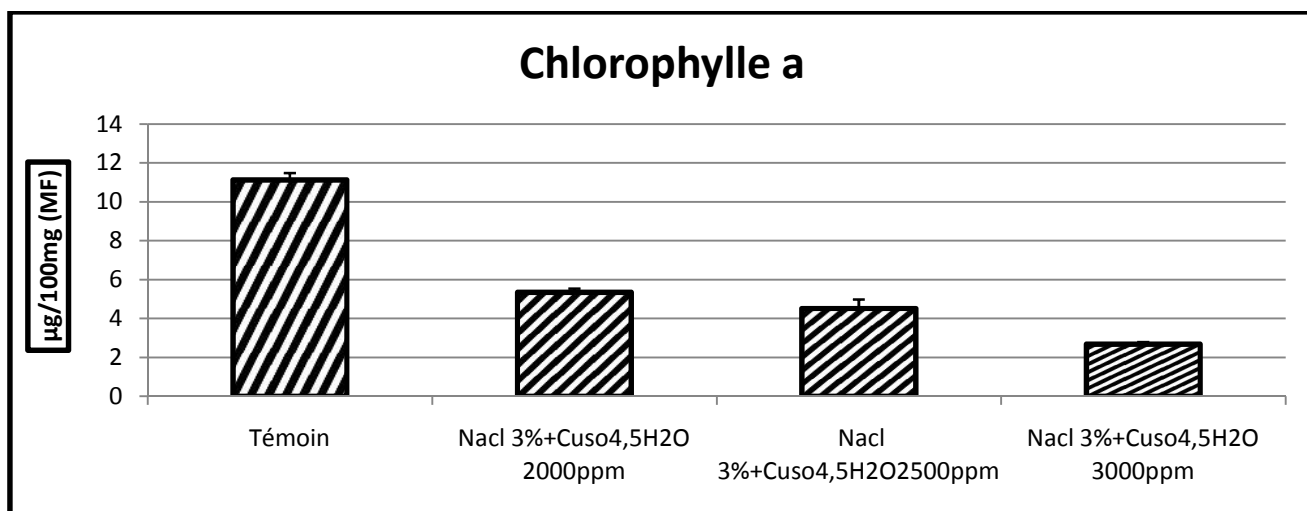
C-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm :


Figure .12 – le chlorophylle a des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm .

Les résultats obtenus de chlorophylle a chez plantes stressées mises au traitement combiné (NaCl3% + (CuSo₄ .5H₂O) 2000,2500et 3000ppm diminue avec l' augmentation de la concentration des traitements, il passe d'une moyenne de 11,13 µg/100mg(M.F) à 5,35 µg/100mg(M.F) à 4,52 µg/100mg(M.F) à 2,68 µg/100mg(M.F) par aux plantes non traitées .

Tableau20 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle a des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm.

Concentration	Témoin	NaCl3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Chlorophylle a	11,13±0,35	5,35±0,19 HS	4,52±0,46 HS	2,68±0,11 HS

❖ **Etude Statistique du chlorophylle a :** (Annexe)

l'étude statistique du Test -T (student) pour échantillons appariés établie par le logiciel SPSS V 20 , montre que les différences de moyennes sont hautement significatives dans la majorité des paires d'échantillons testés au dosage avec (p = 0,05) .

le coefficient de corrélation de Pearson est de - 0,939, ce qui résulte une très forte corrélation inverse entre le stress appliqué et la concentration du chlorophylle a

II.2 Le chlorophylle b :

a - Sous traitement de NaCl et ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) :

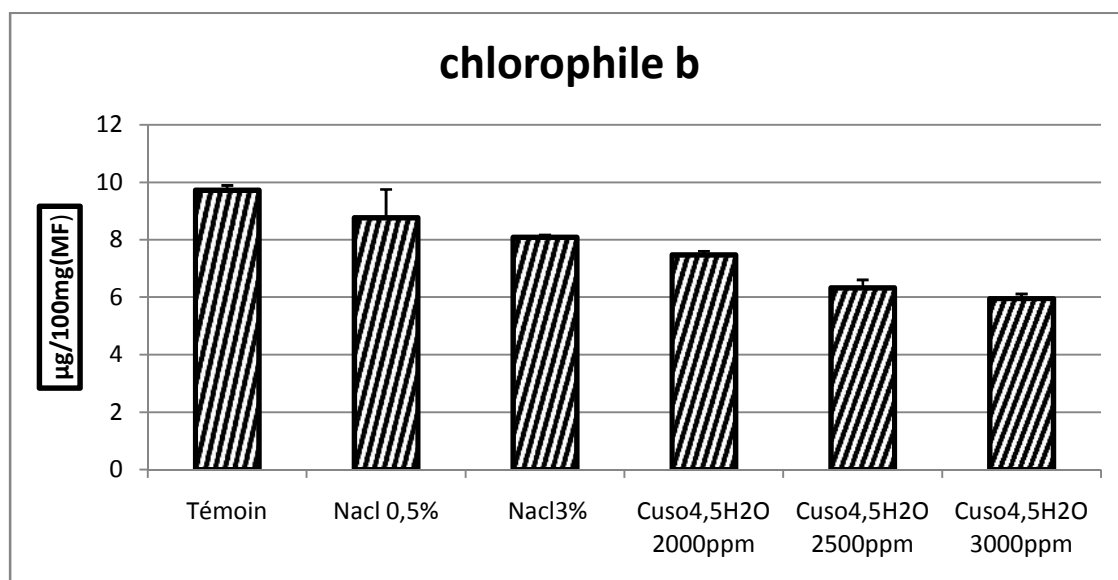


Figure 13 – le chlorophylle b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 2000, 2500,3000 ppm).

D'après les résultats obtenus, le chlorophylle "b" des plantes mises au stress salin et métallique diminue en augmentant la concentration des traitements, il passe d'une moyenne de 8,76 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ dans la dose de Nacl0,5% à 8,08 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ pour la dose NaCl 3%, et de 7,47 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ dans le traitement sulfate de cuivre (2000ppm) à 6,32 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$ pour (2500 ppm) à 5,95 $\mu\text{g}/100\text{mg}$ en comparant avec les plantes témoins de 9,72 $\mu\text{g}/100\text{mg}(\text{M.F})$.

Tableau 21 –Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) du chlorophylle b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	Nacl 0,5%	Nacl3%	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2500ppm	($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 3000ppm
chlorophylle b	9,72±0,17	8,76±0,99 NS	8,08±0,08 HS	7,47±0,13 HS	6,32±0,28 HS	5,95±0,16 HS

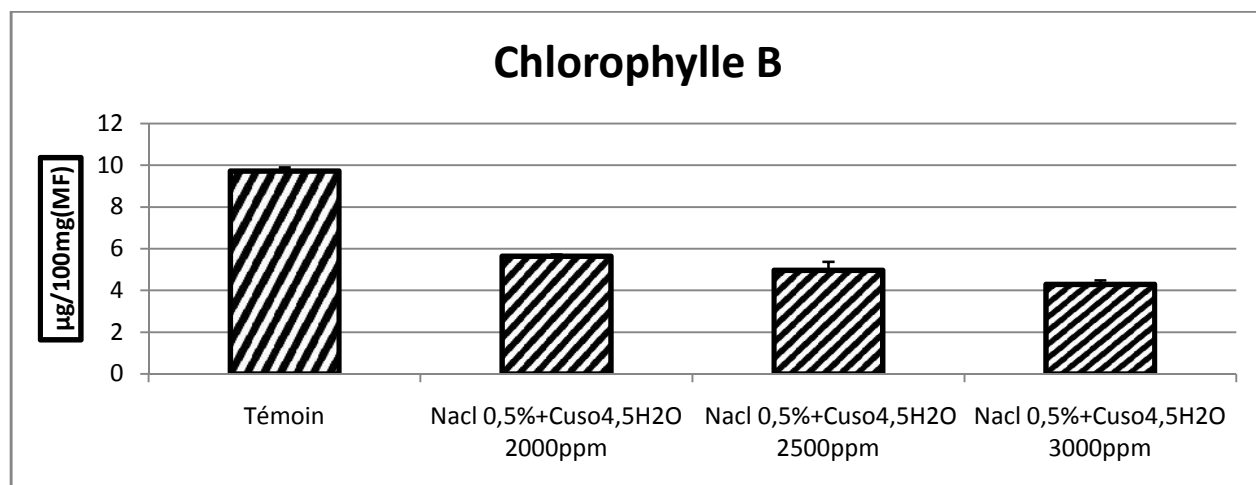
b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000ppm) :

Figure .14 – le chlorophylle b des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm) .

D'après les résultats obtenus le chlorophylle "b" des plantes mises au stress salin et métallique combinés (NaCl 0,5%+CuSo₄.5H₂O) diminue en augmentant la concentration des traitements ,il passe d'une moyenne de 5,64 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5%+CuSo₄ 2000ppm) ; de 4,97 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5%+CuSo₄ 2500ppm) à 4,29 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5%+CuSo₄ 3000ppm) , et comparé avec celui des plantes témoins qui est de 9,72 µg/100mg(M.F).

Tableau 22 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0.5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 0.5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 0.5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Chlorophylle b	9,72±0,17	5,64±0,08 HS	4,97±0,40 HS	4,29±0,19 HS

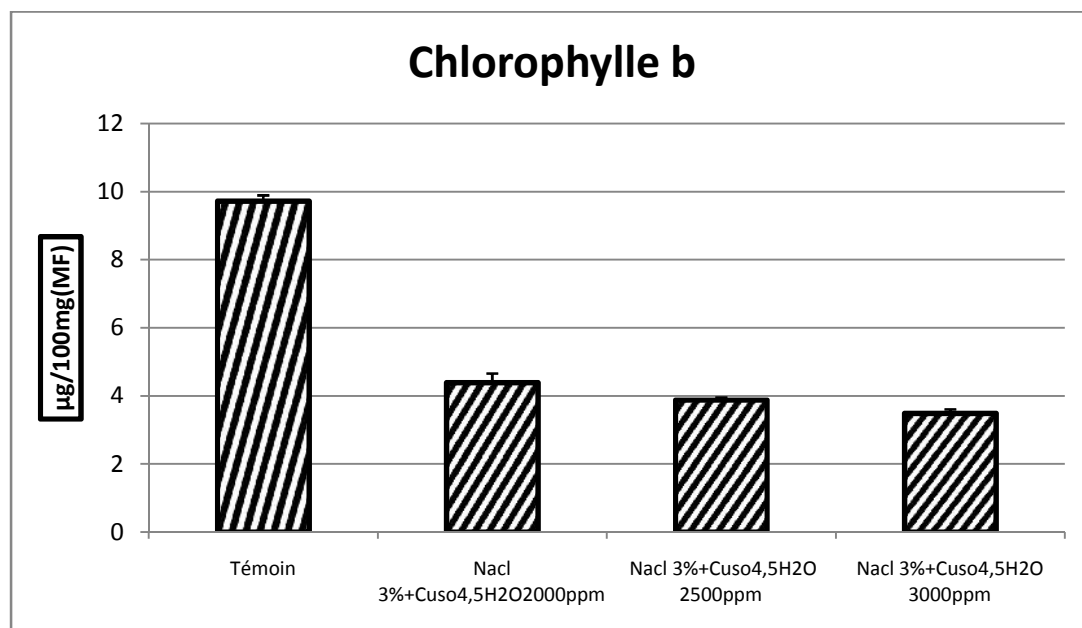
C-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm :

Figure .15 – le chlorophylle b des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000 ppm).

D'après les résultats obtenus, le chlorophylle "b" des plantes stressées au NaCl et le cuivre, on a remarqué une diminution respective en augmentant la concentration des traitements, il passe d'une moyenne de 4,39µg/100mg(M.F) pour NaCl 3%+CuSo₄.5H₂O(2000ppm) à 3,88 µg/100mg(M.F)et pour NaCl 3%,+CuSO₄.5H₂O(2500ppm) est 3,49, µg/100mg(M.F) et on comparant avec les plantes sous traitement nutritif qui est de 9,72 µg/100mg(M.F).

Tableau 23 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm

Concentration	Témoin	NaCl 3%+ (CuSO ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 3%+ (CuSO ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 3%+ (CuSO ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Chlorophylle b	9,72±0,17	4,39±0,27 HS	3,88±0,07 HS	3,49±0,12 HS

II.3 -Le chlorophylle a+b :

a - Sous traitement de NaCl et (CuSO₄.5H₂O) :

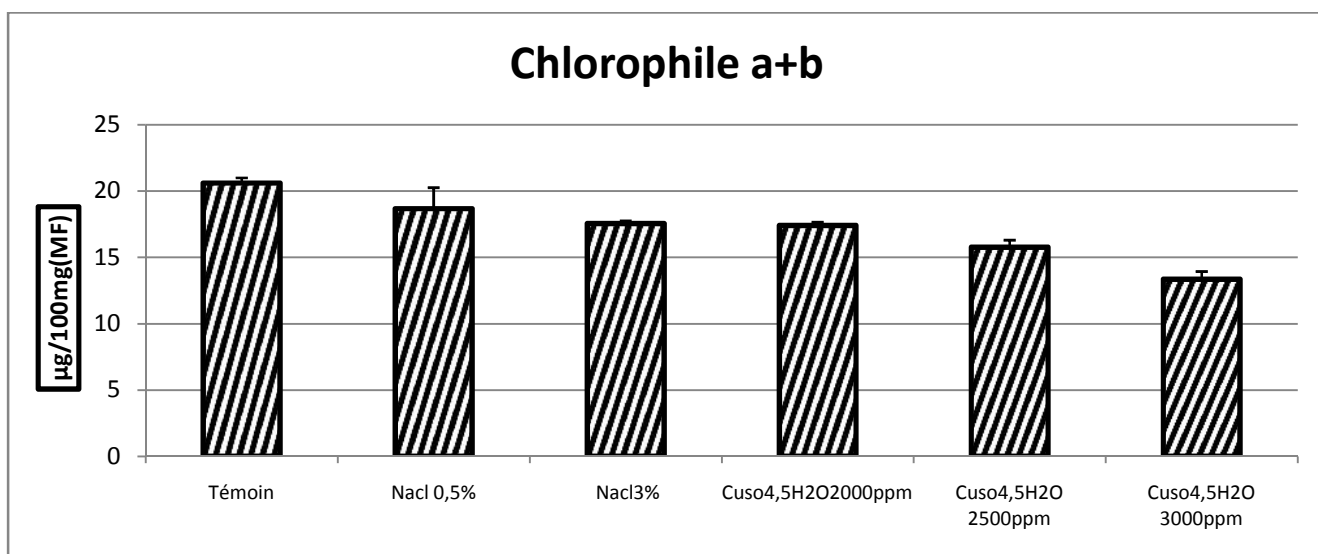


Figure .16 – le chlorophylle a+ b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique (CuSO₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Le traitement des plante au NaCl (0.5% ,3%) montre une grande déférence dans les valeur de concentration de chlorophylle "a+b" on comparaison avec les plante témoin , il passe d'une moyenne de 18,67 µg/100mg(M.F) pour NaCl 0,5% à 17,55 µg/100mg(M.F) pour NaCl 3%, et de 17,4 µg/100mg(M.F).a se qui concerne le traitement métallique les valeurs de concentration de chlorophylle "a+b" diminues de 13,35 µg/100mg(M.F) pour (CuSO₄.5H₂O) 3000 ppm **Tableau 24** –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) du chlorophylle a+ b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique (CuSO₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl3%	(Cuso ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	(Cuso ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	(Cuso ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Chlorophylle a+b	20,60±0,38	18,67±1,58 NS	17,55±0,19 HS	17,4±0,26 HS	15,76±0,53 HS	13,35±0,58 HS

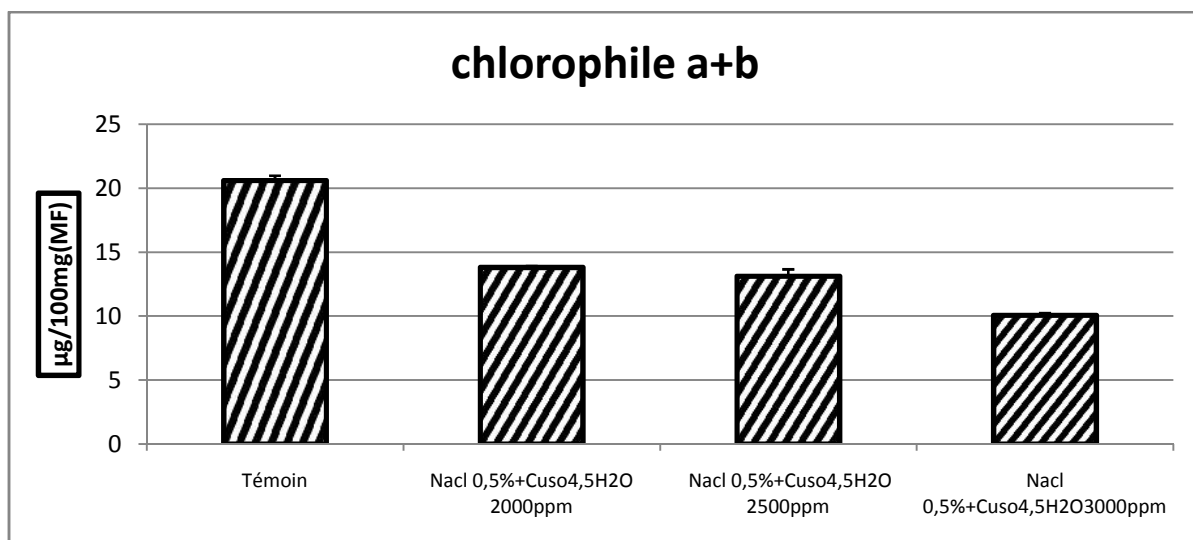
b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000ppm)

Figure .17 – le chlorophylle a+b des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm

Dans les feuilles, nous constatons que la teneur de chlorophylle a+b est moins élevée lorsque les plantes sont stressées à solution combiné, avec un taux de l'ordre de 13.81 µg/100mg(M.F) contre 20.6 µg/100mg(M.F) pour les plantes non traitées, et 13.12 µg/100mg(M.F) pour les plantes nourries à solution NaCl 0,5%+Cuso4 2500ppm et 10.07 µg/100mg(M.F) pour NaCl 0,5%+CuSo4 3000ppm

Tableau 25 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle a+b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm

Concentration	Témoin	NaCl0,5%+(Cuso ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl0,5%+(Cuso ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl0,5%+(Cuso ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Chlorophylle a+b	20,60±0,38	13,81±0,12 HS	13,12±0,54 HS	10,07±0,18 HS

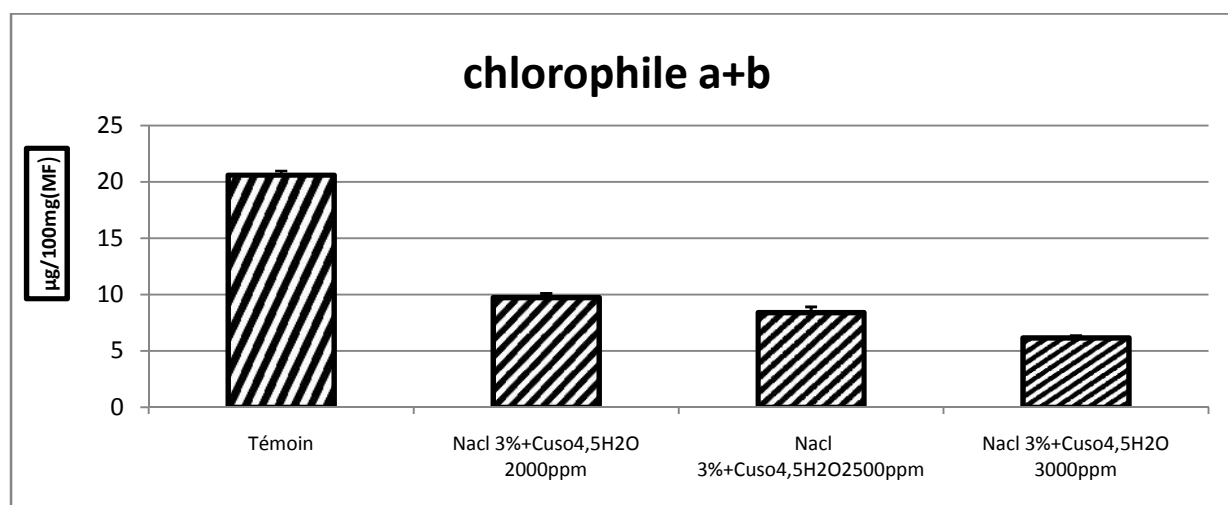
c-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSO₄.5H₂O: 2000, 2500,3000ppm)

Figure .18 – le chlorophylle a+b des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSO₄.5H₂O) 2000, 2500,3000 ppm

D'après le tableau (26) et la figure (18) , le chlorophylle "a+b" des plantes mis au stress salin et métallique diminue en augmentant la concentration des traitements soit ,il passe d'une moyenne de 18,67 µg/100mg(M.F) pour NaCl0,5% à 17,55 µg/100mg(M.F) pour NaCl 3%, et de 17,4 µg/100mg(M.F) pour CuSo4 2000 ppm à 13,35 µg/100mg(M.F) pour CuSo4 3000 ppm et comparé avec celui des plantes témoins qui est de 9,72 µg/100mg(M.F),

Tableau 26–Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de Chlorophylle a+b des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSO₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 3%+ CuSo4 2000ppm	NaCl3%+ CuSo4 2500ppm	NaCl 3%+ CuSo4 3000ppm
Chlorophylle a+b	20,60±0,38	9,75±0,36 HS	8,4±0,52 HS	6,17±0,21 HS

❖ **Etude Statistique (Chlorophylle a+b) (Annexe)**

la moyenne des plantes stressées au seuil de signification de 5%(0,05) l'étude statistique du Test -T (student) pour échantillons appariés établie par le logiciel SPSS 20 , montre que les différences de moyennes sont hautement significative dans la majorité des paires d'échantillons testés au dosage avec (p < 0,05)

le coefficient de corrélation de Pearson est de - 0,981 , ce qui résulte une très forte corrélation inverse entre le stress appliqué et concentration du chlorophylle a+b .

II.4 La proline :

a - Sous traitement de NaCl et (CuSo₄.5H₂O)

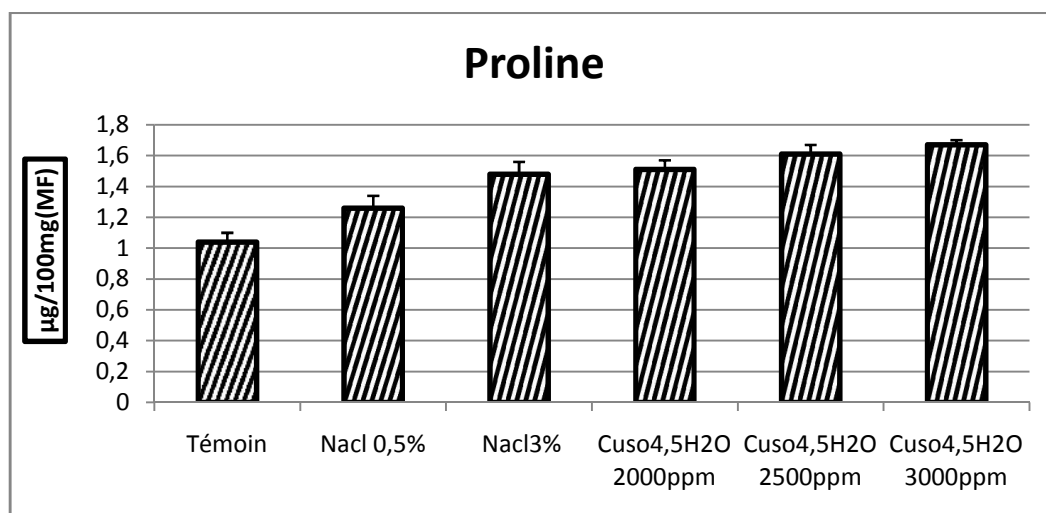


Figure .19– la teneur en proline des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Les résultats obtenus , mettent en évidence la augmentation de la teneur en proline chez les deux traitement sous les conditions de salinité et métallique , elle passe d'une moyenne de 1,26 µg/100mg(M.F) pour NaCl0,5% à 1,48 µg/100mg(M.F) pour NaCl 3%, et de 1,51 µg/100mg(M.F) pour (CuSo45H₂O) 2000 ppm ; et de 1,61 µg/100mg(M.F) pour (CuSo45H₂O) 2500 ppm ;à 1,67µg/100mg(M.F) pour (CuSo45H₂O) 3000 ppm et comparé avec celui des plantes témoins qui est de 1,04 µg/100mg(M.F).

Tableau 27 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en proline des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	(CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	(CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	(CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Proline (Moyenne)	1,04±0,06	1,26±0,08 S	1,48±0,08 HS	1,51±0,06 HS	1,61±0,06 HS	1,67±0,03 HS

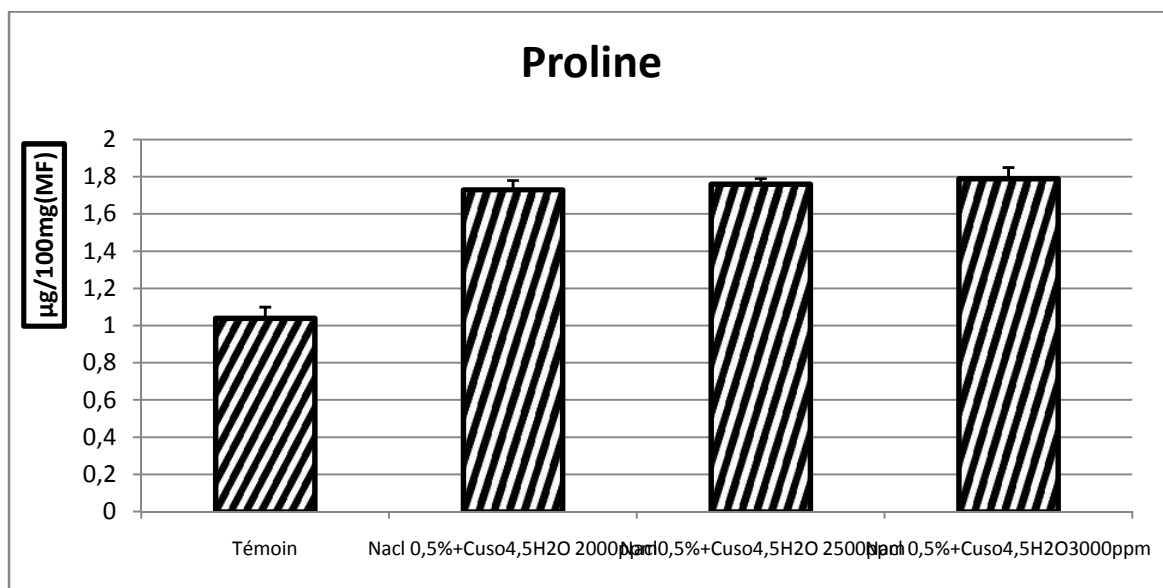
b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O) 2000, 2500,3000ppm

Figure .20 – la teneur en proline des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Selon la figures la concentration de proline chez les trois traitements combinés montre une augmentation très importante chez les plantes traités par les trois doses sous les deux types sels et métalliques , la moyenne de la proline des plantes mis au stress combiné ((NaCl0,5% + CuSo₄ :2000/2500/3000ppm) augmente en augmentant la concentration des traitements, elle passe d'une moyenne de 1,73 µg/100mg(M.F) pour NaCl0,5% + (CuSo₄ .5H₂O)2000ppm) à 1,76 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5% + (CuSo₄ .5H₂O)2500ppm) et de 1,79 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5% + (CuSo₄ .5H₂O) 3000ppm comparé avec celui des plantes témoins qui est de 1,04 µg/100mg(M.F).

Tableau 28 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en proline des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl0, 5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl0, 5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl0, 5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Proline (Moyenne)	1,04±0,06	1,73±0,05 HS	1,76±0,03 HS	1,79±0,06 HS

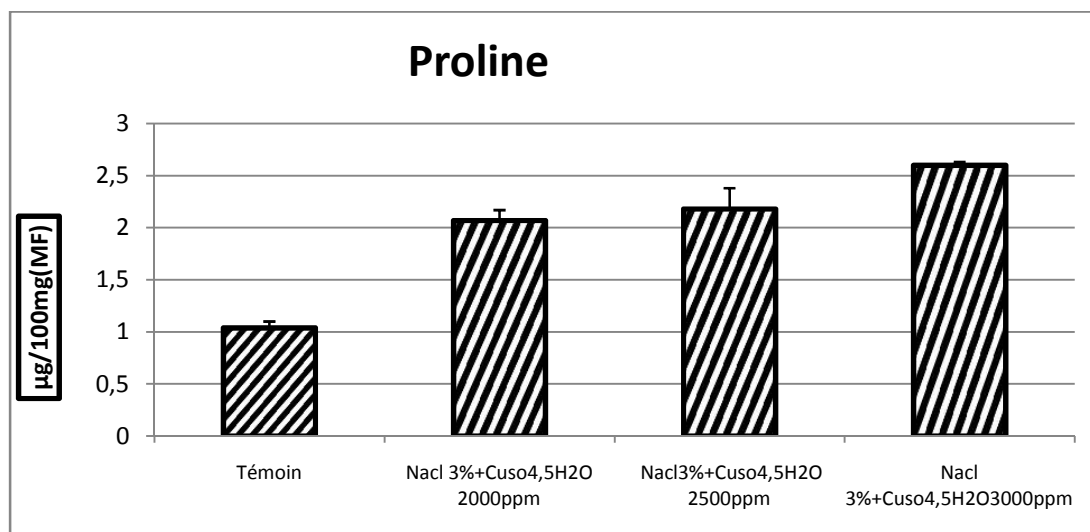
C-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000ppm) :

Figure .21- la teneur en proline des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Selon cet histogramme, il se pourrait que le stress combiné salin et métallique induise une augmentation de proline, la moyenne de la proline des plantes mis au stress combiné ((NaCl3% + CuSo₄ :2000/2500/3000ppm) augmente en augmentant la concentration des traitements, elle passe d'une moyenne de 2,07 µg/100mg(M.F) pour (NaCl3% + (CuSo₄ .5H₂O) 2000ppm) à 2,18 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5% + (CuSo₄ .5H₂O) 2500ppm) et de 2,6 µg/100mg(M.F) pour (NaCl3% + (CuSo₄ .5H₂O) 3000ppm) comparé avec celui des plantes témoins qui est de 1,04 µg/100mg(M.F).

Tableau 29 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en proline des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Proline (Moyenne)	1,04±0,06	2,07±0,10 HS	2,18±0,20 HS	2,60±0,03 HS

❖ Etude statistique Proline (Annexe)

l'étude statistique du Test -T (student) pour échantillons appariés établie par le logiciel (**SPSS V20**) montre que les différences de moyennes sont hautement significatives dans la majorité des paires d'échantillons testés au dosage avec ($p < 0,05$).

le coefficient de corrélation de Pearson est de 0,941, ce qui résulte une très forte corrélation positif entre le stress appliqué et la teneur en proline.

II.5 Le sucre soluble :

a - Sous traitement de NaCl et (CuSo₄.5H₂O)

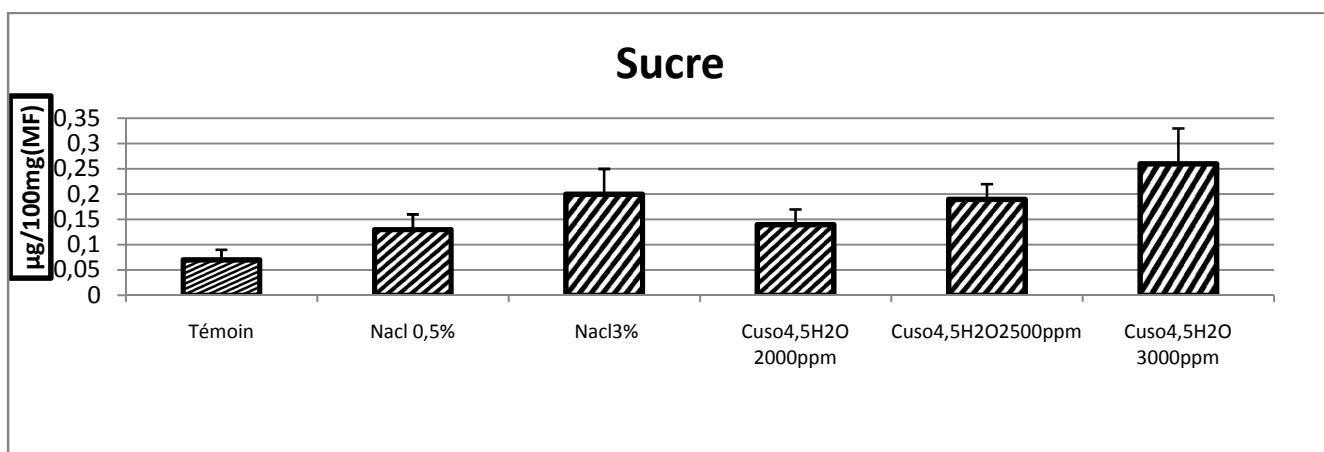


Figure .22– la teneur en sucre soluble des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Nos résultats mettent en évidence l'augmentation de la teneur en sucres solubles chez les traité par la solution saline et métallique. Son accumulation, varie en fonction du doses du traitement .En effet , la teneur en sucre la plus importante est enregistrée surtout chez les plantes arrosées par (CuSo₄.5H₂O)3000ppm .

Tableau 30 –Test statistiques de signification de Test de student ($p=0.05$) de la teneur en sucre soluble des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5%,3%et métallique (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	(CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	(CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	(CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Sucre (Moyenne)	0,07±0,02	0,13±0,03 S	0,20±0,05 S	0,14±0,03 S	0,19±0,03 HS	0,26±0,07 HS

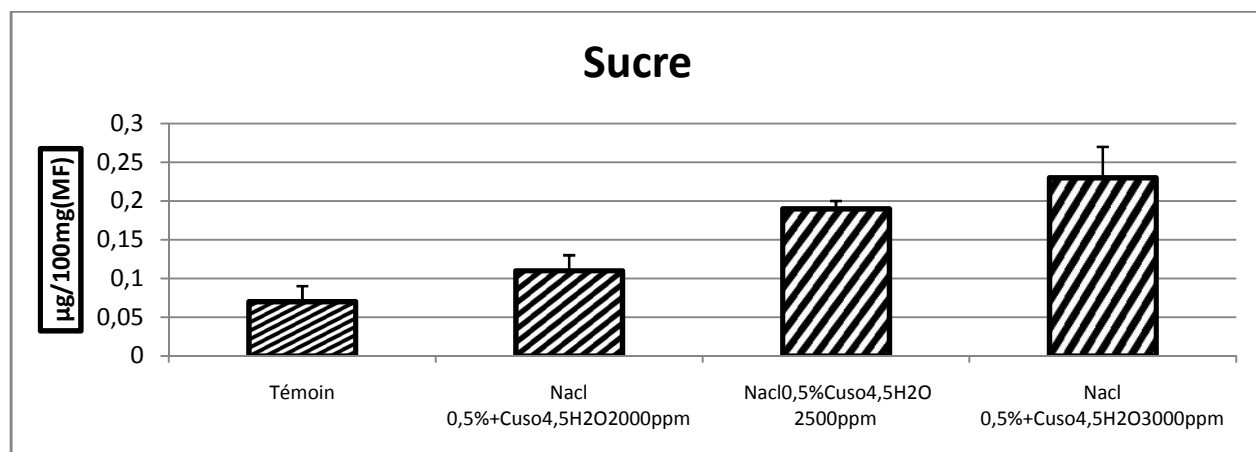
b-Sous traitement combiné de NaCl 0.5%et (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000ppm)

Figure .23-la teneur en sucre soluble des plante *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

D'après le tableau (31) et la figure (23) ,la moyenne du sucre soluble des plantes mis au stress combiné ((NaCl0,5% + (CuSo₄ .5H₂O):2000 ,2500et3000ppm augmente en augmentant la concentration des traitements, elle passe d'une moyenne de 0,11 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5% + (CuSo₄ .5H₂O)2000ppm) à 0,19 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5% + (CuSo₄ .5H₂O) 2500ppm) et de 0,23 µg/100mg(M.F) pour (NaCl0,5% (CuSo₄ .5H₂O) 3000ppm) comparé avec celui des plantes témoins qui est de 0,07 µg/100mg(M.F), et avec des légers écart type pour l'ensemble des échantillons .

Tableau 31 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en sucre soluble des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 0.5% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 0, 5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 0, 5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 0, 5%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Sucre (Moyenne)	0,07±0,02	0,11±0,02 S	0,19±0,01 HS	0,23±0,04 HS

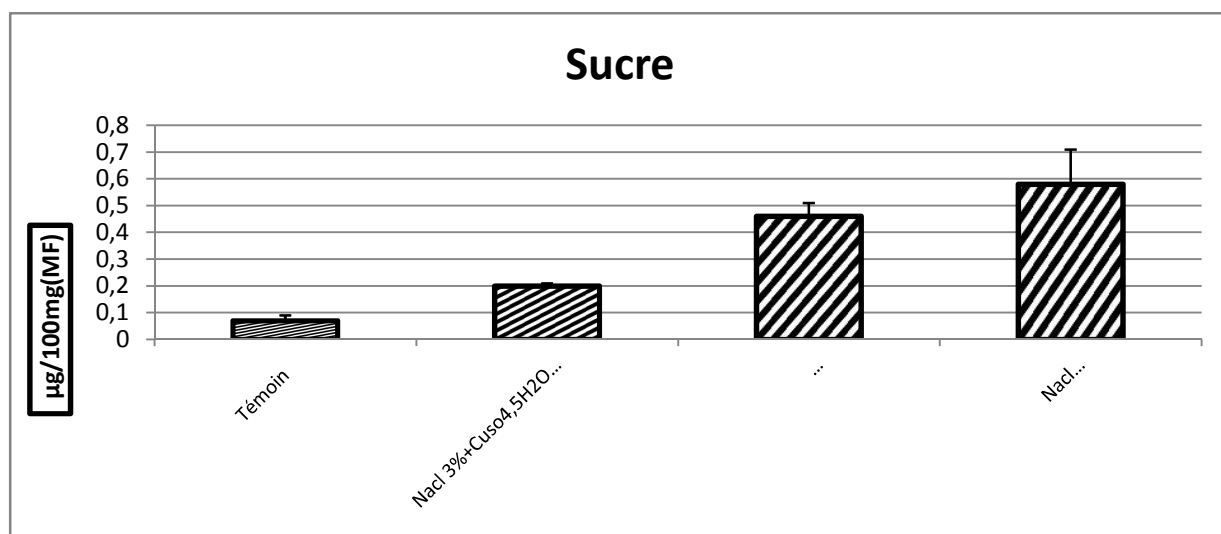
c-Sous traitement combiné de NaCl 3%et (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000ppm)

Figure .24- la teneur en sucre soluble des plantes *Atriplex canescens* (Pursh -Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O:2000, 2500,3000 ppm).

Selon nos résultats, il se pourrait que le stress combiné (sel –cuivre) induit une accumulation de sucre et cette accumulation s'accroît avec l'augmentation de la dose appliquée. Cette observation est plus importante chez traité par la solution NaCl 3%+ (CuSo₄.5H₂O) 2500ppm et NaCl 3% +(CuSo₄.5H₂O) 2500ppm .

Tableau 32 –Test statistiques de signification de Test de student (p=0.05) de la teneur en sucre soluble des plantes *Atriplex canescens* (Pursh Nutt) mesuré après stress salin au NaCl 3% combiné avec la sulfate de cuivre (CuSo₄.5H₂O: 2000, 2500,3000 ppm).

Concentration	Témoin	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2000ppm	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 2500ppm	NaCl 3%+ (CuSo ₄ .5H ₂ O) 3000ppm
Sucre (Moyenne)	0,07±0,02	0,20±0,01 HS	0,46±0,05 HS	0,58±0,13 HS

Etude statistique Sucre soluble (Annexe)

- ❖ l'étude statistique du Test -T (student) pour échantillons appariés établie par le logiciel (SPSSV 20), montre que les différences de moyennes sont hautement significative dans la majorité des paires d'échantillons testés au dosage avec (p = 0,05) .. Le coefficient de corrélation de Pearson est de 0,662, ce qui résulte une moyenne corrélation positive entre le stress appliqué et la teneur en sucres solubles .

Conclusion et discussions :

Au terme de notre travail qui a visé l'étude de la tolérance de l'*Atriplex canescens* pursh nutt au stress métallique dans un milieu salin en appliquant de deux différents sels NaCl et (CuSO₄.5.H₂O) séparés et combinés dans le but de déterminer l'effet de deux stress sur les paramètres biométriques (surface foliaire, volume racinaire, surface foliaire et la longueur des tiges) et les paramètres biochimiques (concentration du chlorophylle, détermination de la proline et sucre soluble).

Il ressort que cet espèce répond différemment aux différentes concentrations appliquées en fonction de la nature de stress, nous avons relevé à cet effet :

Pour les paramètres biométriques, la surface foliaire a une diminution légère, il a été constaté dans toutes les plantes stressées par les sels (NaCl et CuSO₄.5H₂O) séparés et combinés par rapport aux plantes témoins.

Des résultats similaires décrivent à l'échelle des feuilles la contrainte saline appliquée aux plantes entraîne une réduction de la surface foliaire, l'expliquent comme une réduction d'apport en glucides, ces résultats ont été observés chez plusieurs espèces dont trois cultivateurs de *Médicago Sativa* .L (Mezni et al ;2012), outre la réduction de la surface foliaire face à une contrainte salée a été considéré comme un processus d'adaptation à travers une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (Omani et al; 2006).

Les effets du stress salin sur la photosynthèse montrent que les échanges gazeux (transpiration et conductance stomatique) entre la plante et l'atmosphère diminuent les flux dans les plantes traitées, et également amplifiés par une diminution de la surface foliaire, ce qui va diminuer l'accumulation des sels dans les tissus, qui explique que la réduction de la photosynthèse n'est reliée seulement à l'étage foliaire mais aussi la réduction de la surface foliaire (Munns et al; 2000), qui explique que la plante perçoit alors la présence de forte concentration en sodium dans le sol et réoriente la croissance des racines (Tuleja ;2007) (Yu et al ;2011).

Les halophytes se traduisent toujours par les réductions de croissance, une revue récente montre que l'architecture du système racinaire est modifiée sous la contrainte saline, la réduction en surface foliaire est considérée comme une adaptation au stress salin chez les *amarantha* ssp (Omani et al; 2006)

Pour le volume racinaire on a remarqué une augmentation du volume racinaire dans la majorité des plantes stressées par les sels NaCl et (CuSO₄.5H₂O) dans différentes concentrations séparées et combinées par rapport aux plantes témoins .

Le volume occupé par les racines des plantes dans le sol revêtent une grande importance pour l'absorption de l'eau ,les racines acclimatés à des fortes concentration de sels présenterait alors une croissance différenciée (Omani et al; 2006).

Les résultat obtenus sur la longueur des tiges des plantes stressées par les sels séparés et combinés, la diminution de la longueur des tiges explique la diminution de la taille des cellules parenchymateuses. Nos résultats sont en accords avec ceux (Akram et al;2002) obtenus sur le blé soumis à une contrainte saline ,cet auteur révèle une diminution dans le parenchyme cortical et médullaire chez certaines plantes succulentes , la réaction est inversé ,la surface de parenchyme cortical et médullaire augmente face au stress salin , ce phénomène a été observé chez le Cyrodon dactylon .L .Pers (Hamdy et al ;1995).

De nombreux travaux signalent que les sels provoquent la modification du nombre diamètre des vaisseaux de xylème chez les halophytes (Levigneron et al; 1995) , d'autres résultats sur la tolérance à la salinité à plusieurs espèces a été étudié à travers leurs capacité de développement en présence du sel ; en effets la hauteur des tiges , son rapport respectif à la fin de l'expérience varie en fonction du niveau du stress salin . Les résultats ont montré que l'*Atriplex canescens* pursh nutt résiste au stress métallique (3000ppm de cuivre) en tolérant une concentration dans un milieu allant jusqu'a 30g (NaCl).

Plusieurs travaux ont montré le caractère halophyte des Chenopodiacées en particulier celle du genre *Atriplex canescens* , la croissance de la partie aérienne (tige) diminue avec l'intensité du stress (Rahmoune et al; 2008) .

Dans les paramètres biochimiques on a remarqué une diminution significative dans la concentration des pigments chlorophylliens (chlorophylle a ,b, a+b) dans les plantes stressées par rapport aux non traité .

Effectivement cet espèce présente des corrélation négatives significatives (annexe). Trois cultivars de *Lycopersian Sheesmanii* ont été étudié sous différent régime d'irrigation à l'eau saline , les teneurs en chlorophylle (a; b ;a+b) ont été réduite sous stress salin (Eliklil et al ;2002).

Nos résultats suggèrent que chez *Atriplex canescens* (pursh) Nutt la teneur en chlorophylle (a; b ; a +b) varie en fonction des traitements de NaCl , cet espèce tolérant une forte intensité de stress salin en élaborant normalement l'activité photosynthétique et la production de la matière organique , effectivement des corrélations négatives significatives existent (Annexe), ,des plantes d'*Atriplex portulacoides* ont été soumises à un stress salin , la fluorescence chlorophyllienne et la teneur en chlorophylle (a; b; a+b) ont été affectées par la salinité à certaines doses , ces résultats sont conformes aussi avec plusieurs études réalisées sur différentes plantes en conditions salines et métalliques . le contenu de la chlorophylle diminue considérablement chez les plantes sauvages d'*Arabidopsis thaliana* .

Trois cultivars de *lycopersicon esculintum* et une accession de *lycopersicon Sheesmarrii* ont été étudiés sous différents régimes d'irrigation à l'eau saline ,les teneurs en chlorophylle (a ,b, a+b) ont été réduites sous l'effet d'un stress salin (Eliklil et al 2002).

El Médaoui et al (2007) , ont étudié les effets de quatre niveaux de NaCl sur le tournesol cultivé (*Helianthus annuus* L), les résultats en chlorophylle chez tous les témoins sont importants comparativement aux plantes stressées .

La salinité détruit la structure fine des chloroplastes et provoque l'instabilité des complexes protéiques (Lamzeri 2007) ,la réduction en concentration en chlorophylle en condition.

Notre étude montre que la teneur en proline augmente chez *Atriplex Canescens* (Pursh) Nutt avec la concentration du dosage du ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ et NaCl) séparés et combinés.

Cette accumulation affecte les feuilles de la plante stressées selon Hassani et al (2008). Elle permet la protection de la membrane cellulaire et participe à l'ajustement osmotique en plus, Thiery et al (2004), pensent que les quantités accumulées pourraient être liées au niveau de tolérance au stress biotique et abiotique .

L'importance de la proline comme indicateur aux agressions semble jouer un rôle dans le maintien des pressions sol-vacuole et des systèmes enzymatiques ainsi qu'un régulateur du Ph. Alem et Ameri (2005).

L'accumulation de proline est l'une des manifestations les plus remarquables dans la résistance en sel Benabi (2006).

La proline pourrait s'accumuler suite à une perturbation du métabolisme des protéines Bezzala (2005). Une étude sur *Vigna Sinensis* montre le même comportement de cette espèce au stress salin Lotmani et al (1998), Mekhaldi (2007).

D'autres facteurs influent sur l'accumulation de la proline tel que l'inhibition de l'oxydation due à un effet Mitochondréal et à la réduction du taux de translocation de l'acide aminé à travers le phloème Arceller (1995).

L'accumulation de la proline augmente significativement avec l'augmentation de la salinité Belkhoudja Bedai (2007) selon Monneveux (1989) c'est une forme d'ajustement du potentiel osmotique, des causes de l'accumulation serait aussi une proliolyse membranaire.

Selon un autre point de vue l'accumulation de proline n'est une réaction d'adaptation au stress mais plutôt le signe d'une perturbation métabolique Cheikh M'hamed et al (2008).

En ce qui concerne, les résultats nous en permis également de noter des valeurs élevées au niveau foliaire en situation de stress salin, stress métallique et stress combiné. Comparativement au témoin ce qui explique que l'*Atriplex Canescens* (pursh nutt) a concentré ses composés glucidiques au niveau Foliaire.

L'accumulation des sucres solubles est parmi les phénomènes les plus observés dans la réponse de stress, Costa et Spitz (1997) puis Dubey et Singh (1999) suggèrent que cette accumulation de glucide soluble a été rapportée en réponse à différents stress environnementaux et particulièrement les métaux, Stratégie adoptée par les plantes afin de résister aux contraintes du milieu Bajji et al (1998), El Midaoui et al (2007).

Selon Clifford et al (1998) l'accumulation des sucres solubles peut résulter d'une augmentation de l'hydrolyse de l'amidon puisqu'il ont enregistré, simultanément, une diminution de l'amidon et une accumulation de sucre soluble dans les tissus stressés, cette accumulation pourrai avoir un rôle osmotique empêchant la déshydratation des cellules et le maintien de la balance de la force osmotique pour garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible Bouzoubaa et al (2001).

Des corrélations significatives et négatives ont été établies en conditions salines et métalliques en teneur des feuilles en sucres solubles totaux de certaines espèces comme le tournesol, le haricot, la tomate et le riz El Medaoui et al (2007).

Références bibliographiques

A

Abbad A., Cherkaoui M., Wahid N., El Hadrami A. et Benchaabane A. 2004**(b)**. Variabilités phénotypique et génétique de trois populations naturelles d'*Atriplex halimus* (L). Comptes Rendus Biologies. Vol 327, Issue 4 : 371-380

Achour A. 2005. Bilan minéral et caractérisation des pectines chez *Y Atriplex halimus* L. stressée à la salinité. Thèse de magistère. Université d'Oran Es senia. P 82

Adriano DC 2001 .Copper. In Trace elements in terrestrial environment, biogeochemistry, bioavailability, and risks of metal. 2nd Edition, pp 499–546

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) .2012. *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués : État de l'art et guide de mise en œuvre*. France, Éditions EDP Sciences, 86 p. (ISBN 978-2-7598-0805-2).

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) 2013. La contamination des sols : une menace pour l'Homme et les écosystèmes. In ADEME. *Sites pollués et sols*. <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15092#theme3> (Page consultée le 24 août 2013).

Agence pour la diffusion de l'information technologique (ADIT) 2006. Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation. In ADEME. *Publications ADEME : Sites pollués et sol*.

Akram.,M Ahmed A.,Jan MM 2002: the medicinal plants of salt range .J.Biol .sci.,2:1035-1046.

Alem C et Ameri A .2005: importance de la stabilité des membranes cellulaires dans la tolérance à la salinité chez l'orge vol 4 Maroc .pp20-32 .

Ali Dib T, Monneveux P, Araus JL.1992. **Adaptation à la sécheresse et notion d'idiotype chez le blé dur. II. Caractères physiologiques d'adaptation.** *Agronomie* 1992 ; 12 : 381-393.

Anonyme 1975 connaissance des écosystèmes des zones semi-arides du Moyen -orient et de l'Afrique du nord : orientation des recherches écologiques en vue du développement . Rapport préparé par le comité MAB Français pour la réunion du PNUE sur la désertification et l'écologie des zones arides (Téhéran 26 Février - 4 Mars 1975)pp.22.27.

Asloum H., 1990: Elaboration d'un système de production maraîchère (Tomate ,*Lycopersicum esculentum* L.) en culture hors sol pour les régions sahariennes.Utilisation de substrats sableux et d'eaux saumâtres. Thèse de doctorat, développement et amélioration des végétaux, Université de

Nice Sophia- Antipolis: 24- 32.

Arbaoui, M., Benkhelifa, M. et Belkhodja, M. (1999a) Réponses physiologiques de quelques variétés de blé dur à la salinité au stade juvénile. CIHEAM - Options Méditerranéennes, pp. 167-169.

B

Barrow J. R. 1987. The effects of chromosome number on sex expression in *Atriplex canescens*. Botanical gazette. 148(3):379-385

Barrow J. R. 1997. Natural asexual reproduction in fourwing saltbush *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. Journal of aride environment 36:267-270.

Barrow J. R. et Osunda P. 2002. Phosphorus solubilization and uptake by dark septate fungi in fourwing saltbush, *Atriplex canescens* (pursh) Nutt. Journal of Arid Environments.51:449-459

Bellakhdar J. 1997. La pharmacopée marocaine traditionnelle: Médecine arabe ancienne et savoirs populaires. Ibis Press, 764 p. in <http://www.metafro.be/prelude/viewcountry?cc=MA&cat=V>

Brandie J. R., 1987. Windbreaks and crop production. SAF National Convention, October 18-21, Minneapolis (USA).

Barbaroux, R., Mercier, G., Blais, J.F., Morel, J.L. and Simonnot, M.O. (2011). A new method for obtaining nickel métal from the hyperaccumulator plant *Alyssum murale*. *Seperation and Purification Technology*, vol. 83, p. 57-65.

Black, H. (1995). Absorbing Possibilities: Phytoremediation. *Environmental Health Perspectives*, vol. 103, n° 12, p. 1106-1108.

Baize D. (2009). Éléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles - Définitions et utilités. In: ADEME, 2ème Rencontres Nationales de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués, Paris 9 p.

Baker DE and Senft JP (1995) Copper. In: Heavy metals in soils (Alloway Ed), 2nd Edition, Blackieacademic & professional, 368 pp.

Bourrelier PH and Berthelin J (1998) Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion. Académie des Sciences, Rapport n°42 Août 1998, Lavoisier Tec & Doc, 440 pp.

Banasova V, O Horak, M Ciamporova, M Nadubinska, & I Lichtscheidl. 2006. The vegetation of metalliferous and non-metalliferous grasslands in two former mine regions in Central Slovakia. *Biologia* 61, 433-439.

- Bussler W. (1981).** Physiological functions and utilization of copper. In: Copper in soils and plants (Loneragan JF, Robson AD & Graham RD Eds). *Academic Press*, pp. 213–234.
- Bajji, M., Kinet J.M et Lutts 1998** Salt stress effects on roots and leaves of *Atriplex Halimus* L. and their corresponding callus cultures plants science Vol.137, n°2 pp.131-142
- Bajji, M. 1999.** Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur *Triticum durum* Desf. j : caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux sélectionnés in vitro. PhD Thesis, *Université catholique de Louvain, Louvain-la- Neuve*.
- Belkhodja, M. et Bidai, Y. (2004)** La réponse des graines d'*Atriplex halimus* L. à la salinité au stade de germination. Sciences et changements planétaires/sécheresse. Vol.15, n°4, pp. 331-335
- Belkhodja, M. et Bidai, Y. (2007)** Analyse de la proline pour l'étude de la résistance d'une allophyte *Atriplex halimus* L. à la salinité Laboratoire de physiologie végétale faculté des sciences Université d'Oran Algérie (www.telabotanica.org) 8pp .
- Bendarradji . L, Bouzerzour. H, Ykhlef N, Djekoun. A.** Etude de mécanismes de tolérance à la salinité chez deux variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L) soumis à un stress salin. Science & Technologie C-N° 32 décembre (2010) p 23-30
- Berthomieu P, Conéjéro G, Nublat A, Brackenbury WJ, Lambert C, Savio C, Uozumi N, Oiki S, Yamada K, Cellier F, Gosti F, Simonneau T, Essah PA, Tester M, Véry AA, Sentenac H, Casse F.2000.** Functional analysis of AtHKT1 in Arabidopsis shows that Na(+) recirculation by the phloem is crucial for salt tolerance,
- Bouatrous Y, Ykhlef N, Mohei el din Solliman Mohamed. 2009a.** Physiological behaviour of durum wheat plants (*Triticum durum* Desf) grown in salt medium. *Egypt.J of Appl Sc.*, 24 (2A) 2009: 40-47.
- Bouatrous Y, Ykhlef N, Elham Ahmed Abbas Abd Elhady.2009b.** Production of Haploid durum wheat plants by pollination of wheat with barley (*Triticum durum* Desf x *Hodeum bulbosum* L.) and maize (*Triticum durum* Desf x *Zea mays* L.), *Egypt.J of Appl Sc.*, 24 (2A) 2009: 48-55.
- Boyd, R.S., 1998.** Hyperaccumulation as a plant defensive strategy. In: Brooks, R.R. (Ed.). Plants that hyperaccumulate heavy metals. CABI Publishing, Wallingford, pp. 181-200.
- Braun P 2006 Diagnostic des accidents du blé dur. ARVALIS - Institut du végétal, Paris.
- Bourrelier P.H. et Berthelin J. (1998).** Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. Rapport n°42. Ed. Technique et documentation. Paris. 438p.
- Boulghalagh, J., Berrichi, A., El Halouani, H. et Boukroute, A. (2006)** Effet des stress

salin et hydrique sur la germination des graines du jojoba (*Simmondsia chinensis* [link] schneider). Recueil des résumés. Le Premier Congrès National sur l'Amélioration de Production Agricole, Settat, Maroc, p. 24.

Bouaouina, S., Zid, E. et Hajji, M. (2000) Tolérance à la salinité, transports ioniques et fluorescence chlorophyllienne chez le blé dur (*Triticum turgidum* L.) CIHEAM – Options Méditerranéennes. pp. 239-2.

Brooks, R.R., 1998. Biogeochemistry and hyperaccumulators. In: Brooks, R.R. (Ed.). Plants that hyperaccumulate heavy metals. CABI Publishing Wallingford, pp. 95-118.

Briat, J.F., Lebrun, M., 1999. Plant responses to metal toxicity. Plant Biology and Pathology 322, 43-54.

C

Cahurel J.Y. (2008). Fertilisation de la vigne un point sur les préconisations. Institut Français de la vigne et du vin. Paris. 6 p.

Calu, G. (2006) Effet du stress salin sur les plantes. Comparaison entre deux plantes modèles : *Arabidopsis thaliana* et *Thellungiella halophila*. Master 1, Recherche biotechnologie : du gène à la molécule SpectroSciences, article 23, 10 p.

Cetois A, Quesnoit M and Hinsinger P (2003) Soil copper mobility and bioavailability – A review, 110 p

Chaignon V, Bedin F and Hinsinger P. (2002a). Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and a calcareous soil. *Plant and Soil*: 243, 219–228.

Chaignon V, Di Malta D and Hinsinger P. (2002b). Fe-deficiency increases Cu acquisition by wheat cropped in a Cu-contaminated vineyard soil. *New Phytologist* 154, 121–130

Clemens S (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta* 212, 475–486

Clemens S, Palmgren MG, Kramer U (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Plant Science*; 7: 309-315.

Cliford et al 1998 the role of solute accumulation osmotic adjustment and changes in cell wall elasticity in drought tolerance in *Ziziphus mauritiana* (Lamk) J Exp Bot 49:967-977.

Cheikh M'hamed et al 2008: Evaluation de tolérance de stress salin de quelques accessoires d'orge (*Hordium vulgare* L) cultivées en Tunisie : Approche physiologique p.30-37

Chaignon V. (2001). Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes

cultivées - Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse Doctorat Aix Marseille III, Discipline Géosciences de l'environnement, 173 p.

Coullery P 1997 Gestion des sols faiblement pollués par des métaux lourds. Revue Suisse d'Agriculture 29, 299–305

Cook, C.M.; Kostidou, A.; Vardaka, E.; Lanaras, T.1997. Effects of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of Phaseolus plants. Photosynthetica. 34: 179-193.

Costa et Spirtz 1997 :Influence of Cadmium on soluble carbohydrates free amino acids,proline content of in vitro cultured Lupinus albus .plant sci.128:131-140.

Cuypers, A.2000. Phytotoxic concentrations of copper and zinc induce antioxidative defence in *Phaseolus vulgaris*, cv. Limburgse vroege : a comparative study. Limburgs universitair centrum, Diepenbeek, Belgium.

Chaudhary P, SS Dudeja & KK Kapoor. 2004. Effectivity of host-Rhizobiumleguminosarum symbiosis in soils receiving sewage water containing heavy metals. Microbiological Research 159, 121-127.

CHERBUY B., 1991: Les sols salés et leur réhabilitation étude bibliographique.Cemagraf, école. Nat. Renne, 170 P.50.

Chevrier E .,2013 la phytoremédiation , une solution d'venir pour le Québec .Essai présenté pour l'obtention du grade de Maitre en environnement .Université de Sherbrooke p19.

CHEVERRY C., 1995: Comportement des plantes en milieu salé compte rendu del'ACAD d'ARGRIC De France. Action n° 04. Revu. Bimestrielle. Vol.81 (2) : 42-46.

Chadefaud M. et Emberger L.1960. traité de botanique : systématique, les végétaux vasculaire. Tome II Ed. Masson & Cie. Paris. 1540p

Crété P. 1965. Précis de botanique, systématique des Angiospermes. *Ed Masson & Cie.* Tome II. PARIS. 429p

D

Dabouineau, L., Lamy, Y. et Collas, P. (2005). Phytoremédiation et phytorestauration ou l'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. *Le Rôle d'eau*, vol. 124, p. 8-15.

Davis RD. and Beckett PHT. (1978). Upper critical levels of toxic elements in plants. II. 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, 23–32

Dey L., Attele A., Yuan C. 2002. Alternative Thérapies for Type 2 Diabètes. Alternative

Medicine Review, 7(1) 45-58

Dreir .W,1978:Elaboration d'un test de préselection des variétés de plantes ayant une haute tolérance en accumulation de proline .institut d'agronomie INA El Harrach Alger.

Dubois M.,Gillet K.A(1965) :Dosage des sucres totaux à l'ortho-toluidine, J.Agr Prod Chem.13:137.

Dubey et Singh 1999.Salinity induces accumulation of soluble sugars and alters the activity of sugar metabolizing enzymes in rice plants .Biol Plant 42.233-232.

Dutuit P., Pourrat Y., Dodeman V. L. 1991. Stratégie d'implantation d'un système d'espèces adaptées aux conditions d'aridité du pourtour méditerranéen. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELPUREF. John Libbey Eurotext. Paris, pp. 6.5-73.n

E

El Alaoui C.A. (2007). Fertilisations minérale des cultures:les éléments minéraux econdaires et oligo-éléments. Rapport n°156. Transfert de technologie en agriculture. Maroc. 4 p.

El Iklil Y., Karrou M.,Mrabet R., Benichou M.2002 : effets du stress salin sur la variation de certains m"tabolismes chez lycopersicon esculentum canadian journal of plant science Vol 82,n°1 pp.177-183.

El Midaoui M.,Benbella M., Ait Houssa A.,Ibuz M.,Talouizte A(2007):Contribution à l'étude de quelques mécanismes d'adaptation à la salinité chez le tournesol cultivé .revue HTE n° 136 ,pp.29-34.

El Mzouri E., Chiriyaa A., El Mourid M., Laamari A. 2000. Improving feed resource and quality in the dryland areas of Morocco by introducing the strip-alley cropping System. In: Gintzburger G., M. Bounejmate and A. Nefzaoui (eds.). Fodder Shrub Development in Arid and Semi-arid Zones. Proceedings of the Workshop on Native and Exotic Fodder Shrubs in Arid and Semi-arid Zones, 27 October-2 November 1996, Hammamet, Tunisia. ICARDA, Aleppo (Syria). Vol. II: 340-347.

El Shatnawi M.J., et Mohawesh Y. M. 2000. Seasonal Chemical composition of saltbush in semiarid grasslands of Jordan. J. range Manag. Vol 53: 211-214.

Eapen, S., Singh S. and D'Souza, S.F. (2007). Phytoremediation of Metals and Radionuclides. In Singh, S.N and R.D. Tripathi, *Environmental Bioremediation Technologies* (p. 188-209). Berlin, Springer.

Erchidi AE, Benbella M, Talouizte A. 2000. Relation entre certains paramètres contrôlant

les pertes en eau et le rendement en grain chez neuf variétés de blé dur soumises au stress hydrique. Options méditerranéennes, série A (*Séminaires méditerranéens*) 40 : 279-282.

États-Unis. United States Environmental Protection Agency (EPA) (1999).

Phytoremediation resource guide. Washington, 56 p.

États-Unis. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2000). *Introduction to Phytoremediation*. Cincinnati, OH, 104 p. (EPA/600/R-99/107).

États-Unis. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2013). Technology Focus. In EPA. *Technology Innovation and Field Services Division*, <http://www.clu-in.org/techfocus/> (Page consultée le 25 mai 2013).

Evans, M. (1997). Status of in situ phytoremediation technology. In Environmental Protection Agency (EPA), *Recent Developments for In Situ Treatment of Metal Contaminated Soils* (p. 23-32). Washington, D.C., EPA.

F

Frankly 1971 L'Atriplex en Tunisie et en Afrique du nord Rome:ONU/FAO,p271.

Forget, D. (2004). Réhabilitation des sols. In ETS. *École de technologie supérieur(ETS)*.https://cours.etsmtl.ca/ctn626/innov_fiche_cemrs_200409b_fr.pdf (Page consultée le 20 février 2013).

Foy, C.D., Chaney, R.L., White, M.C., 1978. The Physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 29, 511-566.

G

Graham RD. (1981). Absorption of copper by plant roots. In: Copper in soils and plants (Loneragan JF, Robson AD and Graham RD Eds). *Academic Press*, pp. 141–163

Greger, M., 1999. Metal availability and bioconcentration in plants. In: Prasad, M.N.V. & Hagemayer, J. (Eds.). *Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1-27.

Ghosh, M. and S.P. Singh (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of tis byproducts. *Applied ecology and environmental research*, vol.3, n° 1, p. 1-18.

Gouvernement du Canada (2008). Phytoremediation. In Gouvernement du Canada. *BioBasics*. <http://www.biobasics.gc.ca/english/View.asp?x=742> (Page consultée le 10 mars 2013).

Greipsson, S. (2011). Phytoremediation. *Nature Education Knowledge*, vol. 3, n° 10, p7.

Gérard H., Le Saos J., Billard J.P., Boucaud J. 1991. Effect of salinity and lipid composition, glycine betaine content and photosynthetic activity in chloroplasts of *Suaeda maritima* L. *Plant. Physiol., Biochem*, 29 (5), p. 421 - 427.

Guignard J. L. et Dupont F. 2004. Botanique : systématique moléculaire. 13^{ème} édition. Ed Masson. 284 p

Gupta, et Abrol 1990 in Benabi 2005 Salts affected soils :their reclamation and management for Crop production *Adv of soil Sci SSSA* p 273-87.

H

Hamdy et al 1995 Saline irrigation assessment and management for a sustainable use .Saline irrigation: Halophyte production and utilization projet n°IC 18CT96.0055p152-226

Henry, J.R. (2000). An OverView ofthe Phytoremediation of Lead and Mercury. *Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency*, 55 p.

Hasan SA, Fariduddin Q, Ali B, Hayat S. and Ahmad A. (2009). Cadmium: toxicity and tolerance in plants. *Journal of Environmental Biology*; 30: 165-174.

Hsissou D.1994. Sélection in vitro et caractérisation de mutants de blé dur tolérants à la sécheresse. *Thèse de doctorat, faculté des sciences, université catholique de Louvain.*

Haouala, F., Ferjani, H. et Ben El Hadj, S. (2007) Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na⁺, K⁺ et Ca²⁺) et du chlore (Cl⁻) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* Vol. 11, n°3, pp. 235-244.

Hoagland Dand and Arnon D.I.,1938- the water cultured méthode for growing plant without soil ,*Calif.Agric.Exp.stn .Circ.*, 347-349p.

HOPKINS. W.G., 2003 : Physiologie végétale. Traduction de la 2^{ème} édition américaine par SERGE R. Ed. De Boeck, p 66-81.

I

Interstate Technology & Regulatory Coopération Work Group (ITRC) (1997). *Emerging technologies for the remediation of metals in soils.* Washington, D.C., ITRC and Phytotechnologies Teams, 15 p.

Interstate Technology & Regulatory Coopération Work Group (ITRC) (2001). *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document.* Washington, D.C., ITRC and Phytotechnologies Teams, 124 p. PHYTO-2.

Interstate Technology & Regulatory Coopération Work Group (ITRC) (2009).

Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised. Washington, D.C., ITRC and Phytotechnologies Teams, 187 p. PHYTO-3.

Ighilhariz- Hennia Z. 2008. Contribution à la valorisation d'*Atriplex halimus* .L et *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt par la culture *in vitro*. Thèse de doctorat d'état. Université d'Oran Es-senia 143p

J

Jean Paul le Gros 2009 .la salinisation des terres dans le monde Académie des sciences et lettres de Montpellier 2009 pp 257-269.

Johnson F. L., Hoagland B. W. 1999. Catalog of the woody plants of Oklahoma: description and rang maps. Oklahoma biological survey. (Awww.biosurvey.ou.edu/shrub/shrubndx.htm .

Juste C. (1988). Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en trace du sol. *Science du Sol*; 26: 103-112

K

Khan, F.I., Hasain, T. and Hejazi, R. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, vol. 71, p. 95-122.

Kabata-Pendias A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed. CRC Press, Boca Raton, Taylor & Francis Group, LLC. 505 p.

Kabata-Pendias A. and Pendias H. (2001). Trace Elements in Soils and Plants. Third ed. CRC Press, Boca Raton, LLC

Kartesz J.T. 1988. A flora of Nevada. Reno, NV: University of Nevada. 1729 p. [In 3 volumes]. Dissertation. [42426] in **Howard, J. L.** 2003. *Atriplex canescens*. In: Fire Effects Information System, [Online], U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory. Available: (<http://www.fs.fed.us/database/feis/>)

Kessler J.J. 1990. *Atriplex* forage as a dry season supplémentation feed for sheep in the Montané Plains of the Yemen Arab Republic. *J. Arid Environments*, 19: 225-234.

Kitchen S. G., Mc Arthur E. D. 2001. Native or not: Subjective labels and their application in wildland plantings. *Native plant journal*. Vol 2. n °1:21

L

Le Dily F., Billard J.P., Boucaud J. 1991. Polyamine levels in relation to growth and NaCl

concentration in normal and habituated sugar beet callus cultures. *Plant Cell and Env.*, 14,p. 327 -332.

Le Houérou H. N. 1980. Background and justification. In: H.N. Le Houérou (ed.). "Browse in Africa. The current State of knowledge". International Livestock Center for Africa, Addis Abeba (Ethiopia): 491

Le salinier. 1999. Dossier environnement. Le magazine du personnel de Salins N° 83 - août99. <http://www.salins.fr/mai/phototheque/photos/pdf/SupplementPlantes.pdf?PHPSESSID=438c878573cf0ca9df4a97f4a9d9b15b>

Lamzeri, H. (2007) Réponses écophysiologicals de trois espèces forestières du genre *Acacia*, *Eucalyptus* et *Schinus* (*A. cyanophylla*, *E. gomphocephala* et *S. mölle*) soumises à un stress salin. **Thèse de magistère en Ecologie et Environnement .Option : Ecologie végétale.** UniversitéMentouri Constantine. 141p.

Lebourg A., Sterckeman T., Ciesielski H. and Proix N. (1996). Intérêt de différents réactifs d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces du sol. *Agronomie*; 16: 201-215.

Lindsay WL. 1979 .Chemical equilibria in soils. John Wiley and Sons, 449 p

Levent Tuna A., Cengiz Kayab , David Higgs, Bernardo Murillo-Amador, Salih Aydemir , Ali R. Girgin .2007. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants, *Environmental and Experimental Botany Elsevier.121: 1- 7.*

Levitt. J., 1980 : Respons of plants to environmental stresses : water, radiation, sait and other stresses, Academic Press, New York, pp. 365-488.

Lutts et al 2004 ,Vickman et al 2002;Belarbi 2008 heavy metal accumulation by the allophytes species méditerranéan salt bush .*J.environqual* 33.

M

McBride MB (1981) Forms and distribution of copper in solid and solution phases of soil. In: Copper in soils and plants. Eds Loneragan JF, Robson AD and Graham RD, Academic Press, pp. 25–45

McBride MB (1989) reactions controlling heavy metal solubility in soils. *Advances in Soil Science* 10,1–56

McBride MB and Bouldin DR (1984) Long-term reactions of copper(II) in a contaminated calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal* 48, 56–59

McBride MB. (1994). Environmental Soil Chemistry. Oxford University Press, New York:

267 p.

Marschner H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed. London, UK. Academic Press. 889 p

Marschner P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. Elsevier Ltd. p 651

Michaud AM, MN Bravin, M Galleguillos & P Hinsinger. 2007. Copper uptake and phytotoxicity as assessed *in situ* for durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) cultivated in Cu-contaminated, former vineyard soils. *Plant and Soil* 298, 99-111.

Michel. CG et al., 2005: Sols et environnement Dunod, Paris, Pp: 609; 612; 620.

Michel K. and Ludwig B. (2005). Bioavailability and biogeochemistry of metals in the terrestrial environment. *Metallions in Biological Systems*; 44: 75-96.

Monneveux. P et This. D., 1997- La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse: espoirs et difficultés. *Sécheresse*, Vol.8, N° 1, p. 29-37.

Mozingo. et Hugh. N. 1987. Shrubs of the Great Basin: A natural history. Reno, NV: University of Nevada Press. 342 p. [1702]

Mulas. M., Mulas. G. 2004. Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short And Medium - Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université Des Etudes De Sassari Groupe De Recherche Sur La Désertification. 112p

Munns et al 1995

Mezni et al 2012 **effets de la salinité des eaux d'irrigation sur la nutrition minérale chez trois variétés de Luzernes pérennes , Laboratoire de production fourragère ,INRA Ariana Tunisie.**

N

Niekerk. W.A Sparks. C. F, Rethman. N.F.G et Coertze. R. J. 2004. Mineral composition of certain *A triplex* species and *Cassia sturtii*. *South African Journal of Animal Science*. 34 (Supplément 1):105-107

Nagajyoti P.C., Lee K.D. and Sreekanth T.V.M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ Chem Lett*, 8:199-216.

Navel A. (2011). Distribution, spéciation, impact et transfert du cuivre dans un sol sous vigne: rôle de la structuration spatiale et du statut organique. Thèse de doctorat. Spécialité : Océan, Atmosphère, Hydrologie. Université de Grenoble. 193 p

Ndour, P. et Danthu, P. (2000) Effet des contraintes hydrique et saline sur la germination dequelques acacias africain. Projet National de Semences Forestières du Sénégal. 11 p.

O

Oison, P.E., Reardon, K.F. and Pilon-Smits, E.A.H. (2003). Ecology of Rhizosphere Bioremediation. In McCutcheon, S.C. et Schnoor, J.L., *Phytoremediation : Transformation and Control of Contaminants* (p. 317-354). Floboken, NJ, Wiley-Intersciences, Inc.

Omani et al 2006: réponse of amaranth to salinity stress .these of RH .D.horticulture . Université de prétoria .Chapter 1 ,p5-20, Chapter 1 p1 .

Ozenda. P. 1958. Flore du Sahara septentrionales et centre. Ed. CNRS Paris.486 p

P

Padmavathiamma, P.K. and L.Y. Li (2007). Phytoremediation Technology : Flyper-accumulation Metals in Plants. *Water Air Soi! Pollution*, vol. 184, p. 105-126.

Parent C .,Capelli N .,et Dat J 2008 Réactive oxygen Spices, Stress and cell death in plants.Comptes rendus biologique vol 331 issue 4 ,pp.255-261.

Peer, W.A., Baxter, I.R., Richards, E.L., Freeman, J.L. and Murphy, A.S. (2006). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. *Topics in Current Genetics*, vol. 14, p. 299-340.

Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual review of plant biology*, vol. 56, p. 15-39.

Phelippe. D., 2001: Introduction à la science du sol. Dunod, Paris, Pp: 263; 264; 265. .

Puig S, Andres-Colas N, Garcia-Molina A and Penarrubia L (2007). Copper and iron homeostasis in Arabidopsis: response to metal deficiencies, interactions and biotechnological applications. *Plant Cell and Environment*, 30: 271–290

Poorter.H .1989. Interspecific variation in relative growth rate: on ecological consequences. In : Causes and consequences of variation in growth rate and productivity of higher plants.

R

Rahmoune, C., Maalem, S, Kadri, K. et Ben Naceur, M. (2008) Etude de l'utilisation des eaux fortement salées pour l'irrigation des plantes du genre *Atriplex* en zones semi arides. Revue des régions arides. Vol. 2, no21, pp. 924-929.

Rengel, Z., 1999. Heavy Metals as Essential Nutrients. In: Prasad, M.N.V. & Hagemayer, J. (Eds.). Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems. Springer-Verlag, Berlin, pp. 231- 251.

Ratnikov AN, DG Sviridenko, TL Zhigareva & GI Popova. 2005. Effects of heavy metals and organic fertilisers on a biological activity of soddy-podzolic soil and yield of barley. *In* H.-K. Galazka, editor. Current developments in remediation of contaminated lands, Pulawy, Poland.

S

Said. O, Fulder. S, Khalil. K, Azaizeh. H, Kassis. E et Bashar Saad. B. 2008. Maintaining a physiological blood glucose level with 'Glucolevel', a combination of four anti-diabetes plants used in the traditional arab herbal medicine. *Evid Based Complément Alternat Med.* 5(4): 421-428

Smail-Saadoun.N.2005.Anatomical adaptation of Algerian Sahara Chenopodiaceae to severe drought conditions. *Science et changements planétaires/Sécheresse.* Vol 16, Number 2 :121-4

Springfield. H. W. 1970. Germination and establishment of fourwing saltbush in the Southwest. Res. Pap. RM-55. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 48 p.

Sanità di Toppi, L., Gabbrielli, R., 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41, 105-130.

Sauvé S, Dumestre A, McBride M and Hendershot W (1998) Derivation of soil quality criteria using predicted chemical speciation of Pb²⁺ and Cu²⁺. *Environmental Toxicology and Chemistry* 17, 1481–1489

Shu WS, ZH Ye, ZQ Zhang, CY Lan & MH Wong. 2005. Natural colonization of plants on five lead/zinc mine tailings in Southern China. *Restoration Ecology* 13, 49-60.

Simmons JA, WS Currie, KN Eshleman, K Kuers, S Monteleone, TL Negley, BR Pohlrad & CL Thomas. 2008. Forest to reclaimed mine land use change leads to altered ecosystem structure and function. *Ecological Applications* 18, 104-118.

Smith SR. 1997. Rhizobium in soils contaminated with copper and zinc following the longterm application of sewage sludge and other organic wastes. *Soil Biology & Biochemistry* 29, 1475-1489.

Slama A .2002. Étude comparative de la contribution des différentes parties du plant du blé dur dans la contribution du rendement en grains en irrigué et en conditions de déficit hydrique. *Thèse de doctorat en biologie, faculté des sciences de Tunis.*

Szabolcs I., 1994 : Soils and salinization. In: Pessarakli, M. (Ed.), *Handbook of Plant and Crop Stress.* Marcel Dekker, New York: 3-11.

Sauvé S, McBride MB, Norvell WA, Hendershot WH. 1997. Copper solubility and speciation of in situ contaminated soils, Effects of copper level, pH and organic matter. *Water Air and Soil Pollution* 100: 133–149

Sauvé S 2006. Copper inhibition of soil organic matter decomposition in a seventy-year field exposure. *Environmental Toxicology and Chemistry* 25, 854–857

T

Templeton DM, Ariese F, Cornelis R, Danielsson LG, Muntau H, Van Leeuwen HP, tobinski R. (2000). Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Définitions, structural aspects, and methodological approaches (IUPAC recommendations 2000). *Pure and Applied Chemistry*; 72: 1453-1470.

Teléja N-2007 . Mécanismes of hight salinity tolerance in plants méthodes enzymol 428;419-438p.

Tiller KG and Merry RH ,1981. Copper pollution of agricultural soils. In: *Copper in soils and plants* Eds Loneragan JF, Robson AD and Graham RD, Academic Press, pp. 25–45

Thiery et al 2004 phospholipase D, is a négative régolator of proline biosenthésis in arabidopsis thaliana *J.biol chem* 279 (15) 14812- 14818.

Tremel-Schaub A. et Feix I. (2005). Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences. 413 p.

U

United Nations Environment Program (UNEP) (2002). Phytoremédiation : An Environmentally sound technology for pollution prévention, control and remediation. *In* UNEP. *UNEP*. <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Freshwater/FMS2/1.asp> (Page consultée le 1er mars 2013).

University of Hawaii (2001). Bioremediation technologies. *In* University of Hawaii. *University of Hawaii*. <http://www.hawaii.edu/abrp/> (Page consultée le 10 mars 2013).

Ure AM (1995) Methods of analyses of heavy metals in soils. In: *Heavy metals in soils*. 2nd Edition, Ed. BJ Alloway, Blackie Academic and Professional, London, pp. 40–80

V

Van Aken, B. (2009). Transgenic plants for enhanced phytoremédiation of toxic explosives. *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 20, p. 231-236.12: 281-291

Vishnoi, S.R. and Srivastava, P.N. (2008). Phytoremédiation : Green for environmental clean. *In Proceedings of Taal 2007: The 12th World Lake Conference*, (p. 1016-1021), Jaipur, 2008.

W

Wurtele, E.S, Garton, S, Young, D, Balandrin, M. F, McKell, C. M. 1987. Propagation of an elite high biomass-producing génotype of *Atriplex canescens* by axillary enhancement. *Biomass*

White P.J. and Broadley M.R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol.* 182, 49–84.

WANG, Y., NIL, N., 2004 : Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 623-627.

Y

Yul., Nite J., Cao C., Jin Y., Yan M., Wang F., Liu J., Xiao Y., Liang Y., Zhang W-2010 phosphatidic acid salt stress response by regulation of MPK6 In *Arabidopsis thaliana*, *New Phytol.* 188.762-773p.

Z

ZID E., GRIGNON C., 1991: Les tests de sélection précoce pour la résistance des plantes aux stress. Cas des stress salin et hydrique. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides, AUPELF-UREF. Jon Libbey Eurotext, Paris: 91- 108.

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.

Test-t de la surface foliaire

Test échantillons appariés

		Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
		Moyenne	Ecart-type			
Paire 1	témoin - NaCl 0,5%	,90500	,78420	1,999	2	,184
Paire 2	témoin - NaCl3%	1,09333	,85926	2,204	2	,158
Paire 3	témoin - CuSo4 2000ppm	,28967	1,03544	,485	2	,676
Paire 4	témoin - CuSo4 2500ppm	,20433	1,07557	,329	2	,773
Paire 5	témoin - CuSo4 3000ppm	,35800	,99762	,622	2	,598
Paire 6	témoin - 0,5%+2000ppm	,30667	1,14463	,464	2	,688
Paire 7	témoin - 0,5%+2500ppm	-,01800	1,09466	-,028	2	,980
Paire 8	témoin - 0,5%+3000ppm	,46067	,66550	1,199	2	,353
Paire 9	témoin - 3%+2000ppm	,23867	,78714	,525	2	,652
Paire 10	témoin - 3%+2500ppm	,23867	,78714	,525	2	,652
Paire 11	témoin - 3%+3000ppm	,59767	,60642	1,707	2	,230

Corrélation du dosage et la surface foliaire

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,113 ^a	,013	-,016	,44787	,013	,443	1	34	,510

Test-t volume racinaire

		Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
		Moyenne	Ecart-type			
Paire 1	témoin - NaCl 0,5%	-5,66667	12,89703	-,761	2	,526
Paire 2	témoin - NaCl3%	-10,33333	13,31666	-1,344	2	,311
Paire 3	témoin - CuSo4 2000ppm	-15,66667	7,50555	-3,615	2	,069
Paire 4	témoin - CuSo4 2500ppm	-26,00000	7,93725	-5,674	2	,030
Paire 5	témoin - CuSo4 3000ppm	-35,00000	22,91288	-2,646	2	,118
Paire 6	témoin - 0,5%+2000ppm	-5,00000	13,22876	-,655	2	,580
Paire 7	témoin - 0,5%+2500ppm	-13,00000	14,73092	-1,529	2	,266
Paire 8	témoin - 0,5%+3000ppm	-16,00000	9,53939	-2,905	2	,101
Paire 9	témoin - 3%+2000ppm	-20,66667	6,35085	-5,636	2	,030
Paire 10	témoin - 3%+2500ppm	-31,33333	18,87679	-2,875	2	,103
Paire 11	témoin - 3%+3000ppm	-52,00000	15,62050	-5,766	2	,029

Corrélation du dosage et volume racinaire

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,558 ^a	,311	,291	14,93329	,311	15,355	1	34	,000

Test-t longueur des tiges

		Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
		Moyenne	Ecart-type			
Paire 1	témoin - NaCl 0,5%	-,50000	4,09268	-,212	2	,852
Paire 2	témoin - NaCl3%	11,16667	1,01036	19,143	2	,003
Paire 3	témoin - CuSo4 2000ppm	1,75000	3,13249	,968	2	,435
Paire 4	témoin - CuSo4 2500ppm	-,29000	3,73595	-,134	2	,905
Paire 5	témoin - CuSo4 3000ppm	2,46667	1,67432	2,552	2	,125
Paire 6	témoin - 0,5%+2000ppm	4,71000	2,71934	3,000	2	,095
Paire 7	témoin - 0,5%+2500ppm	4,75000	2,94746	2,791	2	,108
Paire 8	témoin - 0,5%+3000ppm	,96000	4,19789	,396	2	,730
Paire 9	témoin - 3%+2000ppm	4,41667	3,00347	2,547	2	,126
Paire 10	témoin - 3%+2500ppm	9,58333	2,64969	6,264	2	,025
Paire 11	témoin - 3%+3000ppm	2,79333	1,12167	4,313	2	,050

Corrélation du dosage et longueur des tiges

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,176 ^a	,031	,003	6,08406	,031	1,088	1	34	,304

a. Valeurs prédites : (constantes), dosage

Test-t du chlorophylle a

Test échantillons appariés

		Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
		Moyenne	Ecart-type			
Paire 1	témoin - NaCl0,5%	1,22500	,64655	3,789	3	,032
Paire 2	témoin - NaCl3%	1,86500	,09539	39,101	3	,000
Paire 3	témoin - CuSo4 2000ppm	1,19250	,29937	7,967	3	,004
Paire 4	témoin - CuSo4 2500ppm	1,68750	,39911	8,456	3	,003
Paire 5	témoin - CuSo4 3000ppm	3,72500	,18430	40,423	3	,000
Paire 6	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2000ppm	2,96875	,34819	17,052	3	,000
Paire 7	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2500ppm	2,97500	,77104	7,717	3	,005
Paire 8	témoin - NaCl0,5%+CuSo43000ppm	5,35000	,38341	27,908	3	,000
Paire 9	témoin - NaCl3%+CuSo4 2000ppm	5,77750	,21360	54,096	3	,000
Paire 10	témoin - NaCl3%+CuSo4 2500ppm	6,61750	,29545	44,796	3	,000
Paire 11	témoin - NaCl3%+CuSo4 3000ppm	8,45250	,26222	64,469	3	,000

Corrélation du dosage et chlorophylle a

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,939 ^a	,882	,880	,86764	,882	345,272	1	46	,000

Test-t du chlorophylle b

Test échantillons appariés

		Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
		Moyenne	Ecart-type			
Paire 1	témoin - NaCl0,5%	,95750	1,10955	1,726	3	,183
Paire 2	témoin - NaCl3%	1,64225	,19287	17,029	3	,000
Paire 3	témoin - CuSo4 2000ppm	2,25125	,24727	18,209	3	,000
Paire 4	témoin - CuSo4 2500ppm	3,40025	,28601	23,777	3	,000
Paire 5	témoin - CuSo4 3000ppm	3,77250	,30707	24,571	3	,000
Paire 6	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2000ppm	4,07500	,09574	85,124	3	,000
Paire 7	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2500ppm	4,74750	,56175	16,903	3	,000
Paire 8	témoin - NaCl0,5%+CuSo43000ppm	5,43000	,27893	38,935	3	,000
Paire 9	témoin - NaCl3%+CuSo4 2000ppm	5,32000	,40719	26,131	3	,000
Paire 10	témoin - NaCl3%+CuSo4 2500ppm	5,84000	,22993	50,799	3	,000
Paire 11	témoin - NaCl3%+CuSo4 3000ppm	6,23250	,26018	47,910	3	,000

Corrélation du dosage et chlorophylle b

Récapitulatif des modèles^b

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,972 ^a	,944	,943	,47633	,944	774,119	1	46	,000

Test-t du chlorophylle a+b

Test échantillons appariés

		Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
		Moyenne	Ecart-type			
Paire 1	témoin - NaCl0,5%	2,18250	1,37585	3,173	3	,050
Paire 2	témoin - NaCl3%	3,50725	,18082	38,792	3	,000
Paire 3	témoin - CuSo4 2000ppm	3,44375	,22416	30,726	3	,000
Paire 4	témoin - CuSo4 2500ppm	5,08775	,59330	17,151	3	,000
Paire 5	témoin - CuSo4 3000ppm	7,49750	,40803	36,749	3	,000
Paire 6	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2000ppm	7,04375	,25257	55,778	3	,000
Paire 7	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2500ppm	7,72250	,56506	27,333	3	,000
Paire 8	témoin - NaCl0,5%+CuSo43000ppm	10,78000	,18385	117,271	3	,000
Paire 9	témoin - NaCl3%+CuSo4 2000ppm	11,09750	,24690	89,896	3	,000
Paire 10	témoin - NaCl3%+CuSo4 2500ppm	12,45750	,36981	67,373	3	,000
Paire 11	témoin - NaCl3%+CuSo4 3000ppm	14,68500	,18065	162,582	3	,000

Corrélation du dosage et chlorophylle a+b

Récapitulatif des modèles^b

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,981 ^a	,962	,961	,86414	,962	1155,555	1	46	,000

Test-t de la proline

Test échantillons appariés

	Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
	Moyenne	Ecart-type			
Paire 1 témoin - NaCl0,5%	-,21800	,11996	-3,634	3	,036
Paire 2 témoin - NaCl3%	-,44425	,12922	-6,876	3	,006
Paire 3 témoin - CuSo4 2000ppm	-,46800	,09811	-9,541	3	,002
Paire 4 témoin - CuSo4 2500ppm	-,56950	,09686	-11,759	3	,001
Paire 5 témoin - CuSo4 3000ppm	-,63625	,08210	-15,499	3	,001
Paire 6 témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2000ppm	-,69900	,10568	-13,229	3	,001
Paire 7 témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2500ppm	-,72550	,02949	-49,203	3	,000
Paire 8 témoin - NaCl0,5%+CuSo43000ppm	-,75725	,10376	-14,596	3	,001
Paire 9 témoin - NaCl3%+CuSo4 2000ppm	-1,03600	,13650	-15,180	3	,001
Paire 10 témoin - NaCl3%+CuSo4 2500ppm	-1,14600	,14088	-16,270	3	,001
Paire 11 témoin - NaCl3%+CuSo4 3000ppm	-1,55525	,08468	-36,732	3	,000

Coefficients^a

Modèle	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
	A	Erreur standard	Bêta		
1 (Constante)	20,480	,235		87,289	,000
DOSAGE	-1,228	,036	-,981	-33,993	,000

a. Variable dépendante : CHLOAB

Corrélation du dosage et de la proline

Récapitulatif des modèles^b

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,941 ^a	,886	,884	,13964	,886	357,630	1	46	,000

Test-t des sucres solubles

Test échantillons appariés

		Différences appariées		t	ddl	Sig. (bilatérale)
		Moyenne	Ecart-type			
Paire 1	témoin - NaCl0,5%	-,12750	,05654	-4,510	3	,020
Paire 2	témoin - NaCl3%	-,06000	,02588	-4,636	3	,019
Paire 3	témoin - CuSo4 2000ppm	-,06950	,02205	-6,303	3	,008
Paire 4	témoin - CuSo4 2500ppm	-,12175	,02874	-8,471	3	,003
Paire 5	témoin - CuSo4 3000ppm	-,18750	,06222	-6,027	3	,009
Paire 6	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2000ppm	-,03775	,02164	-3,489	3	,040
Paire 7	témoin - NaCl0,5%+CuSo4 2500ppm	-,11575	,01310	-17,673	3	,000
Paire 8	témoin - NaCl0,5%+CuSo43000ppm	-,16000	,05286	-6,054	3	,009
Paire 9	témoin - NaCl3%+CuSo4 2000ppm	-,13175	,01936	-13,609	3	,001
Paire 10	témoin - NaCl3%+CuSo4 2500ppm	-,38950	,03672	-21,215	3	,000
Paire 11	témoin - NaCl3%+CuSo4 3000ppm	-,57975	,26227	-4,421	3	,021

Corrélation du dosage et des sucres solubles

Récapitulatif des modèles^b

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques				
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	,662 ^a	,438	,426	,13302	,438	35,834	1	46	,000

a. Valeurs prédites : (constantes), DOSAGE

b. Variable dépendante : SUCRE

Coefficients^a

Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		A	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	,055	,036		1,521	,135
	DOSAGE	,033	,006	,662	5,986	,000

ANNEXE 2
Photothèques











