

Mémoire présenté en vue de l'obtention du :

Diplôme de Master

Option

«Phytotechnologie appliquée aux sols pollués»

Présenté par :



SMAINE Sabrina et SAADA Meriem

Intitulé :

Phytoextraction du cuivre par *Atriplex canescens L.* dans un milieu salin, étude des paramètres biométriques, hydriques et minéraux de la plante.

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

Soutenu le : 26/05/2016 - Devant le jury composé de :

<i>Nom et prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Appartenance administrative</i>
<i>CHIBANI Abdelwahab</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>U. Ibn Badis Mostaganem</i>
<i>OUAINI Abderrahmane</i>	<i>Mr</i>	<i>Examineur</i>	<i>U. Ibn Badis Mostaganem</i>
<i>REGUIEG Yssaad Houcine A.</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>	<i>U. Ibn Badis Mostaganem</i>
<i>GHAMNIA Youcef</i>	<i>Mr</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>U. Ibn Badis Mostaganem</i>

Année universitaire : 2015-2016

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord notre encadreur Mr REGUIEG YESSAD HOUCINE ABDELHAKIM professeur à l'Université de Mostaganem et responsable de la poste-graduation de la promotion de science des sols et environnement, pour son soutien, sa confiance et ses critiques constructives, qu'il nous a accordé tout au long de notre thème.

Ce fut un plaisir d'expérimenter et d'apprendre par ses intuitions et ses connaissances scientifiques, qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect et de notre sincère reconnaissance.

Ce mémoire a été réalisé au laboratoire de Biodiversité et conservation des eaux et des sols au sein de l'Université de Mostaganem, (L'INES) sous la direction de notre co-encadreur Mr GHAMNIA YUCEF, que nous remercions ici pour sa disponibilité, sa patience, ses orientations, ses remarques fructueuses :

Vous nous avez guidés à chaque étape de la réalisation de notre travail, malgré vos obligations professionnelles. Vos encouragements inlassables, votre amabilité, votre gentillesse, méritent toute admiration, nous vous exprimons notre profonde gratitude pour l'aide que vous nous avez fournie.

Nos plus vifs remerciements vont à Mme Mr le directeur du laboratoire et son équipe de nous avoir facilité notre intégration au sein du laboratoire de Biodiversité et conservation des eaux et des sols.

Nous exprimons également notre reconnaissance au dr CHIBANI Abdelwahab professeur à l'Université de Mostaganem, d'avoir bien voulu apporter sa contribution pour présider le jury. Toute notre gratitude à Mr OUAINI Abderrahmane, que nous remercions d'être à notre écoute à chaque fois que nous avons besoin de lui, il nous a honoré d'avoir été membre de notre jury.

SABRINA et MERIEM

Dédicaces

Au terme de ce travail, il nous est agréable d'exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude aux personnes qui ont contribué à faciliter notre tâche et la mener à bien.

Nous dédions ce modeste travail à nos professeurs, nos parents et nos proches, notre source de savoir et de courage.

A nos amies du master 2 promotion 2016 spécialité : Phytotechnologie appliquée aux sols pollués qui font notre équilibre par leur présence dans notre vie.

A tous ceux qui nous connaissent et nous estiment de près ou de loin.

Mme SMAINE Sabrina et Melle SAADA Meriem

RESUME

L'objectif de notre présent travail est d'étudier l'effet du stress salin induit par l'application de deux doses de NaCl (0,5% et 3%) d'une part, et du stress métallique à des doses croissantes ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ à : 2000 - 2500 et 3000 ppm), et aussi l'effet combiné ($\text{NaCl} + \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sur *Atriplex canescens* (Purch) Nutt, en conditions semi-contrôlées, au niveau des paramètres biométriques, hydriques et minéraux. La tolérance de cette halophyte a été étudiée par la capacité de croissance et de rendement.

En effet, les paramètres mesurés : la surface foliaire, le volume racinaire, la hauteur des tiges, la teneur en eau, la teneur relative en eau (RWC), la perte d'eau par transpiration (RWL) et les teneurs en sels minéraux (teneurs en Sodium et en Potassium) et leurs rapports respectifs à la fin de l'expérience varient en fonction du niveau du stress salin et métallique.

Les résultats obtenus ont montré que l'addition du sel et des sulfates de cuivre en l'occurrence, varie d'un paramètre à un autre. *L'Atriplex canescens* (Purch) Nutt étudiée est résistante aux sulfates de cuivre, et ce, à des concentrations élevées qui peuvent aller jusqu'à 3000 ppm. Il a été enregistré également que le stress salin et métallique ont entraîné des perturbations morphologiques affectant les racines, les tiges et les feuilles.

Enfin, *Atriplex canescens* (Purch) Nutt possède un important pouvoir d'accumulation dans les racines (partie souterraine) et les feuilles (partie aérienne). Elle a montré une grande résistance à la salinité manifestée par le développement d'un appareil aérien et racinaire important et elle accumule significativement les sels minéraux (Na^+ et K^+) dans les feuilles et les racines.

Mots clés: *Atriplex canescens* (Pursh). Nutt, sulfate de cuivre, phytoremédiation, salinité, stress, bilan hydrique, bilan minéral.

ABSTRAT

The present study was conducted to test the plant's ability to reform and saline soils contaminated with heavy metals through absorption and accumulation in root and leaf, we used in this research adaptable plant with the salinity of the plant (*Atriplex canescens*)

It has been watering this plant for a month by solvents sodium chloride two deferent concentration (5 and 30g /l) and the copper sulfate increasing concentrations (2000, 2500.3000 ppm), in addition to the combined effect of these two elements.

At the end of the experiment, we calculated biometric of (leaf area, length of the rods and root volume) and water standards (the amount of water, the water content was measured and the ratio of evaporation) and the metal of (sodium, potassium).

Show us through the results obtained by the emergence of highly resistant to leaf (cut) up to the extent of concentration of 3000 ppm of copper sulfate dissolved with concentration of 30 grams per liter and through the increase in the length of her legs and the evolution length of the rods and root volume.

sodium ions more potassium ions on the leaves and roots level, this accumulation varied from concentration to another, both when he was watering with saline only or metallic or taking part together.

Key words:*Atriplex canescens* (Purch) Nutt., copper sulfate, phytoremediation, salinity, stress, water balance, mineral balance.

المخلص

أجريت الدراسة الحالية بهدف اختبار قدرة النباتات على إصلاح التربة المالحة و الملوثة بالمعادن الثقيلة من خلال امتصاصها و تراكمها في القسم الهوائي و الترابي ، إستخدمنا في هذا البحث نبات متكيف مع الملوحة المتمثل في نبات القطف (*Atriplex canascens*) . تم سقي هذا النبات لمدة شهر بمحاليل كلوريد الصوديوم بتركيزين مختلفين (5 غرام في لتر و30 غرام في اللتر) من جهة و كبريتات النحاس بتركيز متزايدة (2000 ، 2500 ، 3000 جزء من المليون) من جهة أخرى بالإضافة إلى التأثير المشترك لهذين العنصرين مع بعضهما .

في نهاية التجربة قمنا بحساب المعايير البيومترية المتمثلة في (المساحة الورقية ، طول السيقان و حجم الجذور) و المعايير المئوية(كمية الماء ، المحتوي المائي المقاس و نسبة تبخره) بالإضافة الى العناصر المعدنية المتمثلة في (الصوديوم ، البوتاسيوم) .

تبين لنا من خلال النتائج المتحصل عليها ظهور مقاومة شديدة لنبات (القطف) تصل الى حد تركيز 3000 جزء من المليون من كبريتات النحاس المذابة مع المحلول الملحي بتركيز 30 غرام في اللتر و ذلك من خلال الزيادة في طول سيقانها و تطور حجم جذورها .

علاوة على ذلك تسبب الاجهاد الملحي و المعدني في تراكم أيونات الصوديوم أكثر من أيونات البوتاسيوم على مستوى الاوراق و الجذور ،هذا التراكم اختلف من تركيز الى اخر سواء عندما كان السقي بالمحلول الملحي فقط او المعدني أو باشتراكهما معا .

الكلمات المفتاحية : نبات القطف (*Atriplex canascens*) ، كبريتات النحاس ($CuSO_4.5H_2O$) ، النباتات المعالجة ، الملوحة ، الإجهاد ، المؤشرات المائية ، المؤشرات المعدنية

LISTE DES FIGURES

Fig. 01: Les différents types de la phytoremédiation

Fig.02: Caractéristiques morphologiques d'*Atriplex canescens*L (Pursh) Nutt (BENREBIHA, 1987)

Fig. 03 : Surface foliaire des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress salin et métallique

Fig. 04 : Surface foliaire des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂).

Fig. 05: Surface foliaire des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesuré après stress combine NaCl.(CuSo₄, 5H₂O).

Fig. 06 : volume racinaire des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesuré après le stress salin et métallique

Fig. 07 : Volume racinaire des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après stress combiné NaCl+ (CuSo₄.5H₂O).

Fig. 08 : Volume racinaire des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Fig. 09 : Longueur des tiges des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress salin et métallique

Fig. 10 : Longueur des tiges des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Fig. 11: Longueur des tiges des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Fig. 12 : Teneur en eau des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress salin et métallique

Fig. 13 : Teneur en eau des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Fig. 14 : Teneur en eau des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Fig. 15 : Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress salin

Fig. 16 : Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *l'Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress métallique

Fig. 17: Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Fig. 18 : Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Fig. 19 : Perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress salin

Fig. 20 : Perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress métallique

Fig. 21 : Perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Fig. 22 : Perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Fig. 23 : Teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress et métallique

Fig. 24 : Teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Fig. 25 : Teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Fig. 26 : Teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress salin et métallique

Fig. 27: Teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Fig. 28 : Teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Composition de la solution nutritive de **(HOAGLAND. 1938)**.

Tableau 02 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la surface foliaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress salin et métallique.

Tableau 03 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la surface foliaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 04: Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la surface foliaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 05 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) du volume racinaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress salin et métallique.

Tableau 06 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) du volume racinaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 07 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) du volume racinaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné de (NaCl 3% + CuSo₄.5H₂O).

Tableau 08: Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) des longueurs des tiges des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress salin et métallique

Tableau 09 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de longueur des tiges des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 10 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de longueur des tiges des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 11 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la teneur en eau des plantes de *Atriplex canescens* mesurée après le stress salin et métallique.

Tableau 12 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la teneur en eau des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 13 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de la teneur en eau des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 14 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress salin

Tableau 15 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress métallique

Tableau 16 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 17 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens*(Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 18 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress salin

Tableau 19 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress métallique

Tableau 20 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 21 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 22 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress et métallique.

Tableau 23 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 24 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 25 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$)des teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress saline et métallique.

Tableau 26:Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 27 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

LISTE DES PHOTOS

Ph.1: le site expérimental (Originale 2016).

Ph.2 : les étapes de Préparation des pots.

Ph.3 : la graine de *Atriplex Canescens* (Purch) Nutt.

Ph.4 : les graines de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt dans la tourbe.

Ph.5 : Plantules repiquées de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après un mois.

Ph.6: peser 0.5g de matériel végétal séché.

Ph.7 : les creusets dans le four à 500°C pendant 2 h.

Ph.8 : le creuset sorti du four.

Ph.9: ajout de 2ml d'HCl en intervalle de 30min.

Ph.10 : filtration des solutions.

Ph.11: la lecture par le Spectrophotomètre à flamme .

Ph.12: dispositif expérimental adopté au stress de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt.

LISTE DES ABREVIATION

C° : Degré Celsius

cm : Centimètre

cm² : Centimètre carré

CR : Capacité de Réention

Cu⁺⁺ : Cuivre

CuSO₄ : Sulfates de Cuivre

ETM : Elément Trace Métallique

Fig. : Figure

g : Gramme

h: heure

Hcl : Chlorure d'Hydrogène

K⁺: ion de potassium

Km : Kilomètre

l : Litre

LR : Longueur des Racines

LT : Longueur des Tiges

mf : Matière fraîche

mg : milligramme

min : minute

ml : Millilitre

mm : Millimètre

MS : Matière sèche

N : normalité

Na⁺ : ion de sodium

NaCl : Chlorure de Sodium

NS : non significatif

Pf : poids frais

Pi : Poids initial

PPT : poids en pleine turgescence

Ps : poids sec

RWC : Relative Water Content

RWL : Relative Water Loss (transpiration)

SF : Surface foliaire

SPSS : Statistical Package of Social Science

TE : Teneur en eau

V:volume

SOMMAIRE

Introduction	1
I.1 Généralités sur la salinité	3
I.1.1 Définition.....	3
I.1.2. Origine des sols salés	3
I.1.2.a La salinisation primaire	3
I.1.2.b La salinisation secondaire.....	3
I.1.3 - Classification des sols salés.....	4
I.1.3-1 Les sols salins:	4
I.1.3-2 Les sols alcalins:	4
II - La salinité et la plante	5
II.1 le stress.....	5
II.1.1 Définition du stress	5
II.1.2 Catégories du stress	5
II.1.2-a Stress biotique	5
II.1.2-b Stress abiotique.....	5
II.1.3 Conséquences de la salinité sur la plante	6
II.1.3.1 Effets du stress salin sur la plante	6
II.1.3.1.a Sur la germination :	6
II.1.3.1.b Sur l'absorption.....	7
II.1.3.1.c Sur la croissance et le développement	7
II.1.3.1.d Sur le comportement biochimique de la plante.....	7
II.1.4 Mécanismes de résistance à la salinité	7
II.1.4.1 tolérance des plantes au stress salin	7
II.1.4.2 L'adaptation du plant à la salinité	8
II.1.4.2.a Adaptation morphologique	8
II.1.4.2.b Adaptation anatomique.....	9
III La Pollution et l'environnement.....	10
III.1 La phytoremédiation.....	10
III.1.1 La phytoextraction.....	12
III.1.1.a Phytoextraction induite	12
III.1.1.b Phytoextraction continue.....	12

III.1.2 La phytostabilisation.....	12
III.1.3 La phytovolatilisation	13
III.1.4 La phytodégradation	13
III.1.5 Avantages de la phytoremédiation	13
III.1.6 Inconvénients de la phytoremédiation	14
III.2 Généralités sur les métaux lourds.....	15
III.2.1 Cuivre:	15
III.2.1.1 Propriétés Physico-chimiques du cuivre	15
III.2.1.2 Propriétés Biologiques	15
III.2.1.3 Utilisation.....	16
III.2.2 Effet du cuivre sur la plante	16
III.2.2.1 Les parties aériennes	17
III.2.2.2 Les parties racinaires	17
IV. Les Atriplex.....	19
IV.1 Présentation du genre atriplex.....	19
IV.2 Présentation de l'atriplex canescens	20
IV.2.1 Origine.....	20
IV.2.2 Description.....	20
IV.3 Répartition des Atriplex	21
IV.3.1 Propriétés écologiques de l'Atriplex	21
IV.3.2 Intérêt de l'Atriplex canescens	21
IV.3.2.1 Intérêts économiques et écologiques	22
IV.3.2.1.a Mise en valeur des sols pauvres.....	22
IV.3.2.1.b Mise en valeur des sols salés.....	22
IV.3.2.2 Intérêt fourrager.....	22
IV.4 L'utilisation des atriplex en phytoremédiation	22
V. Matériels et Méthodes	24
V.1 Matériel végétal.....	24
V.2 Méthodes.....	24
V.2.1 Dispositif expérimental.....	24
V.2.2 Préparation du matériel de culture	25
V.2.2.1Préparation du substrat de culture.....	25
V.2.2.2 Préparation des pots et repotage du sable.....	25
V.2.3 Germination	26

V.2.4 Repiquage	26
V.2.5 Préparation des solutions d'arrosage	27
V.2.5.1 la solution nutritive	27
V.2.5.2 la solution de stress	27
V.2.5.3 la solution de sulfates cuivre	28
V.2.5.4 la solution combinée de sel et de sulfates de cuivre	28
V.2.6 Application du stress.....	28
V.3 Prélèvement et préparation du matériel végétal	29
V.4 Analyse du matériel végétal.....	29
V.4.1 Paramètres biométriques	29
V.4.1.1 Mesure de la surface foliaire	29
V.4.1.2 Mesure la longueur des tiges	29
V.4.1.3 Mesure du volume des racines	29
V.4.2 Paramètres physiologiques.....	30
V.4.2.1 la teneur en eau	30
V.4.2.2 La teneur relative en eau (RWC) de la feuille	30
V.4.2.3 La perte d'eau par transpiration de la feuille (RWL= Relative Water Loss)	30
V.4.3 Extraction des éléments minéraux	31
V.4.3.1 Le potassium	32
V.4.3.2 Le sodium.....	32
V.5 Analyse statistique.....	32
VI. Résultats et interprétations.....	36
VI.1 Paramètres biométriques.....	36
VI. 1.1 Surface foliaire.....	36
VI. 1.2 Volume racinaire	39
VI. 1.2 Longueur des tiges.....	42
VI. 2 Paramètres hydriques	44
VI. 2.1 Teneur en eau	44
VI. 2.2 RWC.....	47
VI. 2.3 RWL.....	51
VI. 3 Paramètres minérales.....	58
VI. 3.1 Sodium :.....	58
VI. 3.2 Potassium.....	62
DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALE	66



Synthèse bibliographique

INTRODUCTION

La salinisation est le processus majeur de la dégradation des terres, en moyenne le monde perd 10 hectares de terres cultivables par minute, dont 3 hectares à cause de la salinisation, 10 à 15% des surfaces irriguées (20 à 30 millions d'hectares) souffrent, à des degrés divers, de problème de salinisation (**Mermoud, 2006**) .

Les zones arides et semi-arides couvrent une grande partie des pays du bassin méditerranéen, dans ces régions, la disponibilité des eaux, leur salinité et celle des sols, sont parmi les principaux facteurs limitant la productivité végétale (**Zid et Grignon, 1991**).

Le problème de la salinisation des terres impose la réflexion sur les stratégies à entreprendre pour comprendre les mécanismes d'adaptation aux nouvelles conditions de l'environnement, parmi ces mécanismes :

L'introduction des espèces tolérantes au stress salin, est l'une des techniques utilisées pour faire face à ce problème.

La caractérisation physiologique de la tolérance des végétaux à la salinité résulte des processus qui permettent au végétal d'absorber l'eau et les sels minéraux à partir de substrats à faibles potentiels hydriques, mais aussi de vivre en acceptant la présence importante de sels dans ses tissus.

Les halophytes qui accumulent le plus de sels, en particulier le chlorure de sodium (NaCl), se signalent ainsi par une forte capacité d'élaboration de composés organiques, ce qui permet le maintien d'une haute pression osmotique interne qui favorise les échanges d'eau entre les compartiments externes et cellulaires (**Guerrier, 1984**).

Depuis plusieurs siècles, il a été démontré que la présence de certains métaux lourds (Cuivre ou autres) dans les sols conduit à une croissance et une coloration anormale des plantes.

Il nous semble intéressant dans la mesure où ces phénomènes résultent d'une accumulation de certains cations, d'utiliser des végétaux pour détoxifier les sols pollués par des métaux lourds.

L'accumulation du cuivre dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux (**Wang et al., 2003**), il peut également être absorbé directement par le biais de la chaîne alimentaire entraînant alors des effets chroniques ou aigus (**Auboiroux et al., 1996 ; Arfaoui et al., 2008**).

La valorisation et la requalification des sites pollués peut se faire par une alternative de traitement qu'est la végétalisation à partir d'espèces particulières et tolérantes aux pollutions (**Henri-Charles et al., 2001**).

Notre objectif majeur est de déterminer les interactions entre les deux stress que sont (salinisation et cuivre) sur les paramètres biométriques, hydriques et minérales.

De cet objectif se dégagent deux questions scientifiques majeures sur lesquelles s'appuient nos travaux de recherche :

- Les métaux lourds, dans notre cas le cuivre, a-t-il une influence sur les plantes halophytes « phytoremédiatrices »?
- Quelle est la contribution du cuivre sur les paramètres biométriques, hydriques et minéraux de l'*Atriplex canescens* (Purch) Nutt, dans un milieu salin?

Ce travail comporte deux grandes parties :

- La première partie concerne la synthèse bibliographique sur la salinisation, la phytoremédiation, l'espèce du genre *Atriplex canescens* (Purch) Nutt et le cuivre.
- La deuxième partie est consacrée au protocole expérimental adopté pour la réalisation de notre travail.
- Enfin la troisième partie concerne les résultats et discussion.

I.1 Généralités sur la salinité

I.1.1 Définition

Plusieurs auteurs ont défini la salinité des sols comme étant la présence de concentrations excessives de sels solubles, ou lorsque ces dernières en Na, Ca, Mg sous forme de chlorures, carbonates, ou sulfates, sont présentes en concentrations anormalement élevées (ASLOUM., 1990). La salinité des sols et de l'eau, est l'un des principaux facteurs abiotiques qui limitent la productivité végétale et le rendement agricole (AL-KARAKI, 2000;BAATOOR et al., 2004(ZID et GRIGNON., 1991; ZHU., 2001).

I.1.2. Origine des sols salés

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. (CHERBUY., 1991).

I.1.2.a La salinisation primaire

Elle est d'origine géologique, marine ou lagunaire, elle 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.

Les sels solubles peuvent provenir de l'altération des roches volcaniques (SERVANT., 1975) : salinisation marine et lagunaire, l'origine des sels peut se trouver dans les dépôts lagunaires ou matériaux salés, plus ou moins récents, qui peuvent être eux-mêmes des roches mères des sols et fournir leurs sels aux Oueds qui les transportent jusqu'aux nappes superficielles plus ou moins profondes sous les sols des vallées et basses plaines (GAUCHER et BURDIN., 1974). Ou l'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques et magnésiques. En région arides et semi-arides, ces sols se concentrent sur place dans les dépressions fermées.

I.1.2.b La salinisation secondaire

La pratique de l'irrigation représente l'une des plus importantes causes de la salinisation secondaire. Dans les zones à climat aride et semi-aride on a constaté que les terres irriguées affectées par la salinité correspondent à 27% de la surface irriguées dans le monde, (HAMDY et al (1995) (SZABLOCS., 1994).

I.1.3 - Classification des sols salés**I.1.3-1 Les sols salins:**

Ils 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 chlorures et de sulfates de sodium, calcium et magnésium. Ces sols sont généralement dominants dans les régions arides et semi - arides.

I.1.3-2 Les sols alcalins:

Ils 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 subhumide.

II - La salinité et la plante

II.1 le stress

II.1.1 Définition du stress

Selon **DUTUIT et al (1999)**, le stress est le dysfonctionnement (rupture d'un équilibre fonctionnel) produit dans un organisme ou dans un système vivant, par exemple par une carence. Le stress est un ensemble de conditions qui provoquent des changements de processus physiologiques résultant éventuellement en dégâts, dommages, blessures, inhibition de croissance ou de développement. D'après **JONES et al (1989)**: "C'est une force ou influence hostile qui tend à empêcher un système normal de fonctionner".

II.1.2 Catégories du stress

- On distingue deux grandes catégories de stress :

II.1.2-a Stress biotique

Imposé par d'autres organismes (insectes, herbivores ...).

II.1.2-b Stress abiotique

Les températures extrêmes, la salinité, parmi les conditions environnementales qui peuvent causer un stress abiotique, on distingue : les inondations, la sécheresse, les basses ou hautes températures, la salinité excessive des sols ou des eaux, la présence d'un minéral inadéquat dans le sol, cas des métaux lourds, l'excès de lumière qui stimule la photo inhibition, le cas de faible éclaircissement, les radiations(UV), les composés phytotoxiques comme l'ozone qui est un haut réacteur oxydant, la pollution de l'air, les produits oxydés formés à partir des réactions de pesticide , la sécheresse, le froid et la salinité sont les stress les plus fréquents et les plus étudiés. Ils peuvent imposer aux plantes de la modification métabolique, physiologique et phréologique. Le stress peut déclencher plusieurs réponses à plusieurs niveaux de la plante.

Ces mêmes auteurs précisent que, les conséquences d'un stress salin peuvent résulter de trois types d'effets que le sel provoque chez les plantes :

- **Le stress hydrique** : une forte concentration saline dans le sol est tout d'abord perçue par la plante comme une forte diminution de la disponibilité en eau.
- **Le stress ionique** : en dépit d'un ajustement osmotique correct, la toxicité ionique survient lorsque l'accumulation de sels dans les tissus perturbe l'activité métabolique.

➤ **Le stress nutritionnel** : des concentrations salines trop fortes dans le milieu, provoquent une altération de la nutrition minérale, en particulier vis-à-vis des transporteurs ioniques cellulaires. Le sodium entre en compétition avec le potassium et le calcium, et le chlorure avec le nitrate, le phosphore et le sulfate.

II.1.3 Conséquences de la salinité sur la plante

L'eau est une ressource indisponible pour les végétaux (CALU, 2006). Sa présence est une condition incontournable pour que toute plante puisse se développer et assurer ses fonctions physiologiques vitales. Cependant, suivant le milieu naturel, cette ressource n'est pas toujours facile d'accès dans le sol. Ainsi les plantes présentes sur des surfaces sèches et salées vont se retrouver exposées à un stress hydrique important, contre lequel elles doivent lutter pour survivre (CALU, 2006).

Dans le cas d'un stress salin, une double problématique se pose à l'organisme végétal : d'un côté, la présence de sel, en abaissant le potentiel hydrique du sol, menace l'approvisionnement en eau de la plante et de l'autre, l'absorption de sel dans les tissus menace le bon fonctionnement physiologique des cellules (GIRARD *et al.* 2005).

Face à ce danger, toutes les plantes ne sont pas égales, certaines, nommées glycophytes, ne sont pas capables de supporter la présence de sel, les halophytes, au contraire, développent des réponses physiologiques pour assurer leur approvisionnement en eau tout en préservant leur métabolisme (CALU, 2006).

II.1.3.1 Effets du stress salin sur la plante

II.1.3.1.a Sur la germination :

La germination des graines est le stade le plus sensible au stress salin et hydrique (BOULGHALAGH *et al.*,2006). On peut considérer que la plupart des plantes sont plus sensibles à la salinité durant leurs phases de germination et de levée (MAILLARD.,2001). Parmi les causes de l'inhibition de la germination en présence de sel, la variation de l'équilibre hormonal a été évoqué (UNGAR ,1991.,DABEZ *et al.*,2001). 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). La réduction du potentiel osmotique de la solution du sol empêche l'imbibition de la graine suite à une diminution des activités enzymatiques et une forte absorption de Na⁺ par rapport à K⁺, ce qui conduit à une toxicité embryonnaire et un retard dans les processus métaboliques (ADEL *et* BADER. ,2002).

II.1.3.1.b Sur l'absorption

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 de l'absorption des éléments nutritifs du sol.

II.1.3.1.c Sur la croissance et le développement

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). 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). La salinité diminue la croissance des glycophytes en modifiant l'équilibre hydrique et ionique des tissus (GREENWAY et MUNNS.,1980 ;OUERGHI et al.,1998).

II.1.3.1.d Sur le comportement biochimique de la plante

Chez diverses espèces, plus ou moins résistantes, on a observé une augmentation des sucres totaux résultant d'un blocage de la glycolyse ou du saccharose provenant d'une forte hydrolyse de l'amidon (ASLOUM., 1990). Selon HADJADJ (2009), l'accumulation des sucres solubles est importante dans les feuilles des plantes d'*Atriplex halimus* L. et d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. soumises à un stress salin. Le stress salin induit une perturbation de la composition lipidique et protéique au niveau de la membrane cellulaire.

II.1.4 Mécanismes de résistance à la salinité**II.1.4.1 tolérance des plantes au stress salin**

La caractérisation physiologique de la tolérance des végétaux à la salinité résulte de processus qui permettent au végétal d'absorber l'eau et les sels

minéraux à partir de substrats à faibles potentiels hydriques, mais aussi de vivre en acceptant la présence importante de sodium dans ses tissus; les halophytes, qui accumulent le plus de sodium (Elzam et Epstein 1969, Ruse et Epstein, 1981; in Guerrier, 1984), se signalent ainsi par une forte capacité d'élaboration de composés organiques (Mercado, 1973, Briens et Larhe, 1982; in Guerrier, 1984), ces deux facteurs permettent le maintien d'une haute pression osmotique interne qui favorise les échanges d'eau entre les compartiments externe et cellulaire (Guerrier, 1984)

Toutes les plantes ne sont pas égales face au stress salin, suivant leur biomasse en présence de sel, quatre grandes tendances ont été discernées .

- **Halophytes vraies:**

Dont la production de biomasse est stimulée par la présence de sel. Ces plantes (Atriplex sp. Salicornia sp, Sueda sp.) présentent des adaptations poussées et sont naturellement favorisées par la salinité du sol.

- **Halophytes facultatives:**

Présentent une légère augmentation de biomasse à des teneurs faibles en sels: *Plantago maritima, Aster tripolium....*

- **Halophytes non résistantes:**

Supportent de faibles concentrations en sels : *Hordeum sp...*

- **Halophobes:**

Sensibles à la présence du sel : *Phaseolus vulgaris....*

II.1.4.2 L'adaptation du plant à la salinité

II.1.4.2.a Adaptation morphologique

La succulence, qui se traduit par une accumulation d'eau dans les cellules constitutives des tissus des organes aériens, est l'un des caractères les plus communs aux halophytes. La succulence des cellules foliaires augmente, se traduisant par une augmentation de l'épaisseur des feuilles sont l'une des modifications qui apparaît de façon plus importante chez les espèces les plus tolérantes. On note de plus la réduction de la surface foliaire, par exemple chez *Cressacretica* et *Tamarix gallica* (RAACHE et KARBOUSSA., 2004); la présence d'une cuticule épaisse et l'apparition plus précoce de la lignification de quelques organes à la fin de leur cycle de vie (POLJAKOFF-MAYBER., 1988; RAACHE et KARBOUSSA., 2004).

II.1.4.2.b Adaptation anatomique

Des modifications anatomiques apparaissent au niveau des différents organes lors d'un stress salin. Selon **POLJAKOFF-MAYBER (1988)**, on observe des modifications du cortex qui, chez les halophytes est constitué de deux à trois couches de cellules seulement, ainsi qu'une diminution du diamètre de la stèle au niveau des racines du blé et chez la tige de la tomate, où le cortex devient épais alors que le nombre de vaisseaux conducteurs diminue.

D'autres modifications s'observent sous l'effet de la salinité comme la raréfaction des stomates, la présence de tissus de soutien, et l'abondance du parenchyme aquifère (**BENHAMIDA et DJEGHBALA., 2005**).

Certaines plantes peuvent développer différentes stratégies qui leur permettent de réguler les concentrations internes en ions. Lors d'un stress salin, les halophytes sont capables de compartimenter les ions Na^+ et Cl^- au niveau vacuolaire.

Certaines halophytes possèdent des structures spécialisées, appelées « glandes à sel », constituées d'une à plusieurs cellules, sont souvent protégées par une mince cuticule perforée de pores, situées au niveau des cellules épidermiques des feuilles et des tiges, ayant pour rôle d'excréter le sel, lorsque la charge minérale des tissus est excessive (**THOMSON., 1975**), c'est le cas du tamarix.

III La Pollution et l'environnement

La pollution des eaux et des sols accidentelle ou volontaire, par certains produits chimiques d'origine industrielle (phosphates, métaux lourds, hydrocarbures, phénols, colorants...) ou d'origine agricole (pesticides, engrais) constitue une source de dégradation de l'environnement.

L'essentiel c'est qu'on attache aujourd'hui une importance à la protection des milieux naturels par la phytoremédiation.

III.1 La phytoremédiation

La phytoremédiation est l'utilisation des plantes pour absorber, dégrader ou immobiliser les contaminants du sol. Cette technique est considérée comme très prometteuse pour la remédiation des sites pollués. Elle peut être utilisée pour dépolluer des surfaces contaminées par des polluants qui sont présents dans le sol, dans l'air et dans l'eau (**Salt et al., 1998**). La phytoremédiation est une technologie innovatrice peut être plus rentable que les méthodes mécaniques ou chimiques alternatives. La phytoremédiation est un cas particulier de la « bioremédiation » qui consiste à l'emploi d'êtres vivants pour réhabiliter des sols ou des eaux polluées contaminées par divers polluants (organiques et inorganiques) (**Judicaëlle, 2008**).

Elle est un ensemble de technologies utilisant les plantes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques (naturels ou de synthèses) polluants du sol, de l'eau ou de l'air provenant d'activités humaines. Cette méthode de dépollution ne laisse que très peu d'espoir car elle n'est efficace que si la plante absorbe rapidement et en grande quantité le polluant.

Il existe plusieurs classifications pour les techniques de phytoremédiation.

Nous citons ici les plus employées: La phytoextraction.

La phytostabilisation.

La phytovolatilisation.

La phytodégradation.

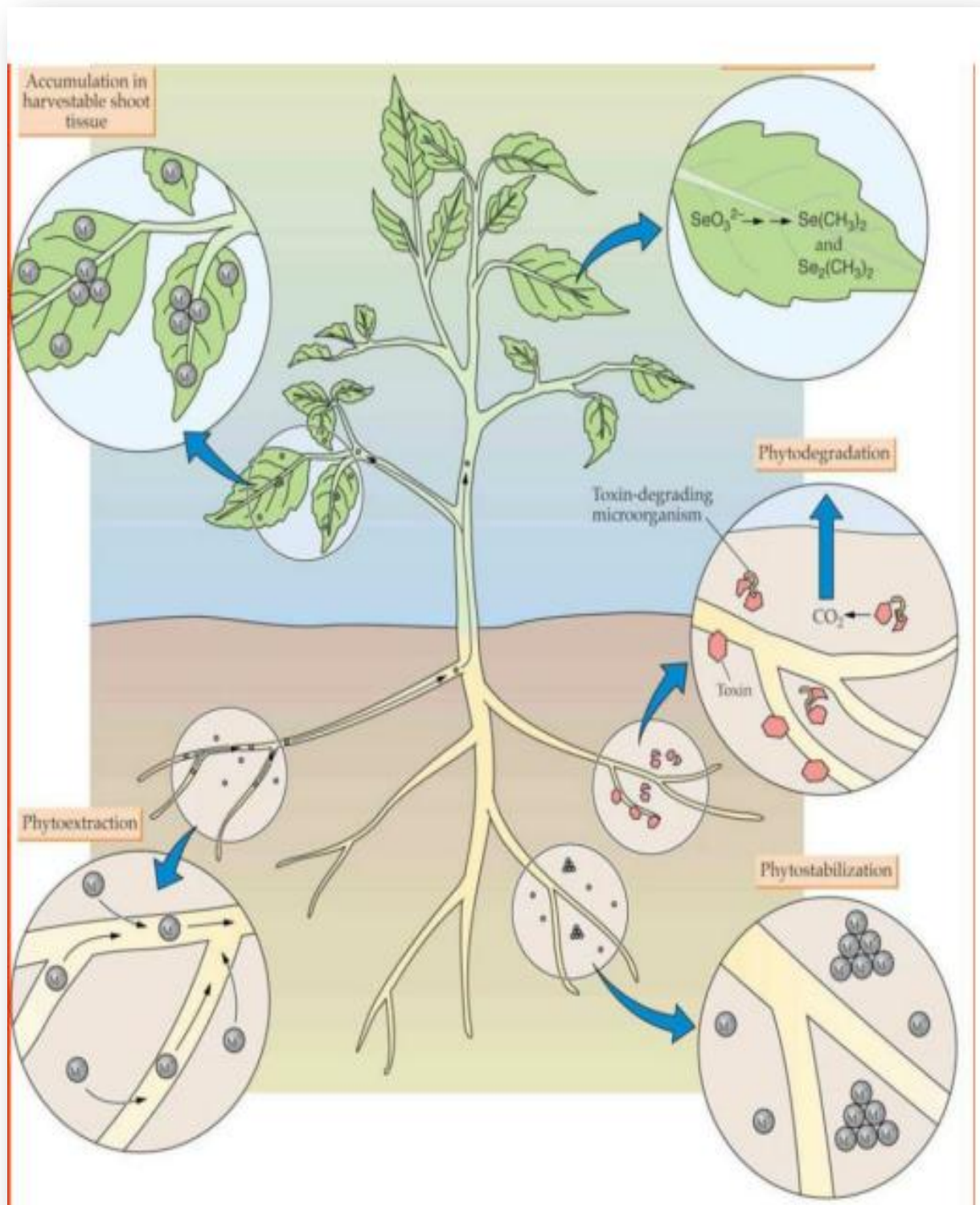


Fig. 1: Les différents types de la phytoremédiation.

III.1.1 La phytoextraction

C'est la voie dans laquelle les chercheurs se sont le plus investis depuis le début de cette décennie. La phytoextraction utilise des plantes capables de prélever les éléments traces toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées puis incinérées. Les cendres seraient alors mises en décharge ou mieux, réutilisées en métallurgie.

Deux stratégies sont actuellement développées dans la phytoextraction. Il y a d'une part la phytoextraction assistée par des chélateurs des métaux, cette méthode est désignée également par la « phytoextraction induite », et d'autre part la phytoextraction continue (Jemal et Ghorbal, 2002).

III.1.1.a Phytoextraction induite

La phytoextraction induite se fait en présence de chélateurs et de plantes à forte biomasse et à croissance rapide. Lorsque la plante a atteint un certain niveau de croissance, les chélateurs de métaux sont appliqués au sol. Ceux-ci permettent d'induire l'accumulation de métaux lourds dans la plante par augmentation de la biodisponibilité de l'élément ciblé.

III.1.1.b Phytoextraction continue

Contrairement à l'absorption induite par des chélateurs, la phytoextraction continue est basée sur les capacités génétiques et physiologiques des plantes spécialisées dans l'absorption, la translocation et la tolérance des métaux lourds. On parle de « plantes hyperaccumulatrices ».

III.1.2 La phytostabilisation

C'est l'utilisation des plantes pour éviter la mobilisation (et le lessivage) des polluants présents dans les sols pollués. Cette technique est basée sur les conditions physico-chimiques qui génèrent les racines des plantes dans le sol pour contribuer à stabiliser des polluants. Il peut être également mis sous ce terme, la capacité de certaines plantes plus résistantes aux polluants que d'autres à se développer sur des sols usuellement stériles, favorisant par le développement de leurs racines et leurs couvert végétal, une stabilisation physique du sol qui limite l'entraînement superficiel du sol polluée. (Anonyme, 2004).

III.1.3 La phytovolatilisation

Cette technique utilise les plantes pour extraire les métaux lourds puis les éliminer par évapotranspiration via les stomates des feuilles ou les tiges. Parmi les métaux lourds, seuls le mercure et le sélénium sont adaptés à cette technique. La possibilité d'y inclure l'arsenic n'est pas à écarter. Une fois volatilisés, les polluants se dispersent dans l'atmosphère à des concentrations qui, normalement, ne représentent plus un danger pour l'homme. La phytovolatilisation présente également l'avantage de ne pas nécessiter de récolte de la biomasse puisque les contaminants sont dispersés dans l'atmosphère. (**Pilon-Smits, 2005 ; Anonyme, 2009; Dechamp et Meerts, 2003; Bert et Deram, 1999**).

III.1.4 La phytodégradation

La phytodégradation ou phytostimulation est l'utilisation de plantes pour dégrader les polluants organiques difficilement biodégradables tels que les hydrocarbures. Les deux termes sont souvent mélangés mais il existe une distinction. En effet, la phytodégradation est la dégradation des composés par le métabolisme de la plante alors que la phytostimulation est la stimulation de la flore du sol capable de dégrader les composés organiques. Les plantes peuvent croître sur un sol contaminé par les hydrocarbures jusqu'à un certain seuil. Une concentration de 7 tonnes par hectare permet une croissance normale de la plante et un rythme de dégradation élevé par les micro-organismes se développant dans la rhizosphère (**Chaîneau et al., 2000**).

III.1.5 Avantages de la phytoremédiation

Avec la phytoremédiation, l'activité biologique et la structure du sol sont préservées. Cette technique s'inscrit donc dans une démarche de développement durable et est mieux perçue par le public que les techniques classiques (**Dechamp et Meerts, 2003**).

La phytoremédiation garantit un couvert végétal qui participe à la beauté du paysage et qui freine l'érosion du sol et le lessivage des particules du sol tout en assurant une augmentation des infiltrations (**Dechamp et Meerts, 2003**). Ce couvert végétal permet de réduire le déplacement des polluants dans l'air, l'eau ou le sol, puisqu'ils sont maintenus près ou dans les plantes (sauf dans le cas de la phytovolatilisation).

Le coût de la phytoremédiation est faible : celui-ci est estimé de 10 à 100 fois moins coûteux que les techniques classiques (**Bert et Deram, 1999**). La phytoremédiation requiert moins d'équipement et de travail que les autres méthodes puisque ce sont les plantes qui font la plupart du travail. Le faible coût de la phytoremédiation combiné avec les fonds disponibles limités pour l'assainissement de l'environnement, a renforcé la popularité de cette technique (**Pilon-Smits ; 2005**).

III.1.6 Inconvénients de la phytoremédiation

Les inconvénients des techniques de phytoremédiation sont encore nombreux. Ils sont liés à un manque de connaissances mais aussi à la difficulté inhérente à la gestion d'un matériel vivant.

Pour appliquer les techniques de phytoremédiation, il est nécessaire, à travers des analyses préalables, de s'informer le mieux possible sur les propriétés physico- chimiques du terrain : type de sol (caractéristiques minéralogiques, granulométriques, microbiologiques, écotoxicologiques...etc.), type de contaminants, concentration, distribution, biodisponibilité des contaminants...etc. Cependant, il semble qu'une des difficultés rencontrées lors de la réalisation d'études sur la phytoremédiation est la détermination de la mobilité et l'évaluation de la biodisponibilité des métaux lourds.

La phytoremédiation doit, dans certains cas, être précédée d'un travail du sol, d'une décompaction, de l'homogénéisation des polluants dans le sol. L'utilisation des plantes suppose également une éventuelle fertilisation du sol souvent pauvre en éléments nutritifs majeurs, des traitements pour les plantes (herbicides, protection contre les ravageurs ou les maladies)...etc. Dans le cas de la phytostabilisation, une fertilisation raisonnée du sol permettra de compenser l'éventuelle immobilisation d'éléments nutritifs essentiels concomitante à celle des polluants et susceptible d'entraîner des carences.

Les techniques de remédiation conventionnelle sont des techniques efficaces mais coûteuses et destructrices. Les techniques de phytoremédiation sont moins efficaces mais aussi moins coûteuses et destructrices. Cependant, les techniques de phytoremédiation prennent du temps et s'appliquent principalement aux contaminations moyennes à faibles et peu profondes.

III.2 Généralités sur les métaux lourds

Les métaux lourds sont les éléments métalliques naturels dont la masse volumique dépasse 5g/ml. 50 éléments du tableau périodique sont classés métaux lourds, 17 entre eux sont considérés comme très toxiques mais 13 sont classés polluants prioritaires ce sont (l'antimoine, l'arsenic, le béryllium, le cadmium, le chrome, le plomb, le mercure, le nickel, le sélénium, l'argent, le thallium, le zinc et le cuivre).

III.2.1 Cuivre:**III.2.1.1 Propriétés Physico-chimiques du cuivre**

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique **29**, sa masse atomique est de 63.546 g/mole.

C'est un métal malléable et ductile, et présente sur ses surfaces fraîches une teinte rosée à pêche, excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité, très peu altéré dans ses propriétés fonctionnelles par l'exposition à l'air sec.

Le cuivre existe dans la croûte terrestre avec une concentration d'environ 50 mg / kg. Les principaux minerais du cuivre sont : soit les sulfures, comme la covelline (CuS), le chalcocite (Cu₂S), la chalcopirite (CuFeS₂), et la bornite (Cu₃FeS₃), soit des oxydes comme la malachite (Cu₂CO₃(OH)₂), le chrysocolle (CuSiO₃.2H₂O) et la chalcanthite (CuSO₄.5H₂O).

III.2.1.2 Propriétés Biologiques

À très faible dose, le cuivre est un élément essentiel chez l'homme et l'animal, impliqué dans de nombreuses voies métaboliques, notamment pour la formation d'hémoglobine et la maturation des polynucléaires neutrophiles. De plus, il est un cofacteur spécifique de nombreuses enzymes et métalloprotéines de structure (**OMS ICPS, 1998**). Il a une importance capitale dans l'entretien des processus biologiques. Chez les mollusques, le sang renferme un pigment respiratoire à base de cuivre : l'hémocyanine.

III.2.1 .3 Utilisation

Le cuivre est l'un des métaux les plus employés à cause de ses propriétés physiques et de sa conductibilité électrique et thermique.

A l'état métal, il est principalement employé en électricité, en métallurgie pour la composition d'alliages.

Sous forme de sels cuivreux ou cuivrique, on l'utilise dans l'industrie, en agriculture ou enfin en pharmaceutique (**Lamand, 1992 cité par Cassereau, 2001**). Dans le domaine industriel, le cuivre peut servir de catalyseur, comme stabilisant chimique ou en électrolyse, il peut entrer dans la composition de pigments, sert en photographie, enfin, il peut être un agent anti-rouille ou de préservation du bois.

En agriculture, le cuivre entre dans la composition de produits tels que les fongicides ou insecticides avec par exemple la bouillie bordelaise utilisée pour le traitement des vignes. Enfin il peut être utilisé comme antiseptique externe (**Cassereau, 2001**).

III.2.2 Effet du cuivre sur la plante

Le cuivre joue un rôle déterminant dans la formation des protéines. Il régule différents processus enzymatiques des tissus végétaux, principalement l'oxydase, qui influence à son tour le métabolisme de l'azote. On peut donc dire que le cuivre a un rôle très important dans le métabolisme de la plante.

Le cuivre est assimilé par les plantes sous forme de Cu^{++} et vraisemblablement aussi sous forme de complexes organiques contenant peu de molécules, et en partie à partir de complexes inorganiques.

La concentration la plus faible de cuivre dans le sol pour laquelle des effets phytotoxiques ont été observés est de $50 \text{ mg Cu/kg l}^{-1}$ de sol sec; Les symptômes typiques de la toxicité du cuivre chez les plantes incluent l'apparition de feuillage vert foncé suivie par l'induction d'une chlorose ferrique, des racines épaisses, courtes ou barbelées et un enracinement réduit.

Des teneurs très élevée de cuivre dans le sol inhibe la croissance des racines et diminue le rendement des récoltes. Le feuillage présente une chlorose proche de celle observée lors d'une carence en fer. Le cuivre en excès endommage le plasmalemme.

Dans le sol le cuivre réagit avec le fer, ce qui provoque une carence en fer pour la plante (chlorose). Il réduit l'activité microbienne dans le sol et donc la vitesse de décomposition de la matière organique dans celui-ci.

III.2.2.1 Les parties aériennes

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 (**Cook et al. 1997**). Il y apparition de symptômes tels que les chloroses, les nécroses sur limbe supérieur des feuilles et l'épinastie.

Les chloroses seraient dues à des modifications de l'homéostasie d'éléments essentiels comme le Fe (**Chatterjee&Chatterjee 2000**). Les feuilles jaunissent et des spots marron apparaissent sur le limbe, c'est une réponse « dose – dépendante » .

Des symptômes similaires sont retrouvés chez l'orge . En stress, la transpiration de la plante augmente et le contenu en eau est plus faible. Les feuilles sont petites, crispées et ont une teinte vert foncé, c'est le « bronzing » et elles ferment leurs stomates pour limiter les pertes en eau et les chloroplastes sont altérés ou dégradés (**Chatterjee&Chatterjee 2000**).

III.2.2.2 Les parties racinaires

En excès de cuivre, la longueur des racines diminue ; il y a apparition de nécroses, de malformations (**Cook et al. 1997**), modification du sens de croissance des racines qui poussent pour s'éloigner de la contamination (**Archambault &Winterhalder 1995**) et modification de l'architecture du système racinaire.

Les racines sont rabougries, épaisses et deviennent marrons pour une concentration supérieure à $1\mu\text{M}$ dans la solution nutritive. La cuticule des racines est plus épaisse, plus cassante et marron, en particulier au niveau des méristèmes, il y a moins de poils absorbants et le système racinaire est déformé.

Dans le cas d'une exposition au Cu par la solution du sol, les plantes concentrent d'abord le Cu dans les racines et ce sont les organes qui subissent en premier les impacts du Cu et qui sont les plus atteints.

La diminution de la croissance des racines a pour conséquence celle de la surface de prélèvement de la plante et donc une diminution du prélèvement en eau et nutriments **(Brun et al. 2003)**.

L'inhibition de la croissance racinaire peut s'expliquer par les processus de lignification. Quand le Cu est en excès dans les cellules des racines la concentration en H_2O_2 et les quantités de peroxydases impliquées dans la synthèse de la lignine augmentent.

L'augmentation de la lignine peut engendrer une diminution de l'accessibilité du Cu aux cellules. La lignine peut aussi se lier avec les polysaccharides des parois cellulaires, ce qui va les rigidifier et gêner la croissance des cellules.

IV. Les Atriplex

IV.1 Présentation du genre *Atriplex*

Les plantes du genre *Atriplex* sont des halophytes présentes dans la plupart des régions du globe. Ce sont des plantes qui poussent sur des terrains riches en chlorures et nitrates (terrains salés) (**LE HOUEROU., 1992**).

Ces plantes élèvent leur concentration osmotique à un niveau supérieur à celui du sol et accumulent une grande quantité de sels. Les *Atriplex* semblent actuellement les plantes les mieux adaptées pour stabiliser et augmenter la production fourragère en climat semi-aride et aride. Ils sont susceptibles de mettre en valeur des terres où la végétation naturelle est profondément dégradée et la production agricole très irrégulière, ou encore des terres chargés en sels sur lesquelles peu d'espèces peuvent se développer.

Leur production fourragère, bien qu'ayant un maximum en fin de printemps, peut être exploitée dans certains milieux presque, toute l'année (**FROMENT., 1972**).

L'*Atriplex* est une plante arbustive, appartenant à la famille des Amarantacées qui comprend 1400 espèces, réparties en une centaine de genres. Le genre *Atriplex* comprend environ 417 espèces dans le bassin méditerranéen (**LE HOUEROU, 1992**). En Afrique du nord, le genre *Atriplex* comprend 15 espèces spontanées et 2 espèces introduites, soit 07 espèces vivaces, 01 bisannuelle et 09 annuelles (**FARNCLET et LE HOUEROU, 1971**). Par ailleurs, (**MAIRE 1962**), a identifié une dizaine d'espèces en Algérie dont les plus répandues sont: *Atriplex halimus* et *Atriplex portulacata*.

Parmi les espèces le plus ou moins vulgarisées, cinq seulement présentent un réel intérêt pratique : *Atriplex halimus*, *Atriplex canescens*, *Atriplex mollis*, *Atriplex glauca*, *Atriplex nummularia* (**le Houérou et pontanier, 1988**).

IV.2 Présentation de *Atriplex canescens*

IV.2.1 Origine

Plante originaire du Mexique et du Canada, elle s'est largement propagée en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Elle est cultivée dans les étages humides et sub-humides, semi arides et arides (H.C.D.S., 1996).

IV.2.2 Description

Atriplex canescens est un arbuste buissonnant de 1 à 3 m de hauteur, à port plus ou moins ériqué, formant des touffes de 1 à 3 m de diamètre.

Les rameaux blanchâtres sont étalés, ascendants, ou arqués, retombants vers l'extrémité. Les feuilles courtement pétiolées ou sub-sessiles, sont alternes, et leur limbe linéaire, lancéolé et uni nervé est vert grisâtre. Il peut atteindre 3 à 5 cm de longueur et 0,3 à 0,5 cm de largeur. Des feuilles axillaires plus petites (0,5 - 1,5 sur 0,1 - 3 cm) sont aussi présentes le long de l'axe feuillé.

Les inflorescences dioïques en épis simples ou panicules sont au sommet des rameaux pour les fleurs mâles et axillaires ou en épis sub-terminaux pour les fleurs femelles. Les graines vêtues de 4 ailes à bords denticulés, ont des dimensions de 10 à 20 mm (BENRBIHA., 1987).

On peut représenter la systématique d'*Atriplex canescens* comme suit :

- Embranchement : Spermaphytes
- Sous embranchement : *Angiospermes*
- Classe : *Dicotylédones*
- Sous- classe : *Apétales*
- Ordre : *Centrospermales*
- Famille : *Chénopodiaceae*
- Genre : *Atriplex*
- Espèce : *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt

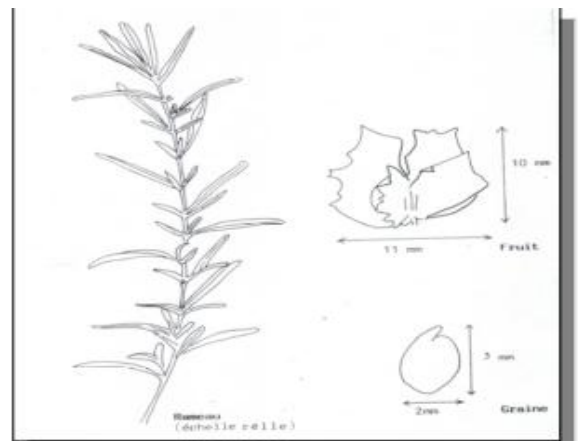


Figure02 : caractéristiques morphologiques de l'*Atriplex canescens* (Pursh) (BENREBIHA, 1987)

Dans sa terminologie originelle (Etats-Unis), il est connu sous le nom de «Forwingsaltbus», dans le sens de buisson salé. Son nom arabe est aussi le **G'ttaf**.

IV.3 Répartition des *Atriplex*

Dans le monde, les *Atriplex* se rencontrent de l'Alaska à la Patagonie, de la Bretagne à la Sibérie et de la Norvège à l'Afrique du sud (**FRANCLET et LE HOUEROU, 1971**).

En Algérie, l'*Atriplex* est spontané dans les étages bioclimatiques semi-arides et arides, les plus grandes superficies correspondent aux zones dites steppiques (Tébessa, Batna, Mssila, Boussaâda, Biskra, Djelfa, Tiaret, Saida...). Le genre *Atriplex* se rencontre aussi sur le littoral et même au Sahara, particulièrement dans la région de Béchar où les nappes longent les dépressions des Oueds (**BENREBIHA., 1987**).

IV.3.1 Propriétés écologiques de l'*Atriplex*

L'*Atriplex* supporte des températures minimales de 5 à 10 C° (**FROMENT, 1972**). L'examen de la répartition du genre *Atriplex*, montre que la plupart des espèces se situent dans les régions où les précipitations varient entre 200 et 400 mm par an (**FRANCLET et LE HOUEROU, 1971**).

Selon les mêmes auteurs, cette plante peut pousser sur des sols rocailleux et argileux et des zones d'épandage plus ou moins salées, comme elle peut se développer dans des dépressions à sol profond de texture moyenne. L'*Atriplex* est résistante en saison hivernale.

Les recherches de ont montré que les plantes d'*Atriplex* se comportent mieux dans un sol argileux que dans un sol sableux. Néanmoins, l'addition de terreau à du sable améliore nettement leur croissance.

IV.3.2 Intérêt de l'*Atriplex canescens*

L'idée d'utiliser des plantes pour extraire les métaux lourds et leurs composantes fut introduite en 1983, bien que le principe soit connu depuis 300 ans. C'est dans les années 1990 que le concept de la remédiation (bio et phyto remédiation) émerge comme une nouvelle technologie qui utilise les plantes vertes et des microorganismes associés (bactéries, champignons) pour le nettoyage d'un environnement pollué. La phytoremédiation comprend plusieurs techniques : la phytoextraction, la phytovolatilisation, la phytostabilisation, la phytodégradation et la rhizofiltration.

IV.3.2.1 Intérêts économiques et écologiques

IV.3.2.1.a Mise en valeur des sols pauvres

Les *Atriplex* sont les arbustes les mieux adaptés aux régions arides et aux sols pauvres. D'autre part, la couverture de l'*Atriplex* accroît considérablement la perméabilité des sols et l'augmentation de drainage dans les horizons superficiels.

- Fixation des dunes

L'emploi des *Atriplex* s'est révélé extrêmement efficace pour la fixation des dunes. En Algérie des essais réalisés sur le cordon dunaire dans la région de Djelfa, Boussaâda avec plusieurs espèces d'*Atriplex* semblent donner un résultat satisfaisant (BENREBIHA, 1987).

IV.3.2.1.b Mise en valeur des sols salés

Les *Atriplex* peuvent aussi "désaliniser" les sols. Elles sont donc des cultures qui peuvent être utilisées dans les régions menacées par la salinité.(BEN AHMED et al, 1996).

IV.3.2.2 Intérêt fourrager

L'*Atriplex* constitue en période de sécheresse, un fourrage apprécié des camélidés et particulièrement des ovins et des caprins (KINET et al., 1998).

Ce sont des espèces riches en matières azotées (1.5 à 3.7%) mais pauvres en énergie.

IV.4 L'utilisation des *Atriplex* en phytoremédiation

Plusieurs *Atriplex* sp. Ont des caractéristiques excellentes qui contribuent beaucoup à la réduction de l'érosion éolienne et hydrique du sol par la structure de son système racinaire (Grantz et al., 1998), et par leur port rampant et marcottant naturellement (Dutuit . , 1999).

Certains estiment qu'elle pourrait contribuer à la désalinisation des sols, dans les régions arides (Das sarma et Arora., 2001). Il est possible d'extraire d'un hectare 1100Kg de NaCl en une année de culture (le houerou ., 1971) .

De même, les espèces d'*Atriplex* annuelles sont connues pour contenir de fortes teneurs en fer, en manganèse, en aluminium et en molybdène (Voorhees et al. ,1991), ainsi que le sélénium en grandes quantités dans ce dernier cas, la plante pourrait être capable d'en assurer la volatilisation.

Les arbustes des zones salines naturelles sont coupés et utilisés pour la production importante de combustible par les habitants de ces lieux (**Lailhacar et al. , 1996**).

Dans les pays arides ou existe de vastes superficies ou l'on trouve une eau souterraine saline peu profonde : on peut y planter des espèces tolérantes au sel pour pomper cette eau profonde grâce à leur système racinaire très développé.

Les arbustes qui atteint environ 50 cm de diamètre et 6 mètres de hauteur, constituent un moyen possible d'éviter la poussière et d'améliorer à la fois les condition d'existence et l'esthétique des lieux (**Dutuit et al., 1991**).

V. Matériels et méthodes

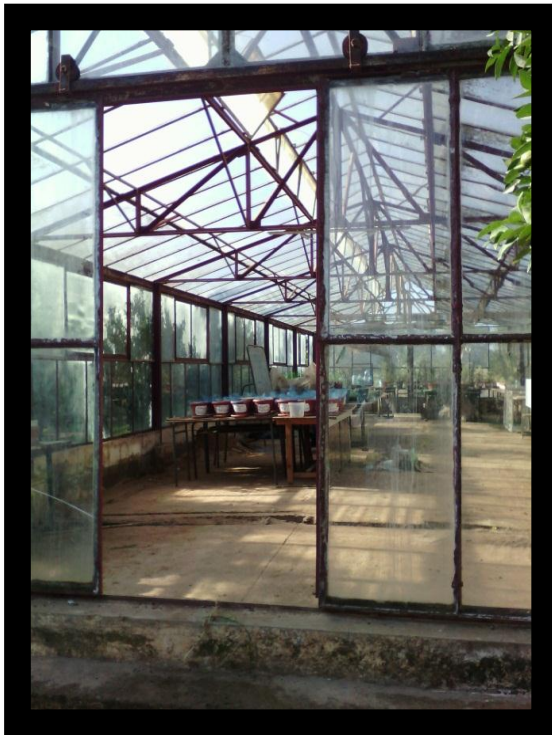
V.1 Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est composé de semences *d'Atriplex canescens* (Pursh) Nutt provenant de ((EL BAYAD)) localisées dans l'étage bioclimatique semi-aride.

V.2 Méthodes

V.2.1 Dispositif expérimental

L'étude a été réalisée dans une serre à l'exploitation de l'université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis, située à Mazagran à 5km environ de la ville de Mostaganem, cette serre est caractérisée par sa température qui varie entre 15 et 20 °c en hiver. Le dispositif expérimental adopté comprend 12 blocs (traitements) et chaque traitement est constitué d'une série de pots de 4 plantes (4 répétitions) .



Ph.1: le site expérimental (Originale 2016).

Les plantes *d'Atriplex canescens* (Pursh) Nutt sont traitées avec des compositions salines et métalliques de concentrations différentes:

- Aux sels de chlorure de sodium (NaCl) 0,5% et 3%.
- Aux sulfates de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) : 2000, 2500 et 3000 ppm.

- Aux sels de chlorure de sodium 0,5% combinés avec les sulfates de cuivre à des concentrations différentes (2000, 2500 et 3000 ppm).
- Aux sels de chlorure de sodium 3% combinés avec les sulfates de cuivre à des concentrations différentes (2000, 2500 et 3000 ppm).
- Les plantes témoins sont arrosées à la solution nutritive.

V.2.2 Préparation du matériel de culture

V.2.2.1 Préparation du substrat de culture

Le substrat de culture utilisé est le sable des dunes ayant subi :

- ✓ Un tamisage approprié afin de supprimer les différents débris et déchets dans le but d'obtenir un sable fin.
- ✓ Un traitement à l'esprit de sel pour éliminer les carbonates, les chlorures, etc...
- ✓ Des lavages successifs à l'eau ordinaire.
- ✓ Des rinçages répétés à l'eau distillée sont appliqués afin d'essayer d'éliminer toute trace de chlore.
- ✓ Et enfin, un séchage à l'air libre. Un test au nitrate d'argent a été réalisé pour vérifier la pureté du substrat concluant la limpidité de la solution.

V.2.2.2 Préparation des pots et repotage du sable

Des pots en plastique de 16 cm de diamètre et de 13.8 cm de hauteur sont remplis par une quantité de 2000 g de mélange sable et terreau (2 volumes de sable / 1 volume de tourbe). Cette valeur de poids est retenue pour déterminer la capacité de rétention de ce substrat.

La caractéristique hydrique est nécessaire car elle permet le calcul des quantités de solution nutritive à apporter lors des arrosages. Avant la mise en pot du substrat, le fond des pots est tapissé d'une couche de graviers afin d'assurer le drainage.



Ph.2 : les étapes de la préparation des pots.

V.2.3 Germination

Au laboratoire, nous avons préparé au préalable les graines en les décortiquant de leur bractée, afin de faciliter la germination. Ensuite, les graines sont sélectionnées selon leur morphologie, leur taille, leur couleur (brune) et sans leur aspect sanitaire (absence de contamination).

Celles-ci sont trempées dans l'hypochlorite de sodium à 8% pendant trois minutes (élimination éventuelle des champignons), puis elles sont rincées plusieurs fois à l'eau distillée.

Les graines sont ensuite semées dans des alvéoles pour la production de plantules. Le substrat contenu dans les alvéoles est constitué de terreau, avec de l'eau distillée, un jour sur deux, pendant au moins, un mois et demi, jusqu'au développement des plantules.



Ph.3- la graine de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.



Ph.4- les graines de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt dans la tourbe.



V.2.4 Repiquage

Au bout de quatre semaines après l'apparition des premières feuilles, les plantules sont repiquées soigneusement à raison d'une plantule par pot, puis déposées sous serre.

Tous les deux jours, ces plantules sont arrosées à la solution de (HOAGLAND ; 1938)



Ph.5 : Plantules repiquées d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après un mois.

V.2.5 Préparation des solutions d’arrosage

V.2.5.1 la solution nutritive

Au cours de l’élevage des plantes, l’arrosage se fait tous les deux jours à la solution nutritive. Elle se compose d’un ensemble de solutions mères, de microéléments et de macroéléments, rapportées dans un tableau.

Tableau 1 - Composition de la solution nutritive de (HOAGLAND. 1938) :

Composants	Nomenclature	Poids en g/l
Nitrate de potassium	KNO ₃	191.90
Nitrate de calcium	(NO ₃) ₂ Ca 4H ₂ O	129.80
Nitrate d’ammonium	NO ₃ NH ₄	210
Sulfate de magnésium	SO ₄ Mg 7H ₂ O	61.5
Phosphate mono potassique	PO ₄ H ₂ K	54.40
Di-potassium hydrogénophosphate	PO ₄ K ₂ H 3H ₂ O	34.23
Chlorure de manganèse	Cl ₂ Mn 4H ₂ O	1.80
Sulfate de cuivre	Cu SO ₄ 5H ₂ O	0.176
Sulfate de zinc	Zn SO ₄ 7H ₂ O	0.219
Acide borique	H ₃ BO ₃	2.861
Molybdate d’ammonium	MO ₇ O ₂₄ (NH ₄) 7H ₂ O	0.285
Complexe ferrique	EDTA ferrique (C ₁₀ H ₁₂ FeN ₂ NaO ₈)	0.050

V.2.5.2 la solution de stress

La solution saline est préparée avec le chlorure de sodium (NaCl) à deux concentrations 0,5% et 3%.

Préparation d’une concentration de 0.5% de NaCl :

$$\begin{array}{l}
 3\% \quad \longrightarrow \\
 0.5\% \quad \longrightarrow
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 30\text{g/l} \\
 X
 \end{array} \right\} \Longrightarrow X = (30 \cdot 0.5) / 3 = 5\text{g/l}$$

Préparation d'une concentration de 3% de NaCl :

3% \longrightarrow 30g /l

V.2.5.3 la solution de sulfates de cuivre

La solution de sulfates de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) à trois concentrations (2000, 2500 et 3000 ppm).

- La concentration 1 : 2000 ppm de ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) \longrightarrow 2 g/l
- La concentration 2 : 2500 ppm de ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) \longrightarrow 2.5 g/l
- La concentration 3 : 3000 ppm de ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) \longrightarrow 3 g/l

Remarque : 1000ppm = 1g/l

V.2.5.4 la solution combinée de sel et de sulfates de cuivre

La solution combinée de chlorure de sodium (NaCl) à 0,5% par les sulfates de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) à trois concentrations :

NaCl 0,5% $\begin{cases} \longrightarrow + 2000 \text{ ppm} \\ \longrightarrow + 2500 \text{ ppm} \\ \longrightarrow + 3000 \text{ ppm} \end{cases}$

La solution combinée de chlorure de sodium (NaCl) à 3% par les sulfates de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) à trois concentrations :

NaCl 3% $\begin{cases} \longrightarrow +2000 \text{ ppm} \\ \longrightarrow +2500 \text{ ppm} \\ \longrightarrow + 3000 \text{ ppm} \end{cases}$.

V.2.6 Application du stress

Au 90ème jour après le repiquage, nous avons appliqué le stress aux plantes le : 06 mars 2016. Il se répartit en 12 traitements, chaque traitement contient quatre répétitions.

Les plantes traitées sont arrosées trois fois par semaine, soit : Deux fois par les traitements (salin, métallique et combiné et une fois par la solution nutritive pendant un mois.

Les plantes du témoin sont arrosées trois fois par semaine par la solution de Hoagland.

V.3 Prélèvement et préparation du matériel végétal

Après avoir déterré les plantes, nous avons soigneusement séparé les tiges, les feuilles ainsi que les racines afin d'éviter toute contamination avec le substrat de culture.

V.4 Analyse du matériel végétal

Elle est réalisée par des observations et des mesures biométriques (sur les feuilles, les tiges et les racines) et hydriques (TE, RWC, RWL), et enfin le dosage de quelques cations dans les feuilles et les racines (Na⁺, K⁺).

V.4.1 Paramètres biométriques

Durant les 30 jours, les longueurs des tiges sont mesurées et les valeurs données sont les moyennes obtenues des quatre répétitions par traitement.

V.4.1.1 Mesure de la surface foliaire (Sf)

la surface foliaire (Sf) est estimée selon la méthode de **PAUL et al .,(1979)**, elle consiste à placer une feuille de papier calque, découper ses contours, puis peser la partie du calque qui représente la feuille (Pf), enfin déterminer par des pesées le poids correspondant à une surface (Sq) connue d'un carré de même papier calque et à déduire la surface de la feuille (Sf) par la formule suivante :

$$Sf (cm^2) = \frac{(Pf - Sq)}{Pq}$$

V.4.1.2 Mesure la longueur des tiges (LT)

La longueur de la tige principale est mesurée à l'aide d'une règle gradée (en cm).

V.4.1.3 Mesure du volume des racines (VR)

Il est mesuré par immersion du système racinaire dans une éprouvette graduée (en ml) remplie d'eau, selon le principe de la poussée d'Archimède, soit : Le volume d'un corps immergé est égal au volume du liquide déplacé (dénivellation).

V.4.2 Paramètres hydriques

V.4.2.1 la teneur en eau (TE)

La teneur en eau de toute la plante est la différence entre le poids frais et le poids sec (dessèchement à 80 °C pendant 48h) . Cette différence est exprimée en pourcentage par rapport à la matière sèche selon la formule suivante :

$$TE = ((PF-PS) / PF) \times 100$$

Avec : TE : teneur en eau des plants (en %)

PF : poids frais juste après récolte (en g)

PS: poids sec après séchage à l'étuve (en g)

V.4.2.2 La teneur relative en eau (RWC)

Elle est déterminée selon la méthode de (BARRS et WEATHERLEY., 1968 ; SCIPPA). Le limbe foliaire coupé à sa base, est immédiatement pesé pour déterminer le poids frais (PF). Les feuilles sont ensuite placées dans un tube à essai contenant de l'eau distillée, puis maintenu à l'obscurité à 4°C pendant 12 heures. Ces feuilles sont récupérées et essuyées délicatement avec un papier buvard et pesées à nouveau pour déterminer le poids en pleine turgescence (Ppt). Le poids sec (PS) est déterminé après passage des feuilles dans une étuve pendant 48 heures à 80°C.

La teneur relative en eau est calculée par la formule suivante proposée par (BARRS et WEATHERLEY., 1968) adoptée plus tard par (SCIPPA et al .,2004).

$$RWC (\%) = \frac{Pf - Ps}{Ppt - Ps} \times 100$$

V.4.2.3 La perte d'eau par transpiration (RWL) (Relative Water Loss)

Elle est évaluée selon la méthode de (CLARKE et MCLAIG., 1982). La feuille est coupée à la base du limbe, la partie sélectionnée est trempée immédiatement dans un tube à essai rempli d'eau distillée et placé à l'obscurité à une température de 4°C pendant 12 heures. A la pleine turgescence, les feuilles sont essuyées et pesées, ce qui constitue le poids initial (Pi). Elles sont ensuite placées sur une pailleuse au laboratoire, à température ambiante. Des pesées sont effectuées à trois temps différents : après 30 min (RWL 30), 60 min (RWL 60) et 120 min (RWL 120).

La perte d'eau par transpiration est déterminée par l'équation selon (CLARKE et MCKAIG .,1982) puis(ARAUS et al .,1991)

$$RWL_x (\text{mg d'eau perdu.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}) = (Pi - pt_x) \cdot \frac{1}{\text{surface.temps}}$$

V.4.3 Extraction des éléments minéraux

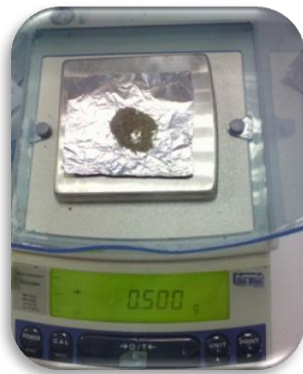
Les analyses de quelques éléments minéraux ont été effectuées sur les feuilles, les tiges et les racines et ont porté sur la détermination des teneurs en sodium et en potassium.

Le choix du dosage de ces cations est basé sur le fait que:

- Les ions, Na^+ et K^+ jouent un rôle clé dans le processus d'osmorégulation.

Les feuilles et les racines de chaque plante sont enveloppées séparément dans du papier aluminium, puis numérotées. Les lots de chacun des organes sont étuvés pendant 48 heures à 80°C . Les échantillons sont broyés à l'aide d'un broyeur. La fine poudre obtenue est placée dans des piluliers fermés hermétiquement.

500 mg de matériel végétal préalablement séchés, sont introduits dans un creuset en porcelaine. Le creuset est placé dans un four dont la température est augmentée progressivement jusqu'à 500°C et qui est ainsi maintenue pendant 2 heures. Un pallier est effectué aux alentours de 200°C jusqu'à la fin du dégagement de fumées.



ph.6 pesée de 0.5g de matériel végétal séché.



ph.7 : les creusets dans le four à 500°C pendant 2 h.



Ph.8 : le creuset sorti du four.

Après refroidissement, les cendres sont humectées avec quelques gouttes d'eau distillée, puis on ajoute 2 ml d'HCl au 1/2. On évapore à sec sur plaque chauffante. On ajoute une seconde fois 2 ml d'HCl, on laisse en contact 10 minutes et on filtre dans des fioles jaugées de 50 ml. Après avoir ajusté au trait de jauge puis homogénéisé par agitation manuelle, les solutions sont transvasées dans des godets sur lesquels le numéro de l'échantillon est inscrit. Cette solution est prête aux dosages par spectrophotomètre à flamme pour les deux éléments minéraux à savoir le sodium et le potassium.



Ph.9: ajout de 2ml d'Hcl en intervalle de 30min.



Ph.10 : filtration des solutions préparées.



Ph.11: la lecture par le Spectrophotomètre à flamme.

Dosage du sodium et du potassium par le spectrophotomètre à flamme

Pour chaque élément minéral à doser, des solutions étalons à des concentrations connues doivent être préparées à partir d'une solution mère de 01 g.l^{-1} pour chaque élément, à partir de cette dernière, les solutions filles où solutions étalons peuvent être facilement reproduites.

V.4.3.1 Le potassium

Pour préparer une solution standard de potassium, il faut mettre 1.000 g du chlorure de potassium (KCl) desséché dans une fiole jaugée d'un litre de capacité et compléter le volume avec de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.

V.4.3.2 Le sodium

Pour préparer une solution standard de sodium, il faut mettre 1.000 g du chlorure de sodium (NaCl) desséché dans une fiole jaugée d'un litre de capacité, puis compléter le volume avec de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.

V.5 Analyse statistique

Afin de déterminer la significativité des traitements appliqués sur les différents paramètres étudiés, nous avons procédé à des analyses de la variance et à la comparaison des moyennes à l'aide du test de Fischer à $\alpha = 5 \%$ sur 5 échantillons (feuilles, racines) analysés et de chaque traitement à l'aide du logiciel **SPSS7**. (Hoagland D et Arnon D I., 1938)

Pho.12: dispositifs expérimentaux adoptés au stress de l'Atriplex canescens



Bloc 1 : NaCl 0%, 0.5% et 3%(originale 2016).



Bloc 2 : CuSO₄.5H₂O (0, 2000, 2500 et 3000 ppm).



Bloc 3: Témoins et NaCl 0,5% + $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (2000, 2500 et 3000 ppm)



Bloc 4 : Témoins et NaCl 3% + $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (2000, 2500 et 3000 ppm)

A decorative graphic of a scroll with a grey shadow, framing the central text. The scroll is open, with the top and bottom edges curving inward. The text is centered within the scroll's opening.

Résultats et interprétations

VI. Résultats et interprétations

VI.1 Paramètres biométriques

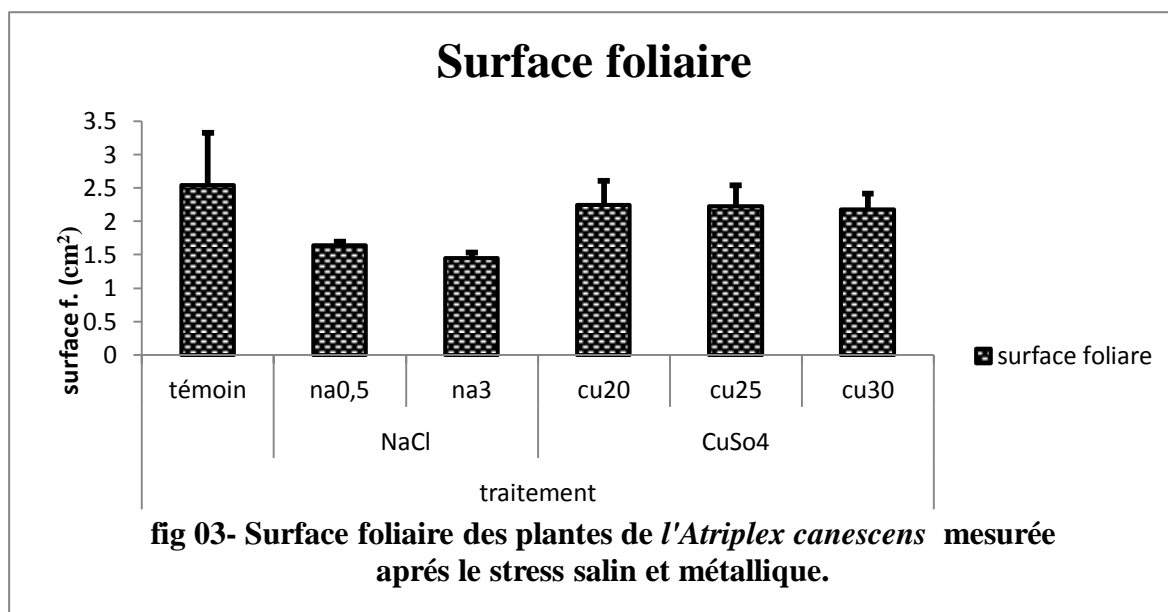
VI. 1.1 Surface foliaire

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

Les plantes stressées au NaCl (0,5% et 3%) montrent une différence sur la surface foliaire par rapport aux plantes témoins.

Les valeurs moyennes de la surface foliaire obtenues chez les plantes stressées sont inférieures (1,45 et 1,64 cm^2) par rapport aux plantes témoins (2,54 cm^2).

La surface foliaire des plantes stressées aux sulfates de cuivre (2000, 2500 et 3000 ppm) exprime une baisse légère respectivement à (2,25 - 2,23 – et 2,18 cm^2) selon les solutions (2000, 2500 et 3000 ppm) par rapport aux plantes arrosées par la solution



nutritive.

Tableau 02 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) de la surface foliaire des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress salin et métallique.

Traitement	Témoin	NaCl 0.5%	NaCl 3%	CuSO ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	CuSO ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	CuSO ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Surface Foliaire (cm ²)	2.54±0.78	1.64±0.05 NS	1.45±0.07 NS	2.25± 0.35 NS	2.23± 0.30 NS	2.18±0.23 NS

L'analyse de la variance représente un effet non significatif de la surface foliaire par rapport aux plantes témoins dans l'ensemble des traitements salins et métalliques.

b - Sous traitement combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O)

Les valeurs moyennes de la surface foliaire mesurées (2,23 - 2,19 et 2,08 cm²) respectivement chez les plantes stressées par les sulfates de cuivre, montrent une régression de l'effet du cuivre par rapport aux plantes témoins.

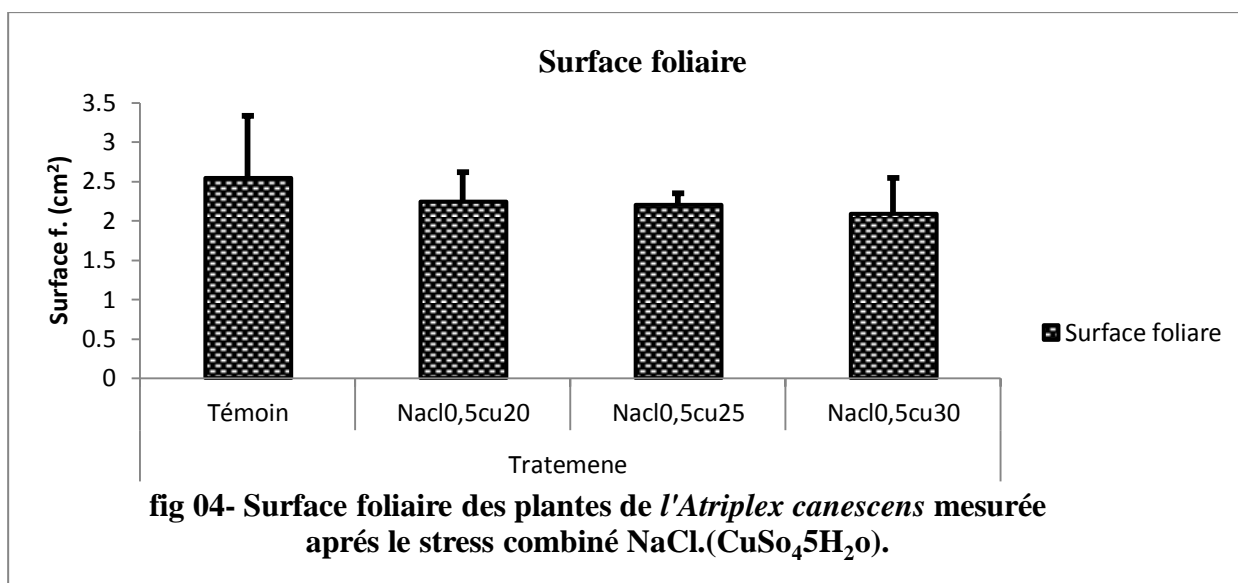


Tableau 03 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) de la surface foliaire des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 0.5% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	NaCl 0.5% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	NaCl 0.5% + CuSO ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Surface foliaia (cm ²)	2.54±0.78	2.23± 0.38 NS	2.19± 0.0.15 NS	2.08±0.45 NS

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p=5\%$) a montré clairement un effet non significatif de la surface foliaire (tableau 03) par rapport aux plantes témoins dans l'ensemble des traitements combinés (salins à 0,5% et métalliques).

c - Sous traitement combiné de NaCl + (CuSO₄ . 5H₂O)

On remarque que la surface foliaire des plantes stressées et traitées au (CuSO₄.5H₂O) sont légèrement au-dessous des plantes témoins (2,54 cm²) et leurs valeurs varient entre (2,30 - 2,28 et 1,94 cm²) respectivement. .

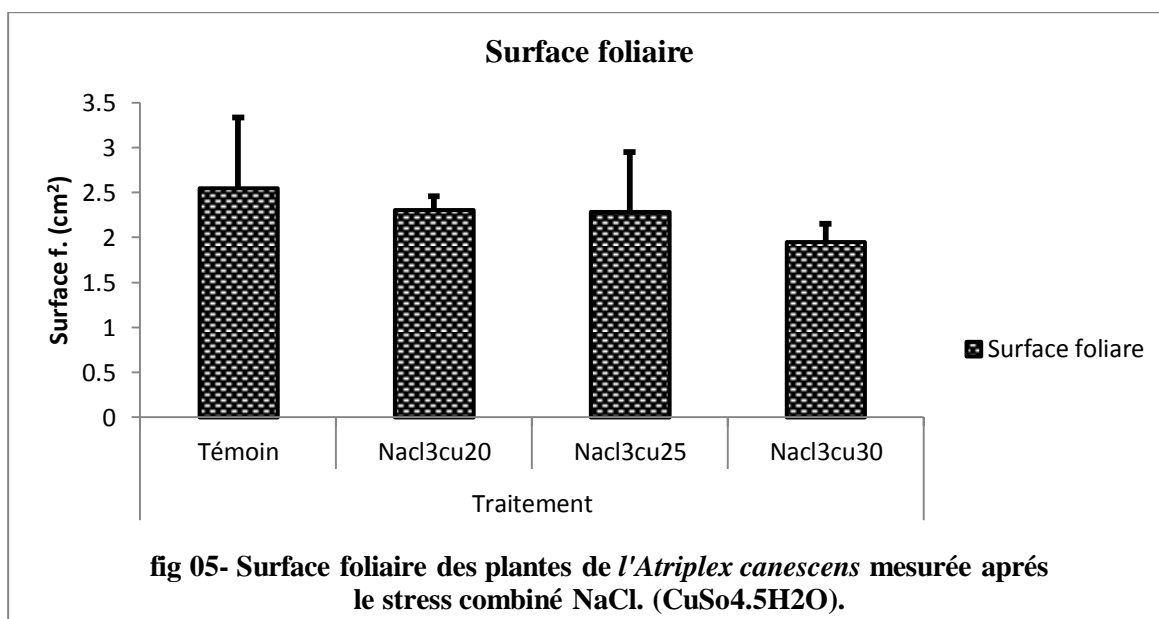


Tableau 04: Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la surface foliaire des plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 3% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	NaCl 3% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	NaCl 3% + CuSO ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Surface foliaire (cm ²)	2.54±0.78	2.3±0.15 NS	2.28±0.664 NS	1.94±0.20 NS

Les calculs statistiques nous ont permis de déceler un effet non significatif (tableau 04) entre les traitements combinés (salins à 3% et métalliques).

VI. 1.2 Volume racinaire

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

Le traitement des plantes au (NaCl 0,5%) montre un léger accroissement du volume racinaire par rapport aux plantes témoins (35cm³).

Chez les plantes traitées au (CuSo₄.5H₂O), les résultats du volume racinaire indiquent une légère différence de volume racinaire par rapport aux plantes témoins (35 cm³).

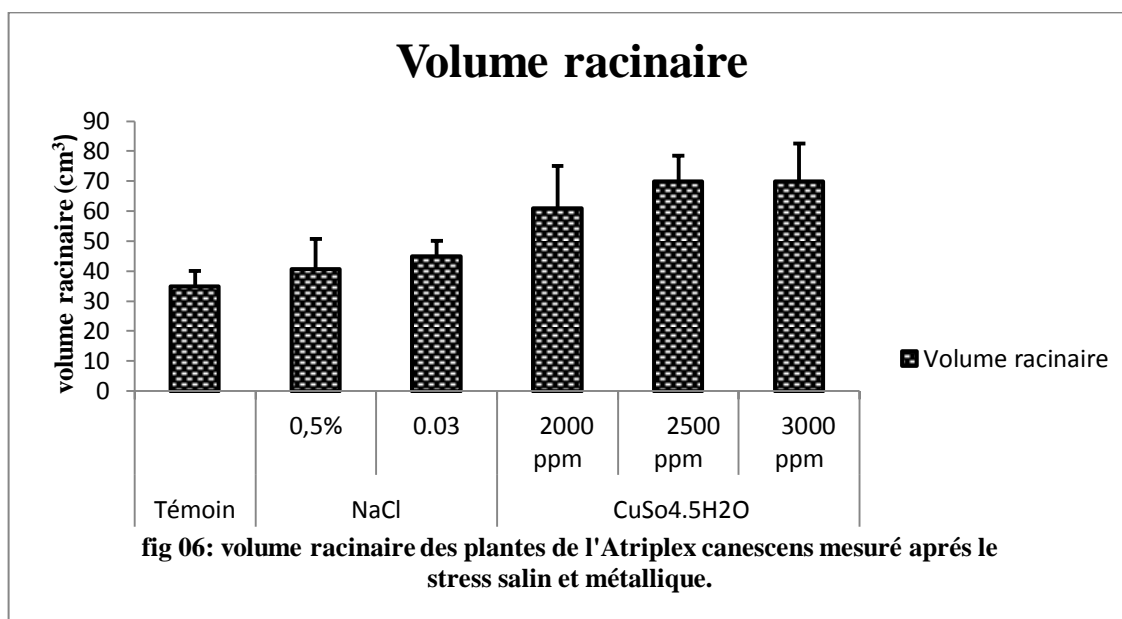


Tableau 05 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) du volume racinaire des plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress salin et métallique.

Traitement	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	CuSo ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	CuSo ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	CuSo ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Volume racinaire (cm ³)	35±5	40.66±10 NS	15±5 HS	70±14 NS	61±8.5 S	70±12.45 NS

L'étude statistique (tableau 05) indique que les différences entre le volume racinaire des plantes sous traitements salin est hautement significative au (NaCl 3%) et significative au (CuSo₄.5H₂O à 2500 ppm) et non significative au (NaCl 0,5% et CuSo₄.5H₂O à 2000 et 3000 ppm).

b - Sous traitement combiné de NaCl + (CuSO₄ . 5H₂O)

Les valeurs du volume racinaire chez les plantes stressées par l'effet combiné de (NaCl 0,5% + CuSO₄.5H₂O) à 2500 et 3000 ppm, montrent une diminution (26 et 33,33cm³) par rapport aux plantes témoins (35cm³). Et sous (NaCl 0,5% + CuSO₄.5H₂O) à 3000 ppm, on observe une légère hausse par rapport au NaCl 0,5%+(CuSO₄.5H₂O) à 2500 ppm.

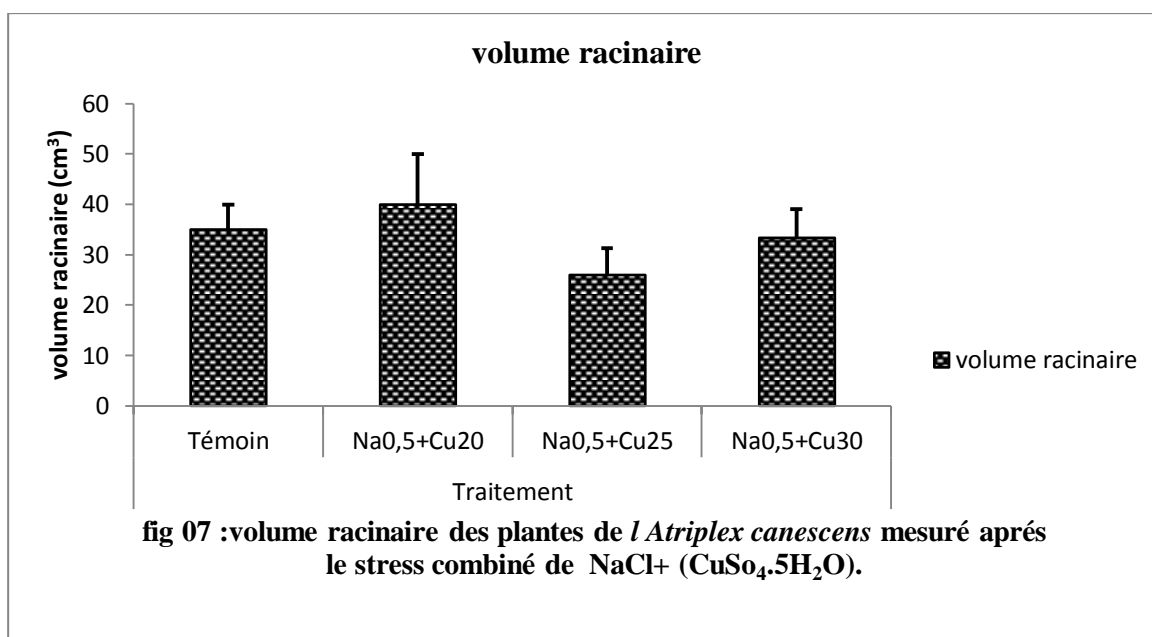


Tableau 06 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) du volume racinaire des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 0,5% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	NaCl 0,5% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	NaCl 0,5% + CuSO ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Volume racinaire (cm ³)	35±5	40±10 NS	26±5.29 NS	33.33±5.77 NS

L'analyse de la variance pour les traitements combinés (NaCl 0,5% + CuSO₄.5H₂O) du volume racinaire, montre un effet non significatif comparativement aux plantes non traitées.

c - Sous traitement combiné de NaCl 3% + (CuSO₄.5H₂O)

On note que l'augmentation du volume racinaire chez les plantes arrosées par la solution saline (NaCl 3%) est considérable (48,33cm³) par rapport au témoin (35cm³) . Le traitement par (NaCl 3% + CuSO₄.5H₂O) sous 2000 ppm a mesuré (25cm³) et sous 2500 ppm (26cm³).

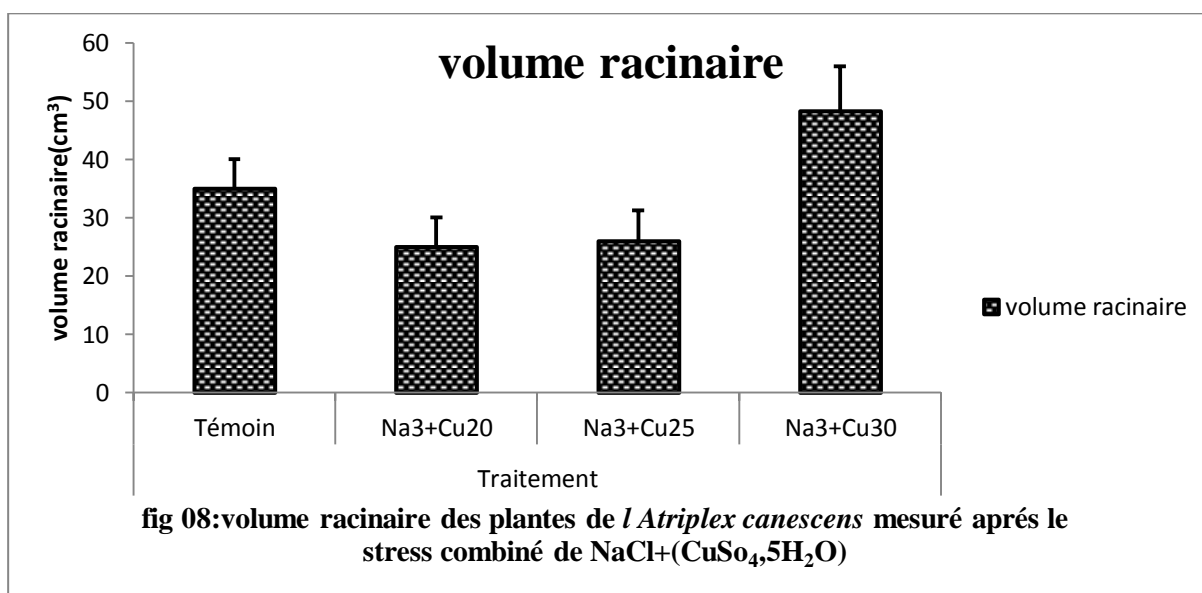


Tableau 07 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) du volume racinaire des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné de (NaCl 3% + CuSO₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 3% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	NaCl 3% + CuSO ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	NaCl 3% + CuSO ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Volume racinaire (cm ³)	35±5	25±5 NS	26±5.29 NS	48.33±7.63 NS

Les résultats (tableau 07) montrent un effet non significatif du volume racinaire, pour toutes les plantes traitées par la solution combinée de (NaCl 3% + CuSO₄.5H₂O).

VI. 1.2 Longueur des tiges

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

Les résultats illustrés de la fig.(09) montrent que la longueur des tiges sous l'effet du stress salin (NaCl 0,5%) évaluée à 60 cm, est légèrement au-dessus du témoin (59 cm), contrairement au stress de (NaCl 3%) qui est largement inférieure par rapport au témoin. Tandis que l'effet du cuivre (2000, 2500 et 3000 ppm) ont presque la même longueur des tiges de ces plantes (58,60 et 57cm) respectivement, par rapport aux plantes témoins (59,83 cm).

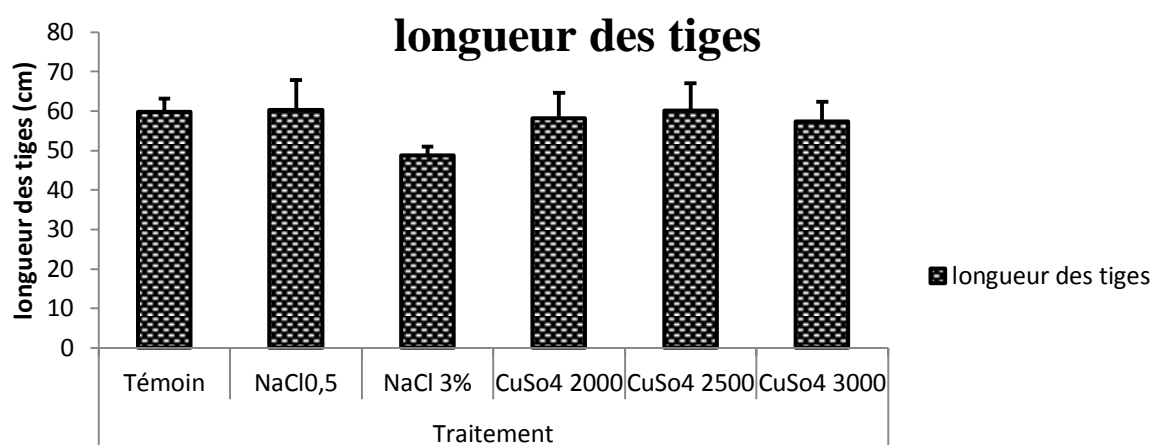


fig 09:Longueur des tiges des plantes de *Atriplex canescens* mesurée après le stress salin et métallique

Tableau 08: Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) des longueurs des tiges des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress salin et métallique.

Traitement	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	CuSo ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	CuSo ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	CuSo ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Longueur des tiges (cm)	59.83±3.39	60.33±7.47 NS	48.66±2.42 NS	58.08±6.5 S	60.12±6.98 NS	57.36±4.97 NS

Les données de l'analyse statistiques (tableau 08) révèlent que l'effet de la salinité et les sulfates de cuivre sur les longueurs des tiges se révèlent non significatifs, en exception de (CuSo₄.5H₂O .2000 ppm) où l'effet s'est montré significatif.

b - Sous traitement combiné de NaCl 0,5%+(CuSo₄. 5H₂O)

Les longueurs des tiges sous traitement de (NaCl 0,5%) + (CuSo₄.5H₂O) 2000 et 2500 ppm sont légèrement inférieures à ceux des plantes témoins (59 ,83cm).

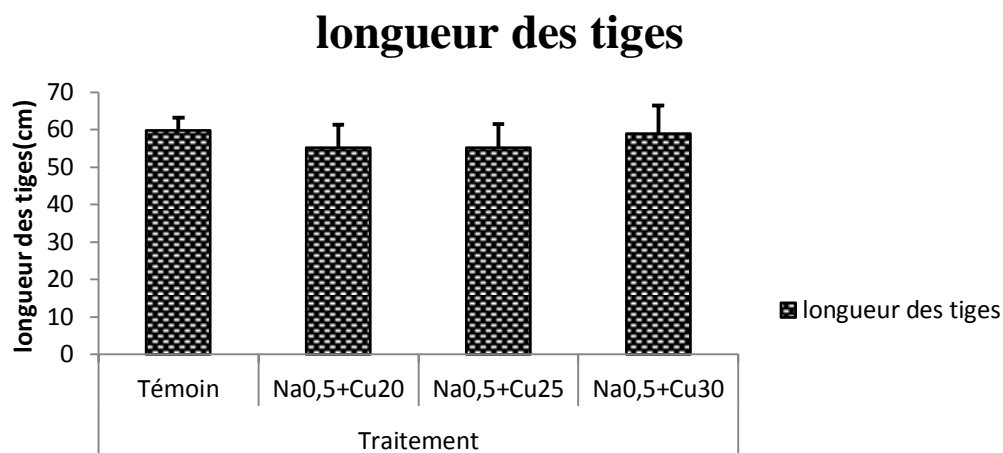


fig 10 :Longueur des tiges des plantes de *Atriplex canescens* mesurée après le stress combiné NaCl.(CuSo₄5H₂O)

Tableau 09 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de longueur des tiges des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Longueur des tiges (cm)	59.83±3.39	55.12±6.11 NS	55.1±6.31 NS	58.87±7.57 S

Les résultats illustrés (tableau 09) montrent un effet significatif des longueurs des tiges qui ont subi un traitement combiné de (NaCl 0,5% 3000 ppm).

Ainsi qu'un effet non significatif au traitement de (NaCl 0,5% 2000 et 2500 ppm) par rapport aux plantes témoins.

c - Sous traitement combiné de NaCl 3%+(CuSo₄.5H₂O)

Le traitement des plantes révèle que les plantes stressées au NaCl 3% + CuSo₄.5H₂O (2000 - 2500 et 3000 ppm), ont une longueur des tiges (55.41 – 50.25 et 57.04 cm) respectivement, inférieure à celle des plantes témoins (59,83 cm).

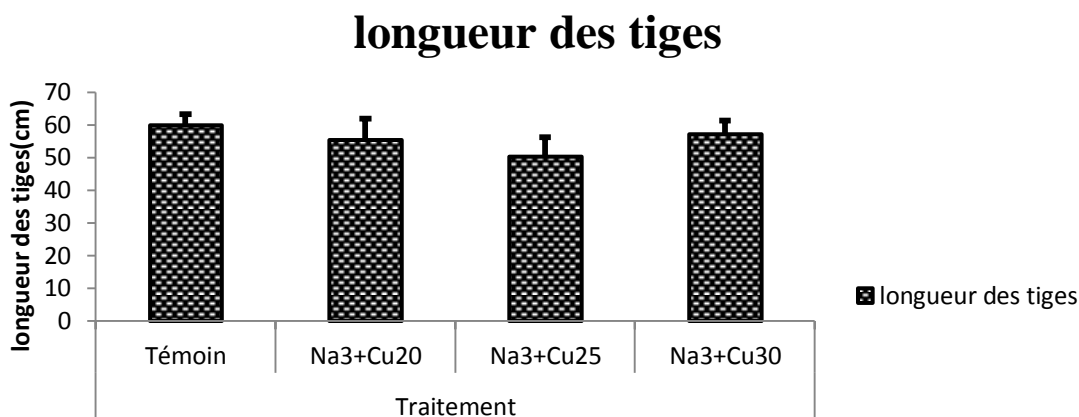


fig 11 :Longueur des tiges des plantes de *Atriplex canescens* après le stress combiné NaCl.(CuSo₄.5H₂o)

Tableau 10 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à p = 5%) de longueur des tiges des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Traitement	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
Longueurs des tiges (cm)	59,83±3,39	55,41±6,39 S	50,25±6 HS	57,04±4,32 HS

Les résultats (tableau 10) indiquent un effet hautement significatif des longueurs des tiges aux traitements combinés de (NaCl 3% + CuSo₄ 2500 et 3000ppm), par contre on signale un effet significatif au traitement de (NaCl 3% 2000 ppm).

VI. 2 Paramètres hydriques

VI. 2.1 Teneur en eau

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

Les valeurs des teneurs en eau chez les plantes traitées au (NaCl 3%) signalent une augmentation de 15 % par rapport aux plantes qui reçoivent des solutions salines de 0,5 % et de 10 % et comparativement aux plantes témoins.

Chez les plantes stressées par les sulfates de cuivre, les résultats ont démontré une égalité des teneurs en eau qui a atteint (70,85% - 70,04%) soumises à (2000 et 3000 ppm) par rapport aux plantes témoins (69,91%). Alors qu'on observe une baisse de 3% chez les plantes exposées à CuSo₄.5H₂O à (2000 ppm).

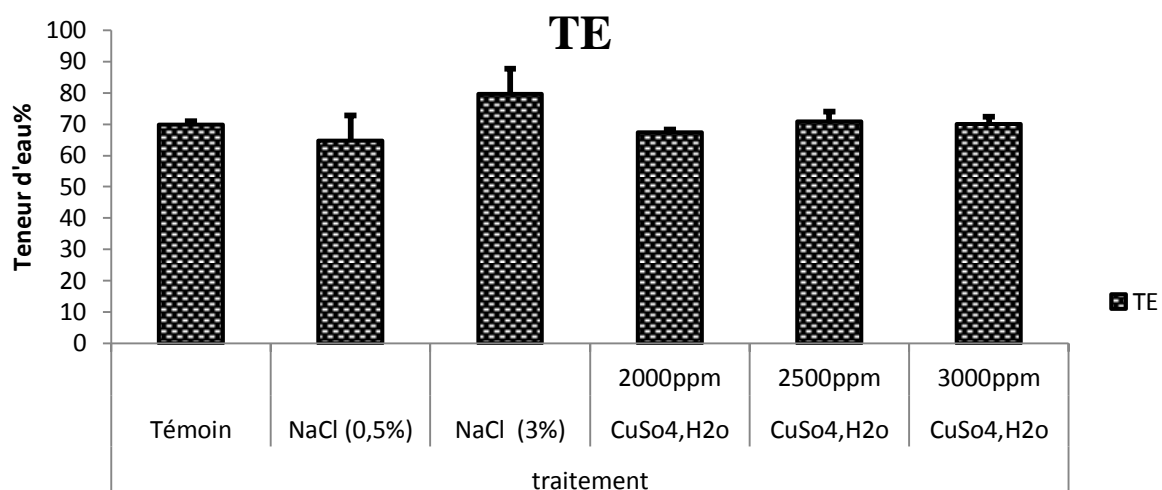


fig 12 : Teneur en eau des plantes de *Atriplex canescens* après le stress salin et métallique

Tableau 11 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la teneur en eau des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt mesurée après le stress salin et métallique.

Traitement	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%	CuSo ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	CuSo ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	CuSo ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Teneur en eau	69,91±1,03	64,66±8,09 NS	79,53±8,10 NS	67,45±0,88 S	70,85± 3,23 NS	70,04±2,36 NS

L'étude statistique des valeurs enregistrées par la teneur en eau révèle un effet significatif au niveau des plantes traitées au (CuSo₄.5H₂O) 2000 ppm ainsi qu'un effet non significatif pour les autres traitements.

b- Sous traitement combiné de NaCl 0,5 + (CuSo₄ . 5H₂O)

Les valeurs moyennes relevées chez les plantes traitées par (NaCl 0,5 %) et (CuSo₄.5H₂O) à 2000 - 2500 et 3000 ppm sont égales (72,54% – 72,12% et 73,98%) par rapport aux plantes témoins (69,91%).

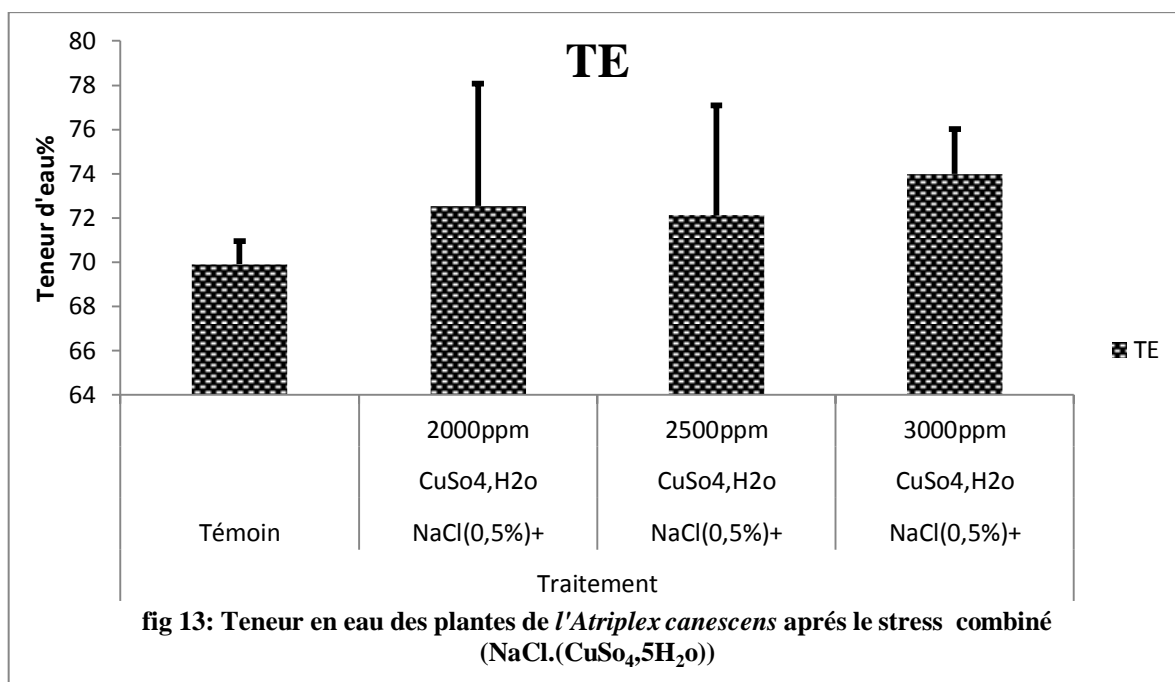


Tableau 12 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) de la teneur en eau des plantes de l'Atriplex canescens (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Teneur en eau (%)	69,91 ± 1,01	72,54 ± 5,53 NS	72,12 ± 4,96 NS	73,98 ± 2,04 S

Les calculs statistiques nous ont permis de constater un effet non significatif par rapport aux plantes traitées au (NaCl 0,5% 2000 et 2500 ppm) sauf pour le traitement (NaCl 0,5% 3000 ppm) qui enregistre un effet significatif.

C- Sous traitement combiné de NaCl 3% + (CuSo₄. 5H₂O)

D'après les résultats obtenus chez les plantes traitées au NaCl 3%+ CuSo₄ : 2000-2500 et 3000 ppm , nous avons constaté que la teneur en eau comparativement à celles enregistrées chez les plantes témoins ont augmenté de 10%.

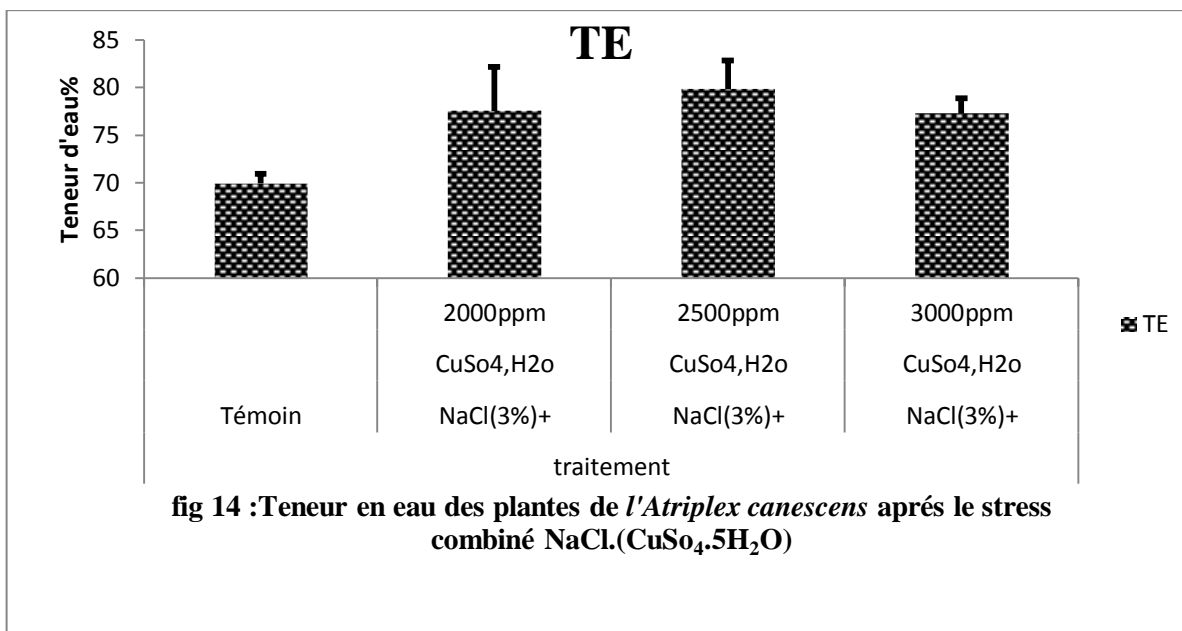


fig 14 :Teneur en eau des plantes de l'Atriplex canescens après le stress combiné NaCl.(CuSO₄.5H₂O)

Tableau 13 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à p = 5%) de la teneur en eau des plantes de l'Atriplex canescens (Pursh) Nutt mesurée après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	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
Teneur en eau (%)	69,91±1,03	77,53±4,63 S	79,82±3,03 HS	77,28±1,56 HS

Selon les résultats mentionnés dans le tableau (13) , il en résulte que l'analyse statistique enregistrée possède un effet hautement significatif pour les traitements combinés de (NaCl 3% et 2500 et 3000 ppm). Concernant le traitement de (NaCl 3% 2000 ppm) on observe un effet significatif.

VI. 2.2 RWC

a: Sous solutions salines de NaCl 0,5% et 3%

La teneur relative en eau présente une différence entre les différents traitements (fig :15) , nous avons observé une diminution de RWC de (93.04% et 91.70%) respectivement sous l'effet de NaCl (0,5% et 3%) comparativement aux plantes témoins qui enregistrent (97,30%).

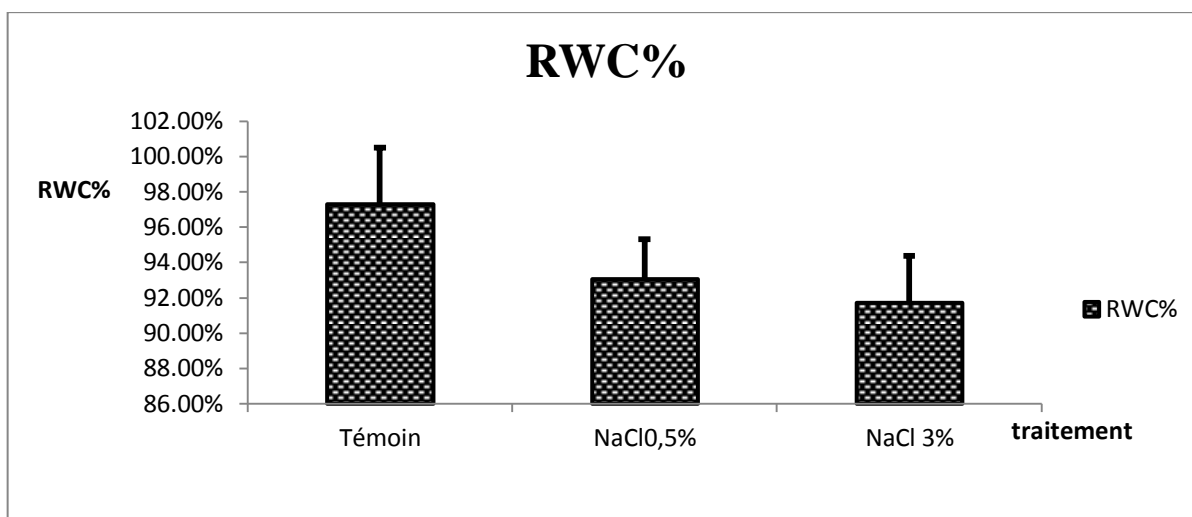


Fig 15 : Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* après le stress salin.

Tableau 14 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress salin.

Traitement	Témoin	NaCl 0,5%	NaCl 3%
Teneur relative en eau (%)	97.3±0.03	93.04±0.02 NS	91.7±0.02 NS

L'étude statistique à l'aide du test de Fisher (à $p=5\%$) nous a montré que l'effet du stress salin sur la teneur relative en eau des plantes traitées n'a aucun effet significatif.

b: Sous solutions de sulfates de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 2000, 2500 et 3000ppm

Le RWC est en régression nettement considérable et bien observable, on a enregistré consécutivement les valeurs de : (94,42 % - 93,32% et 92,84 %) sous l'effet de (2000, 2500 et 3000 ppm) de sulfate de cuivre par rapport aux plantes témoins .

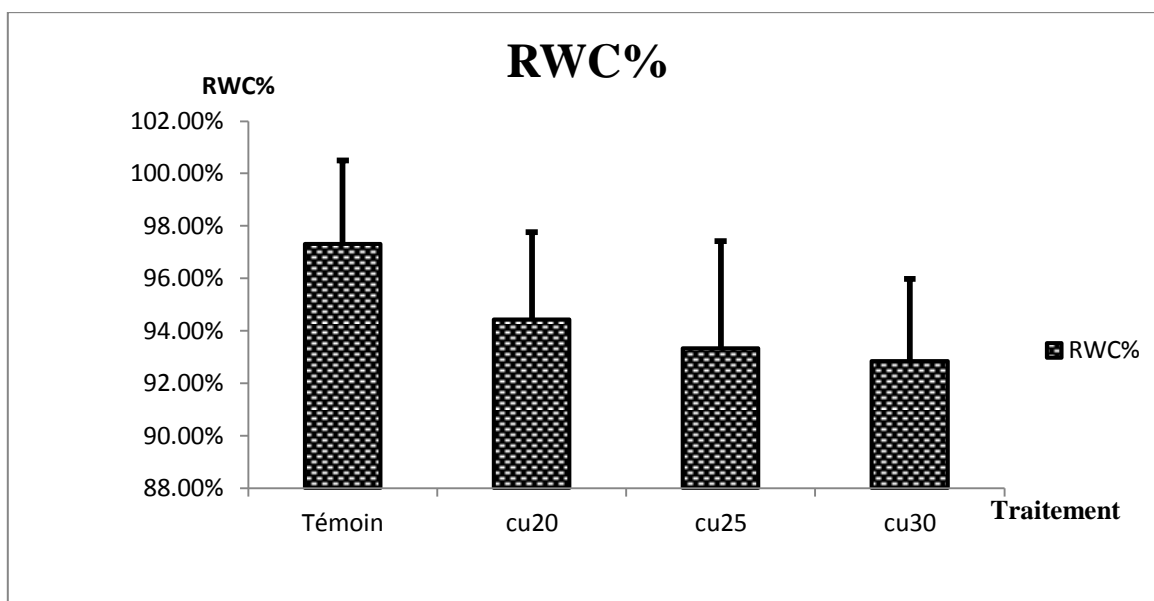


Fig 16 : Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* après le stress métallique.

Tableau 15 : Analyse statistique à l’aide de test de Fisher (à p = 5%) de teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress métallique.

Traitement	Témoin	CuSO ₄ .5H ₂ O.2000 ppm	CuSO ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	CuSO ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Teneur relative en eau (%)	97.3 ± 0.31	94.42 ± 0.03 NS	93.32 ± 0.04 NS	92.84 ± 0.03 NS

Nous avons remarqué, à travers l’étude statistique (tableau : 15) qu’il n’existe pas une différence significative entre les différents traitements métalliques.

C : Sous solutions combinée de NaCl + (CuSO₄.5H₂O)

Nos résultats obtenus après application du stress, ont montré clairement une diminution légère de RWC dans les deux doses combinées de (NaCl 0,5 % + CuSO₄.5H₂O à 2500 et 3000 ppm) respectivement par rapport au témoin (97,30%) fig . (17) et NaCl 0,5% + (CuSO₄.5H₂O) à 2000ppm (96.84%).

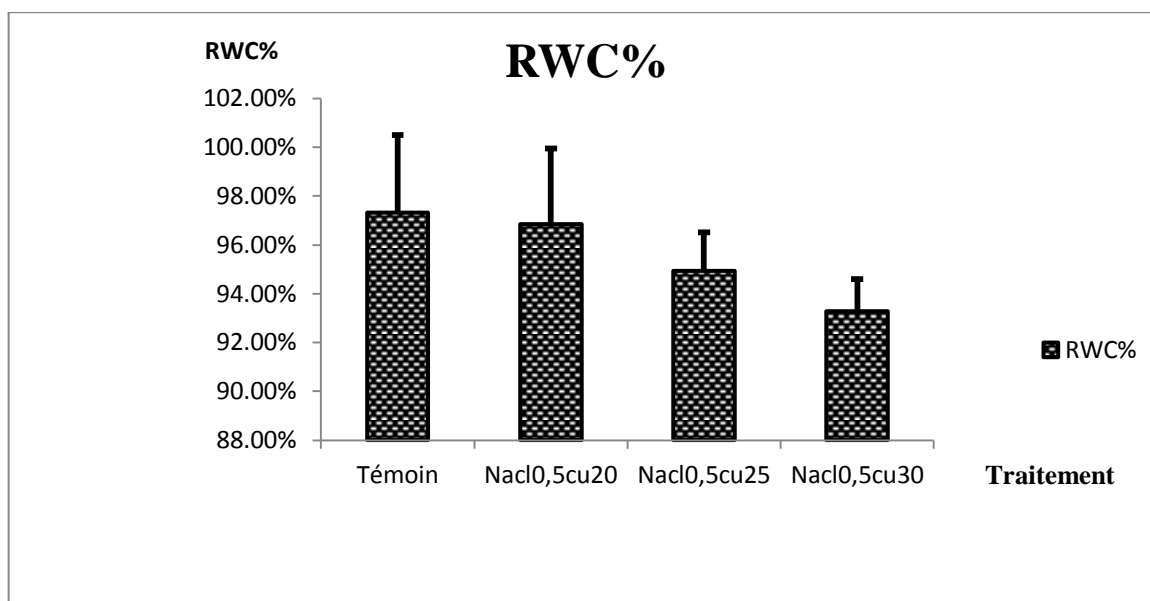


Fig 17 : Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl+ ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Tableau 16 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné NaCl+ ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Traitement	Témoin	NaCl 0,5% $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2000 ppm	NaCl 0,5% $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2500ppm	NaCl 0,5% $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 3000 ppm
Teneur relative en eau (%)	97.3±0.03	96.84 ± 0.03 NS	94.93 ± 0.01 NS	93.28±0.013 NS

La teneur relative en eau ne présente aucune différence significative entre les différents traitements (tableau 16) de NaCl 0,5%+($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)2000,2500 et 3000ppm.

d:Sous solutions combinées de NaCl 3%+ ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Sous solutions combinées de (NaCl 3% + $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) : 2000, 2500 et 3000ppm :

-Le RWC diminue sensiblement avec une valeur de 87,73% par rapport au témoin (97,30%) fig.18.

- On remarque que les valeurs moyennes sont presque égaux (88,90 % - 88,07% et 87,73 %) concernant les doses (2000, 2500 et 3000 ppm) respectivement .

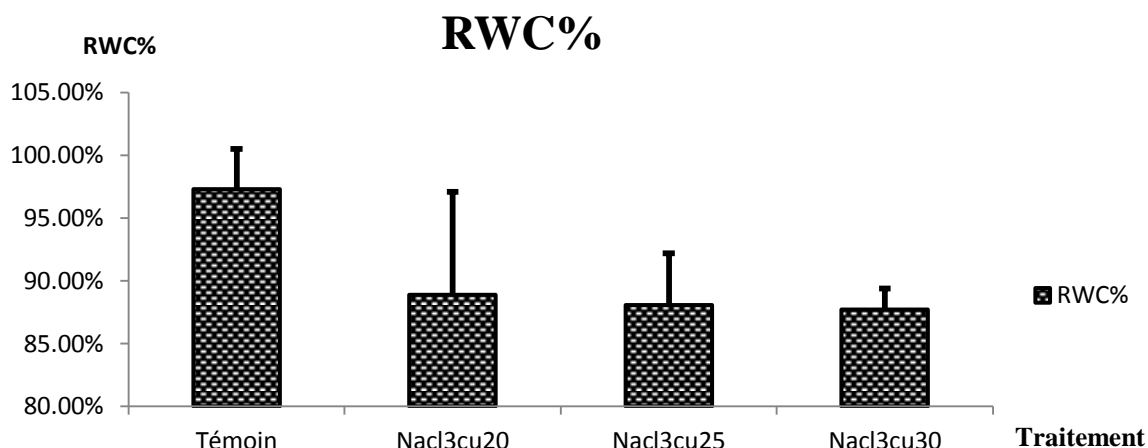


Fig 18 : Teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl+(CuSO₄.5H₂O).

Tableau 17 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) de la teneur relative en eau (RWC) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	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
Teneur relative en eau (%)	97.3±0.03	88.90±0.08 NS	88.07±0.04 NS	87.73±0.01 NS

Nos résultats obtenus après les traitements salin et métallique ont montré clairement un effet non significatif de l'ensemble des plantes traitées au NaCl 3% +(CuSO₄.5H₂O) 2000,2500 et 3000ppm.

VI. 2.3 RWL

a: Sous solutions salines de NaCl 0,5% et 3%

- Après 30min : la transpiration a diminué au cours du temps et en fonction de la salinité (fig. 19) Les résultats de l'estimation de cette caractéristique à les résultats de

l'estimation de cette caractéristique à la 30 min ont montré de faibles évaporations en eau obtenues par les plantes cultivées sous contraintes salines (0,5% et 3%) en donnant des valeurs respectives de (0,0026 et 0,0026mg d'eau. cm⁻². mn⁻¹) par rapport aux plantes témoins.

- Après 60 min : On observe une diminution par rapport aux résultats précédents qui ont noté respectivement de (0,0017 et 0,0018 mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹) par rapport aux plantes témoins (0.0038mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹).

-Après 120min : A la fin de l'expérience, les valeurs de (RWL) se sont atténuées par rapport à celles enregistrées précédemment (après 30' et 60'), cependant nous avons relevé (0.0012 et 0.0014 mg d'eau.cm⁻².m⁻¹) en comparant avec le témoin (0,0025 mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹).

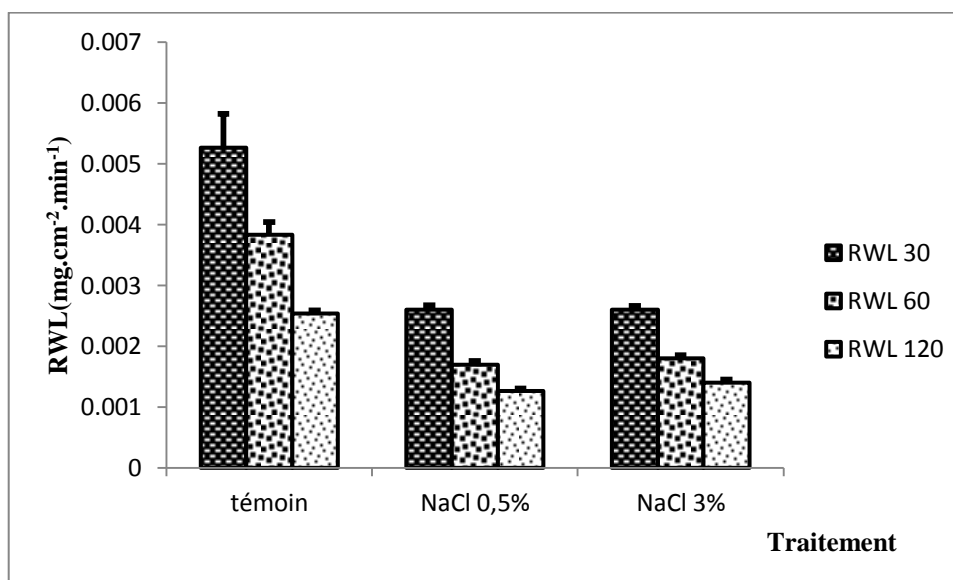


Fig19 : Perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress salin.

Tableau 18 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) de la perte d'eau par transpiration (RWL) dans les plantes de l'Atriplex canescens (Pursh) Nutt après le stress salin.

Traitement	RWL mg d'eau.cm ⁻² .mn ⁻¹		
	30 min	60 min	120 min
Témoin	0.0052±0.00054	0.0038±0.0002	0.0025±0.00005
NaCl 0,5%	0.0026±0.00007 NS	0.0017±0.00005 NS	0.0012±0.000032 NS
NaCl 3%	0.0026±0.00006 NS	0.0018±0.00004 NS	0.0014±0.000045 NS

L'étude statistique à l'aide du test de Fisher (à p =5%) nous a montré que l'effet du stress salin sur la perte d'eau par transpiration après la 30^{ème}, 60^{ème} et la 120^{ème} minute, ont été non significatives (tableau 18).

b : Sous solutions de sulfates de cuivre (CuSo₄.5H₂O)2000,2500 et 3000ppm

-Après 30 min : L'évaporation de l'eau a diminué légèrement chez les plantes stressées au sulfates de cuivre (2000 et 3000 ppm); elles ont enregistré les valeurs de (0,0037 et 0,004 mg.cm⁻².mn⁻¹) respectivement en comparant avec le témoin (0,0052 mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹) ; alors que chez les plantes stressées par CuSo₄.5H₂O 2500 ppm, on remarque un décroissement observable (0,0029mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹).

- Après 60min : en comparant les plantes stressées par rapport aux plantes témoins, le taux d'évaporation de l'eau a amoindrit de 12mg d'eau.cm⁻².min⁻¹ chez les plantes arrosées par (3000 ppm) de sulfates de cuivre (CuSo₄.5H₂O) ; et de 20mg d'eau.cm⁻².min⁻¹ chez les plantes soumises à CuSo₄.5H₂O (2000 et 2500 ppm) consécutivement.

- Après 120min : on constate une légère dégradation (0,0010mg d'eau.cm⁻².min⁻¹) de l'eau transpirée par les plantes stressées aux sulfates de cuivre (2000 et 2500ppm) relativement aux plantes témoins.

On enregistre aussi une équivalence entre les plantes traitées par CuSo₄.5H₂O (3000 ppm) avec le témoin (0,0025mg d'eau.cm⁻².min⁻¹).

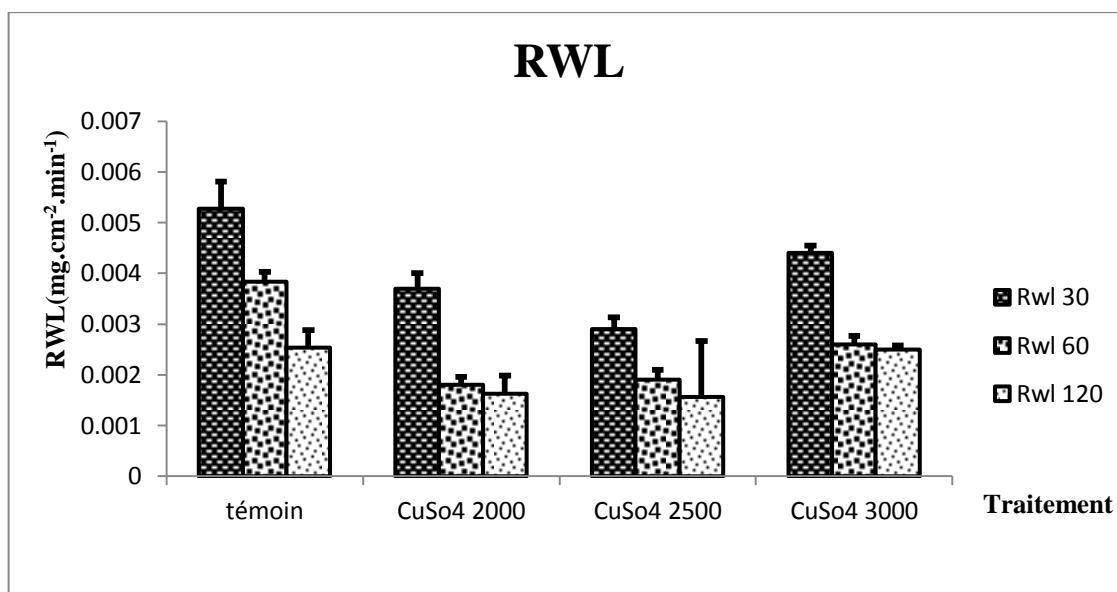


Fig 20 : Perte d'eau par transpiration (RWL) dans les plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Tableau 19 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) de la perte d'eau par transpiration (RWL) dans les plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress métallique.

Traitement	RWL mg d'eau.cm ⁻² .mn ⁻¹		
	30 min	60 min	120 min
Témoin	0.0052±0.0005	0.0038±0.0002	0.0025±0.00035
CuSo ₄ 2000	0.0037±0.0003 NS	0.0018±0.0001 NS	0.0016±0.0003 NS
CuSo ₄ 2500	0.0029±0.0002 NS	0.0019±0.0002 NS	0.0015±0.001 NS
CuSo ₄ 3000	0.0044±0.0001 NS	0.0026±0.00017 NS	0.0025±0.00008 NS

Nos résultats obtenus sur la perte d'eau par transpiration ont indiqué que l'effet du stress métallique ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2000, 2500 et 3000 ppm) après 30 min, 60 min et 120 min, n'ont eu aucun effet significatif sur les plantes.

C : Sous solutions combinées de NaCl + (CuSO₄ .5H₂O)

-Après 30min : La quantité d'eau perdue après 30' par les plantes témoins ont été de (0,0052 mg d'eau .cm⁻².mn⁻¹).

D'autres parts, chez les plantes traitées avec 0,5% de NaCl +CuSO₄. 5H₂O(2000, 2500 et 3000 ppm) , le RWL a enregistré (0,007 - 0,006-0.005 mg d'eau cm⁻².mn⁻¹).

- Après 60min : On observe également une diminution par rapport aux résultats précédents. Ces valeurs ont été respectivement de (0,0047 – 0,0040 et 0,0035 mg d'eau cm⁻¹-.mn⁻¹) sous l'effet de CuSO₄.5H₂O (2000, 2500 et 3000ppm) consécutivement et comparativement au témoin (0,0038 mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹).

- Après 120min : Le RWL a l'été atténué par rapport à celui enregistré précédemment (après 30 min et 60 min).

Nous avons aussi relevé (0,0027 – 0,0029 – 0,0027mg d'eau cm⁻¹.mn⁻¹) respectivement par rapport au témoin.

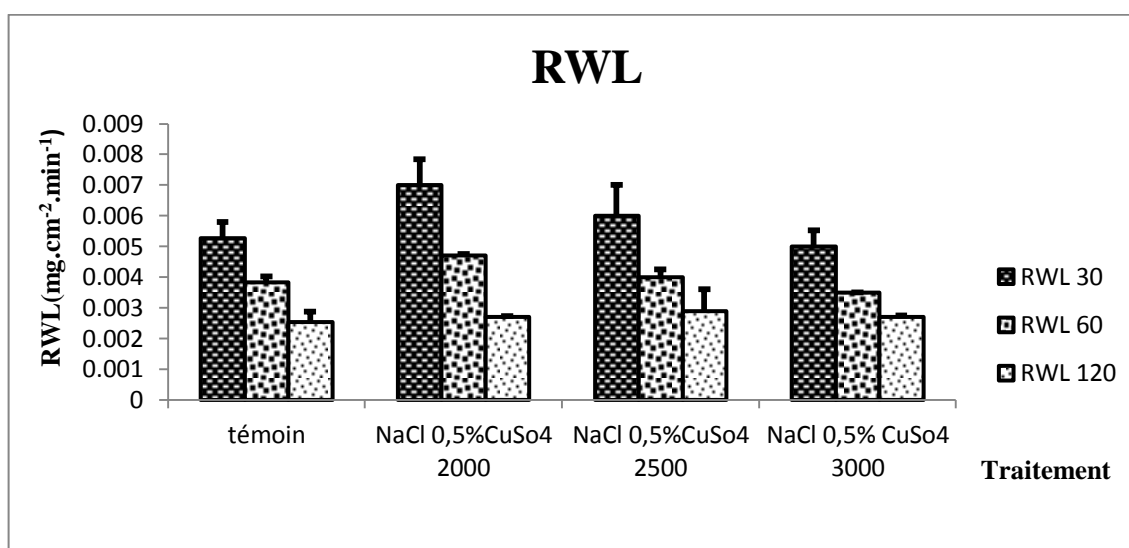


Fig 21 : Perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 20 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) de la perte d'eau par transpiration (RWL) dans les plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	RWL mg d'eau.cm ² .mn ⁻¹		
	30 min	60 min	120 min
Témoin	0,0052±0.0005	0,0038±0.0002	0,0025±0.00035
NaCl 0,5% CuSo ₄ 2000	0,007±0.0008 NS	0,0047±0.00005 NS	0,0027±0.00003 NS
NaCl 0,5% CuSo ₄ 2500	0,006±0.001 NS	0,004±0.0002 NS	0,0029±0.0007 NS
NaCl 0,5% CuSo ₄ 3000	0.005±0.0005 NS	0.0035±0.00001 NS	0.0027±0.00005 NS

En conséquence, les calculs statistiques (tableau 20) de l'effet combiné du stress salin (NaCl 0,5%) et métallique (CuSO₄.5H₂O 2000,2500 et 3000ppm) après 30', 60' et 120' ont donné des résultats non significatifs

d : Sous solutions combinées de NaCl + (CuSO₄.5H₂O)

-Après 30min : dans cette étape (après 30') on remarque que les quantités d'eaux évaporées chez les plantes témoins et stressées au (NaCl 3% + CuSo4.5H₂O : 2000 et 3000 ppm) sont égaux par rapport aux plantes arrosées par NaCl (3% +CuSo4.5H₂O 3000 ppm)

-Après 60min : Les valeurs obtenues après 60' ont montré une déperdition des eaux évaporées chez les plantes témoins (0,0038 mg.cm².mn⁻¹) et les plantes soumises au NaCl 3% + CuSo₄.5H₂O à 2000 et 3000ppm par rapport aux plantes stressées au (NaCl 3% + CuSo4.5H₂O à 2500 ppm) qui est de : 0.0054mg d'eau.cm⁻¹.min⁻¹.

-Après 120min : la transpiration de l'eau après 120' chez les plantes témoins (0.0025mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹) et stressées au (NaCl 3% +CuSo4.5H₂O : 2000 et 3000ppm) a diminué de (0.0020 et 0.0024 mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹) consécutivement, tandis que les valeurs chez les plantes traitées sous contraintes de (NaCl 3% + CuSo4.5H₂O : 2500 ppm) montrent que la quantité d'eau évaporée est de 0.0035 mg d'eau.cm⁻².mn⁻¹ par rapport aux résultats précédents (après 30' et 60').

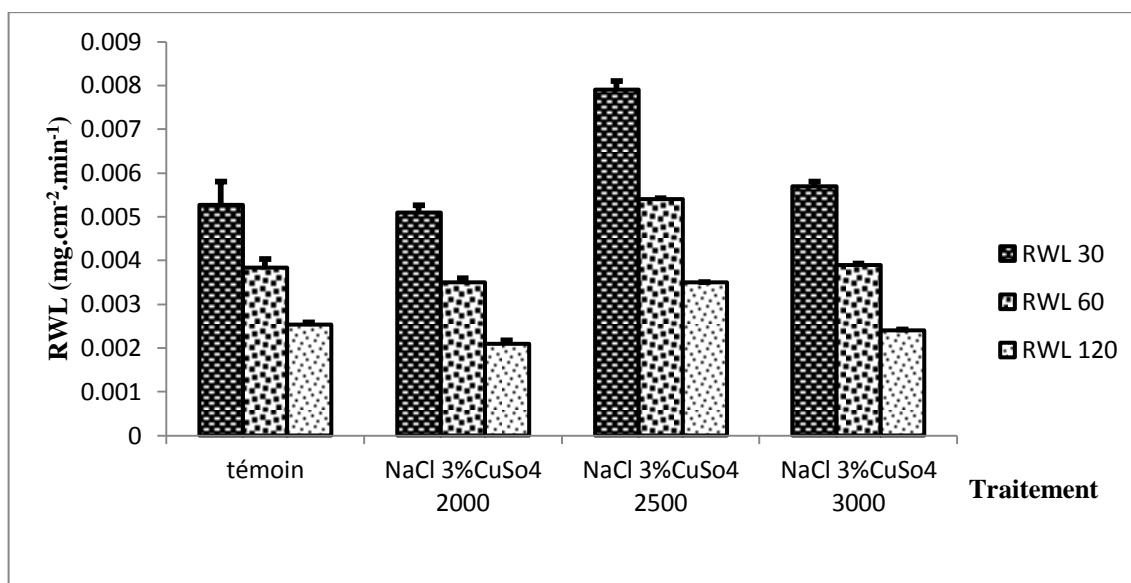


Fig. 22 : Perte d'eau par transpiration (RWL) des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Tableau 21 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) de la perte d'eau par transpiration (RWL) dans les plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	RWLmg d'eau.cm ⁻² .mn ⁻¹		
	30 min	60 min	120 min
Témoin	0.0052±0.00054	0.0038±0.0002	0.0025±0.00005
NaCl 3% CuSo ₄ /2000ppm	0.0051±0.00016 NS	0.0035±0.0001 NS	0.002±0.00008 NS
NaCl 3% CuSo ₄ /2500ppm	0.0079±0.0002 NS	0.0054±0.000026 NS	0.0035±0.000013 NS
NaCl 3% CuSo ₄ /3000ppm	0.0057±0.0001 NS	0.0039±0.00003 NS	0.0024±0.00002 NS

L'étude statistique (tableau 21) de l'effet combiné du stress salin (NaCl 3%) et métallique (CuSO₄.5H₂O à 2000,2500 et 3000 ppm), nous a permis de ne voir aucune différence significative entre ces différents traitements et ceci pendant les étapes de la (30^{ème}, 60^{ème} et 120^{ème} minute).

VI. 3 Paramètres minéraux

VI. 3.1 Sodium :

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

- Partie aérienne :

Les résultats montrent que les teneurs en sodium augmentent successivement dans les feuilles sous les traitements de NaCl (0,5% et 3%) et (CuSo₄.5H₂o) à 2000 ppm, en comparant avec les feuilles témoins, selon la fig (23), cette teneur chute faiblement lorsque les plantes stressées par la solution métallique (CuSo₄.5H₂o) à 2500 et 3000 ppm.

Partie souterraine :

Sous traitement de NaCl (0,5 % et 3%), on noté une légère hausse de sodium au niveau des racines, en comparant avec les racines non traitées, tandis que les teneurs en sodium chez les plantes soumises par (CuSo₄.5H₂O) à 2000, 2500 et 3000 ppm, on enregistre une élévation remarquable.

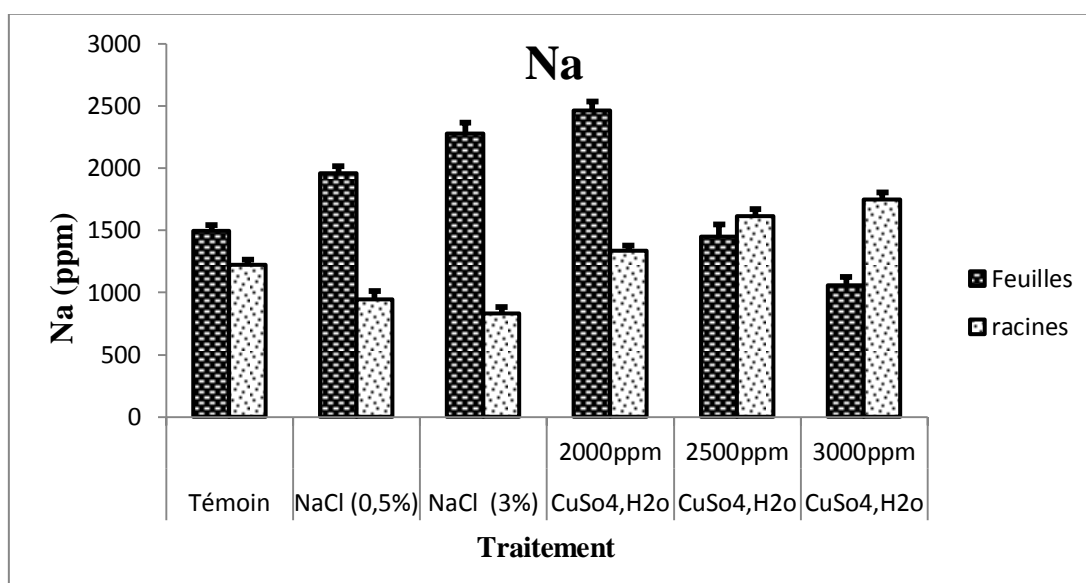


Fig 23 : Teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress salin et métallique (NaCl+CuSo₄.5H₂O).

Tableau 22 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress salin et métallique.

Traitement	Témoin	NaCl (0,5%)	NaCl (3%)	CuSo ₄ .5H ₂ O 2000	CuSo ₄ .5H ₂ O 2500	CuSo ₄ .5H ₂ O 3000
Feuilles	1495±50	1955±60 HS	2277±88 HS	2461±77 HS	1449±101 NS	1058±66 HS
Racines	1219±45	943±69 S	828 ± 58 HS	1334±45 HS	1610±63 S	1748±58 HS

L'analyse statistique (tableau 22) révèle que chez les plantes stressées à 0,5% et 3% et (CuSo₄.5H₂O) à : 2000 et 3000 ppm , un résultat significatif est signalé pour les racines par rapport aux feuilles témoins .

- En revanche, sous le traitement de (CuSo₄ .5H₂O) à 2500 ppm .
- Aucun effet significatif du sulfate de cuivre ne s'est présenté sur l'accumulation du sodium.
- L'effet combiné de (NaCl et (CuSo₄ .5H₂O) montre un effet hautement significatif

b - Sous traitement combiné de NaCl + (CuSo₄ . 5H₂O)

Partie aérienne :

Le sodium s'accumule beaucoup dans la partie foliaire, selon la fig (24) on note une augmentation qui dépasse le double dans les feuilles des plantes arrosées par la solution combinée (Sel – Cuivre) à 0,5% + (CuSo₄.5H₂O) à 3000ppm comparativement aux feuilles témoins.

Chez les feuilles soumises aux solutions et (CuSo₄.5H₂O) à 2000 et 2500 ppm, le taux accroit légèrement comparativement aux feuilles témoins

Partie souterraine :

Dans les racines, une hausse remarquable des teneurs au sodium est observé pour les racines soumises au NaCl (0,5%) + (CuSo₄.5H₂O) à : 2000 et 3000 ppm , en rapprochant au témoin .

Sous le traitement de NaCl 0,5% +(CuSo₄.5H₂O) à 2500 ppm , les résultats affirment une régression par rapport aux racines des plantes témoins .

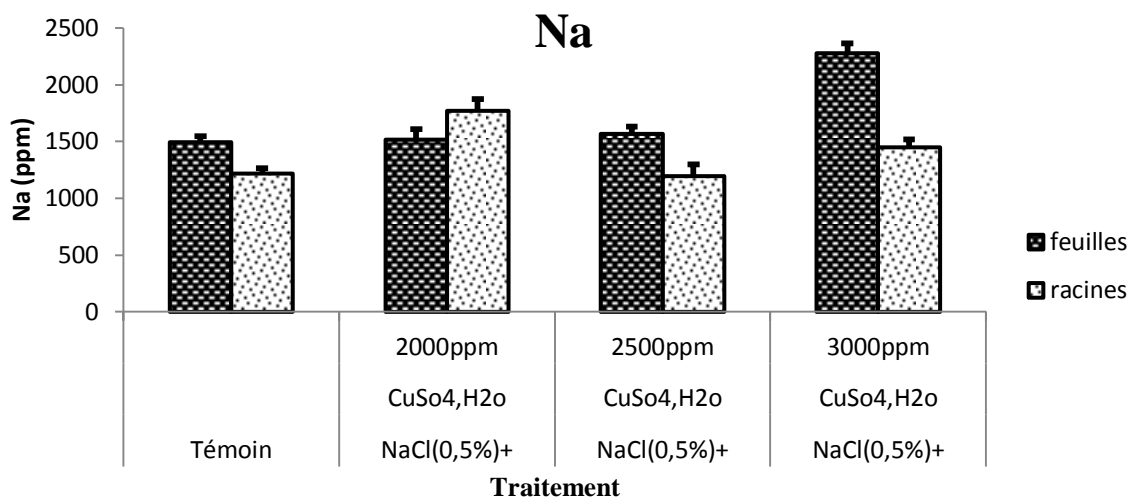


Fig 24 : Teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 23 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) des teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 2000 ppm	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 2500 ppm	NaCl 0,5% + CuSo ₄ .5H ₂ O 3000 ppm
Feuilles	1495±50	1518 ±90 NS	1564±65 NS	2277±88 HS
Racines	1219±45	1771±102 S	1196±101 S	1449±69 S

Des résultats hautement significatifs sont enregistrés pour le sodium accumulé à l'aide du test de Fisher (tableau 23) aussi bien pour les feuilles que pour les racines, sous les différents traitements métalliques.

c - Sous traitement combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O)

Partie aérienne :

La fig.(25) démontre que les feuilles de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt sont plus riches en sodium sous le traitement combiné de 2000 et 2500ppm par rapport aux plantes soumises à la solution nutritive, pourtant chez les plantes arrosées par les solutions combinées, le taux de sodium baisse faiblement.

Partie souterraine :

En confrontant les teneurs au sodium analysées dans les racines traitées par NaCl 3% + (CuSo4.5H2O) à 2000, 2500 et 3000 ppm, on relève une élévation remarquable comparativement aux racines des plantes témoins .

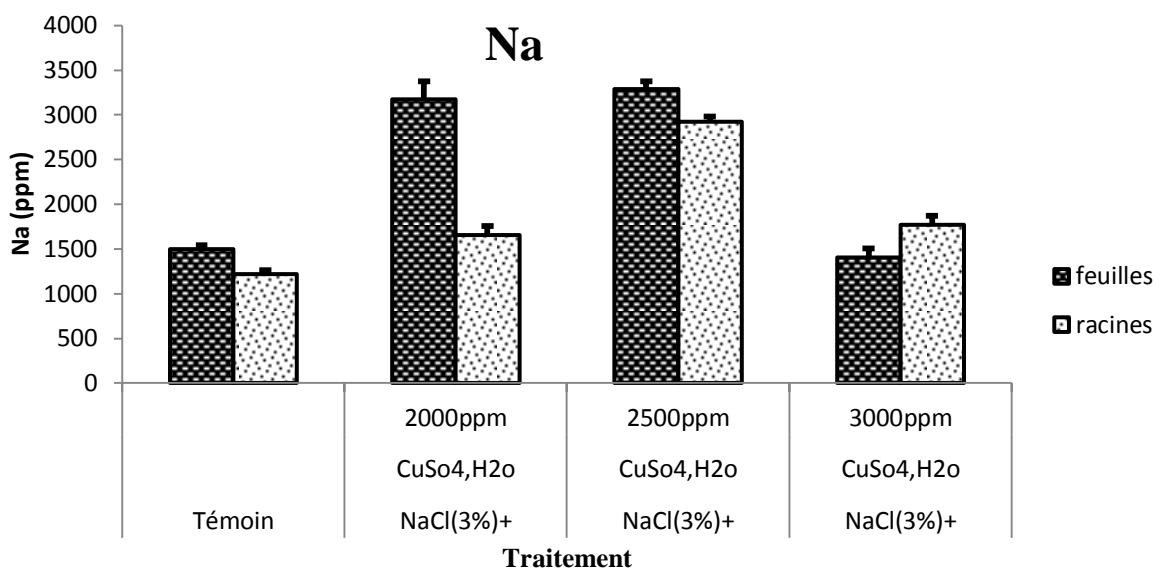


Fig 25 : Teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSo4.5H2O).

Tableau 24 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à p = 5%) des teneurs en sodium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSo4.5H2O).

Traitement	Témoin	NaCl 3% CuSo4.5H2O 2000 ppm	NaCl 3% CuSo4.5H2O 2500 ppm	NaCl 3% CuSo4.5H2O 3000 ppm
Feuilles	1495±50	3174±201 HS	3289±89 HS	1403 ±102 NS
Racines	1219±45	1656±99 HS	2921±58 HS	1771±100 HS

L'analyse statistique du tableau (24) indique l'existence d'un effet hautement significatif des plantes traitées au niveau des deux organes (feuilles / racines).

VI. 3.2 Potassium

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

Partie aérienne :

Les résultats signalent que les teneurs en potassium ont baissé respectivement chez les feuilles des plantes traitées par la solution saline (0,5%) et sous solutions métalliques (CuSO₄.5H₂O) à : 2500 et 3000ppm en comparant avec les feuilles des plantes témoins (442ppm) fig (26); tandis que sous traitement de NaCl 3% et (CuSO₄.5H₂O) à : 2000 ppm, on note une augmentation considérable (442 ppm) par rapport aux plantes non traitées (442ppm).

Partie souterraine :

L'accumulation du potassium chez les racines des plantes traitées par les différentes doses salines et métalliques sont élevées en comparant avec les racines des témoins (214,5 ppm).

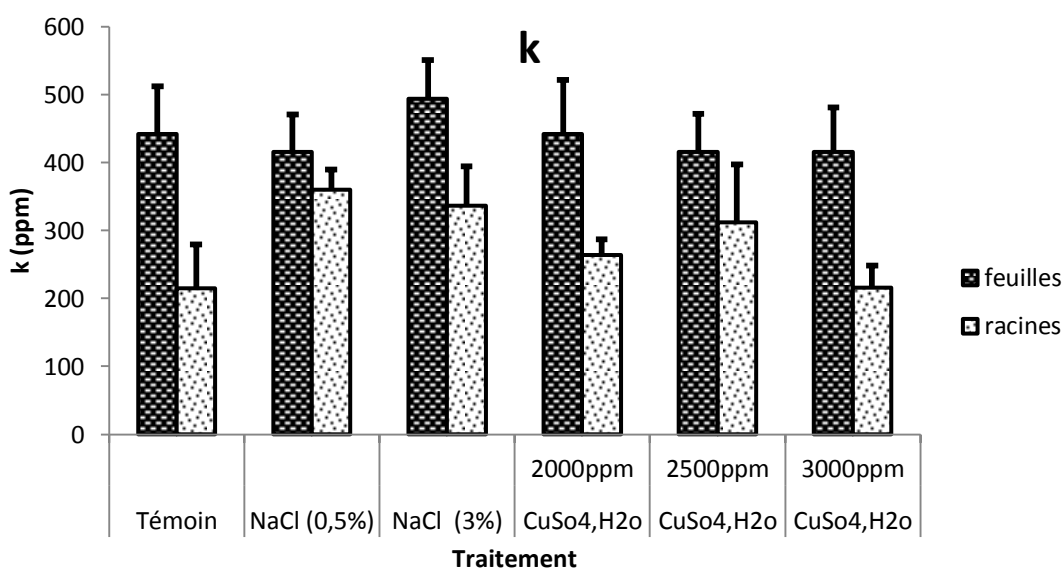


Fig 26 : Teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress et saline et métallique (Na Cl + CuSO₄.5H₂O).

Tableau 25 : Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress salin et métallique.

Traitement	Témoin	NaCl (0,5%)	NaCl (3%)	CuSo ₄ .5H ₂ O 2000	CuSo ₄ .5H ₂ O 2500	CuSo ₄ .5H ₂ O 3000
Feuilles	442±70	416±55 S	494±57 HS	442±80 NS	416±56 S	416±65 S
Racines	214.5±65	360±30 HS	336±58 HS	264±23 HS	312±85 HS	216±32 NS

L'analyse statistique à l'aide du Test de Fisher à $p= 5\%$ (tableau 24), indique un effet significatif des résultats.

b - Sous traitement combiné de (NaCl 0,5%+ CuSo₄ . 5H₂O)

Partie aérienne :

Selon la fig.27, l'addition du sel et du cuivre à l'induit combiné chez les plantes de *Atriplex canescens* un accroissement de la teneur en potassium dans les feuilles des plantes traitées aux NaCl 0,5%+ (CuSo₄.5H₂O.) à 2000 et 3000ppm.

Par contre le taux de potassium a diminué de (442 ppm à 3000 ppm) pour les plantes stressées aux solutions combinées (NaCl 0,5% + CuSo₄.5H₂O) à 2500ppm .

Partie souterraine :

Les valeurs enregistrées pour l'accumulation de potassium au niveau des racines, ont tendance à augmenter légèrement en fonction de la salinité et le stress métallique ; le taux de potassium passe de 214.5ppm pour les plantes non stressées (312, 288 et 216ppm) pour les plantes traitées respectivement.

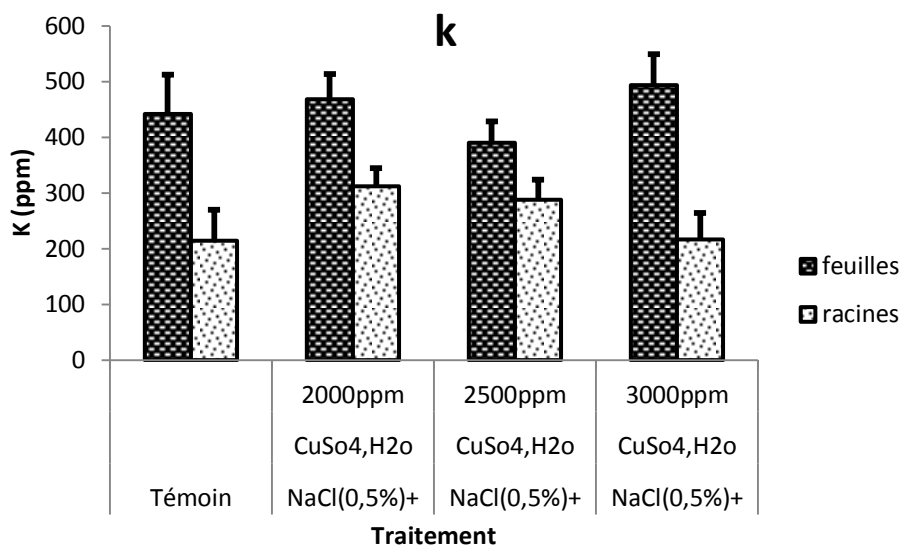


Fig 27 : Teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 26: Analyse statistique à l'aide de test de Fisher (à p = 5%) des teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné NaCl. (CuSo₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 0,5% CuSo ₄ .5H ₂ O / 2000	NaCl 0,5% CuSo ₄ .5H ₂ O /25000	NaCl 0,5% CuSo ₄ .5H ₂ O /3000
Feuilles	442±70	468 ±45 S	390 ± 39 HS	494 ± 55 HS
Racines	214.5±65	312 ±33 HS	228 ±36 HS	216±48 NS

L'analyse statistique du (tableau 26) révèle l'existence d'un effet significatif des plantes traitées par rapport aux plantes non traitées.

c - Sous traitement combiné de NaCl+ (CuSo4. 5H₂O)

Partie aérienne :

Chez les plantes témoins de *Atriplex canescens*, le taux de potassium est (442ppm), ainsi que pour les plantes en situation stressante, le taux enregistré est de (494-442ppm) chez les feuilles soumises à 2000 et 2500 ppm consécutivement fig.28.

Les plantes qui reçoivent les solutions NaCl 3% + (CuSo4.5H₂O) à :3000 ppm , leurs taux de potassium a diminué de 30% par rapport aux plantes non traitées .

Partie souterraine :

Le traitement saline et métallique NaCl 3% +(CuSo4.5H₂O) à 2000ppm des plantes provoque une faible accumulation du potassium dans les racines par rapport aux plantes témoins. Le taux de potassium a légèrement baissé avec la concentration saline et métallique (NaCl 3% + CuSo₄.5H₂O) à : 2500 et 3000ppm , comparativement aux racines témoins .

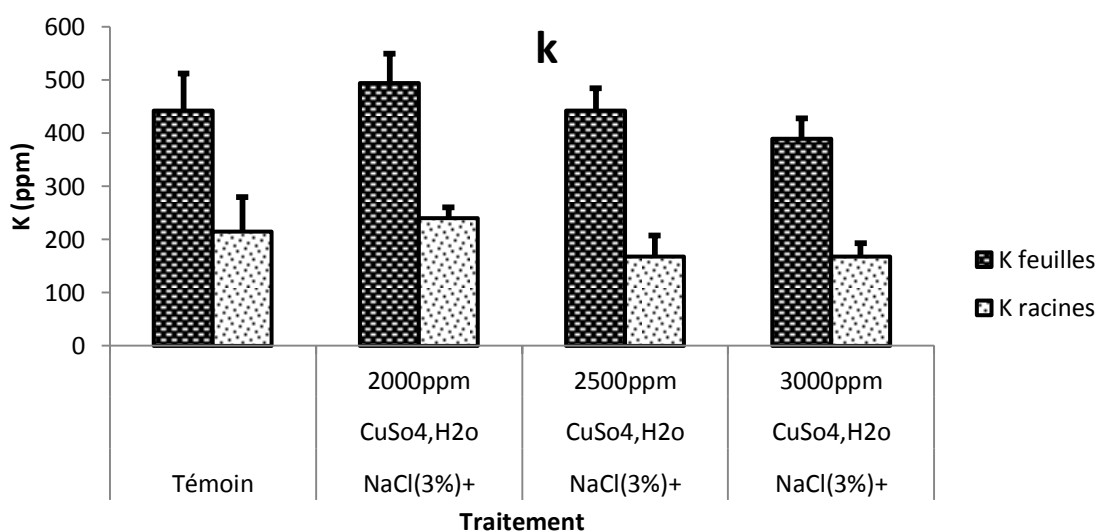


Fig 28 : Teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSo₄.5H₂O).

Tableau 27 : Analyse statistique à l'aide du test de Fisher (à $p = 5\%$) des teneurs en potassium dans les feuilles et les racines des plantes de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt après le stress combiné de NaCl + (CuSO₄.5H₂O).

Traitement	Témoin	NaCl 3% CuSO ₄ .5H ₂ O/2000	NaCl 3% CuSO ₄ .5H ₂ O/2500	NaCl 3% CuSO ₄ .5H ₂ O/3000
Feuilles	442±70	494 ±55 HS	442±42 NS	390±37 HS
Racines	214,5±65	240 ±20 S	168±39 HS	168±25 HS

L'étude statistique (tableau 27) à l'aide du test de Fisher à $p=5\%$ indique que la différence entre les teneurs en potassium présente un effet hautement significatif dans les feuilles et les racines soumises aux traitements de (NaCl 3% +CuSO₄.5H₂O) 3000ppm, en comparant avec l'apport de la solution nutritive, alors que le test marque un effet non significatif chez les feuilles sous traitement de NaCl 3% CuSO₄.5H₂O 2500ppm, et un effet hautement significatif dans le même traitement, ainsi qu'un effet significatif chez les racines sous traitement de (NaCl 3% CuSO₄.5H₂O 2000 ppm).

DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALE

La salinisation est une contrainte majeure qui affecte la croissance et le développement des plantes. La réponse de l'espèce de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt à la salinité pourrait être un indicateur de la tolérance de cette plante au sel. Le comportement de cette espèce a été évalué à travers différents paramètres (biométriques, hydriques, et minéraux) sous le stress salin (NaCl 0,5% - 3%) et métallique (CuSO₄.5H₂O 2000 – 2500 et 3000 ppm).

La surface foliaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt sous le traitement de (NaCl 0,5% et 3%) semble indifférente au niveau de la concentration en sel, elle manifeste une chute entre (0,90 cm² et 1,09 cm²) respectivement par rapport aux plantes témoins.

L'effet du stress métallique sur la surface foliaire ne montre aucune différence en comparant aux plantes non traitées. Parallèlement, la surface foliaire des plantes traitées par le sel (NaCl 0,5% et 3%) par rapport aux plantes traitées par les solutions combinées, l'efficacité des traitements ne manifeste aucun effet significatif.

Plusieurs travaux ont démontré que lorsque la salinité augmente, la transpiration et la surface foliaire diminuent. La transpiration varie en fonction de la surface foliaire, par relation de proportionnalité (Auge et al., 1986) les concentrations élevées de NaCl réduisent fortement la surface foliaire et augmentent la densité stomatique : on en déduit donc que les feuilles de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt ferment généralement leurs stomates lorsque le stress salin s'intensifie pour minimiser les pertes en eau. Une limitation de la surface foliaire et le contrôle de l'ouverture et la fermeture des stomates a été adopté par (BEGG et TURNER, 1976 : BLUM et al. , 1981 : ARAUS et al. 1EVETT , 2002).

En conclusion, la surface foliaire de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt est plus restreinte, elle implique ainsi une réduction du nombre de stomates conduisant à une économie d'eau plus élevée.

En ce qui concerne le volume racinaire, nos résultats signalent que la croissance racinaire en volume sont indifférents à la contrainte métallique et ils présentent une différence significatif vis-à-vis la solution métallique, pour les plantes stressées aux solutions salines, la significativité est marquante au niveau de (NaCl 3%).

Le volume racinaire des plantes de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt montre que la concentration présente une baisse légère comparativement aux plantes témoins ; l'influence de la solution combinée de sel (0,5%) avec les sulfates de cuivre (2000 ppm) sur la croissance des racines, ne manifeste aucun effet significatif.

En rapprochant tous les traitements ensemble, les résultats indiquent un effet hautement significatif sur les plantes traitées par (NaCl 3%) par rapport au (NaCl 0,5%)

; et un autre effet hautement significatif est marqué dans tous les traitements combinés en comparant au (NaCl 3%).

Nos résultats convergent vers ce obtenu par plusieurs recherches sur le comportement de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt, selon OSMOND et al (1980), les halophytes comme *Atriplex* spp, montrent une stimulation de croissance à des concentrations importantes de NaCl, qui sont inhibitrices de croissance chez les glycophytes. L'action de sels dans leur travail, est d'autant plus marquée que la concentration saline, confrontant ainsi les résultats trouvés par SANCHEZ-BLANCO et al (1991), qui ont montré que la diminution du poids sec de la feuille chez les tomates est une conséquence de la salinité. ASHBY et BEADLE (1957) indiquent que la croissance chez *Atriplex inflata* F. MUELL. et *A. nummularia* Lindl. a été plus importante à 600 mm de NaCl par rapport au témoin.

Notre étude sur les longueurs des tiges suggère une variabilité hautement significative dans les traitements combinés de (NaCl 3% + CuSO₄ 2500 et 3000 ppm) par rapport aux plantes non traitées.

L'efficacité du sel combiné avec les sulfates de cuivre dans les doses (NaCl 3% + CuSO₄ 2000 ppm) et (NaCl 0,5% + CuSO₄ 3000 ppm) montre un effet significatif par rapport aux plantes témoins.

Sous le traitement de la solution métallique (CuSO₄ 2000 ppm), l'addition du cuivre présente une diminution significative de la longueur des tiges par rapport aux plantes arrosées par la solution nutritive.

Les résultats attestent que les différentes concentrations salines et métalliques provoquent une dévaluation non significative de la longueur des tiges comparativement aux plantes traitées avec (NaCl 0,5% et 3%) en exception des plantes soumises à la solution combinée de (NaCl 3% + CuSO₄ 3000 ppm) comparativement au (NaCl 3%).

Selon (Levy et Shalvet (1990), ont noté que la réduction de la croissance, sous l'effet du stress salin, peut avoir lieu sans signes de toxicité, suggèrent que la diminution de la croissance (exprimée par la capacité photosynthétique) pourrait être en relation avec une perte de turgescence. Tandis que (Fernandez-Ballester et al., 1977), suggèrent que la diminution de la turgescence n'est pas la cause de la réduction de la croissance du bigaradier .

La réduction du développement des racines et des tiges serait due aux effets toxiques des teneurs élevées de NaCl et au déséquilibre de la disponibilité en nutriments (Datta et al., 2009).

A partir de nos résultats, et en ce qui concerne le sel et les sulfates de cuivre (NaCl 3% + CuSO₄), on peut conclure que la teneur en eau, ne dépend pas de la teneur en sel et du cuivre du milieu puisque les plantes dans ce milieu ont présenté une capacité d'alimentation hydrique hautement significative.

C'est ce que confirme Gale (1975) lorsqu'il écrit : « L'ajustement osmotique et la réduction de la transpiration se conjuguent pour vaincre toute augmentation de la résistance des racines au passage de l'eau. ».

Il en résulte que la plante parvient à extraire l'eau des milieux salés et à la conserver, ce qui permet le maintien de la turgescence, chez les plantes incapables de réaliser un ajustement osmotique complet, probablement en raison d'une absorption insuffisante du sel, le cycle de développement ne se poursuit pas correctement malgré la diminution de la transpiration (Gale, 1967). Nos résultats confirment ceux trouvés par (Gale, 1967, Strogonov, 1964), qui affirment que le sel diminue la transpiration des glycophytes. Conséquence ou cause de la diminution de la transpiration, l'absorption hydrique par les racines est également réduite.

A travers nos résultats obtenus, et les analyses statistiques effectués, il en ressort que : La teneur relative en eau varie inversement avec le taux de la salinité, le stress métallique et l'effet combiné (NaCl + CuSO₄). Lorsque ces derniers augmentent, la teneur relative en eau diminue. Cette variation est importante chez *Atriplex canescens* (Purch) Nutt. Selon (Albouchi et al. 2003) le RWC dans les feuilles est un bon indicateur de l'état hydrique, elle diminue légèrement chez les plantes stressées à la salinité (Albouchi et al., 2003). Cela se remarque particulièrement lorsque le végétal est soumis à 600 meq de sels, ce qui semble être un comportement de résistance au stress salin.

En effet les teneurs relatives en eau obtenues sont de : 97,3% - 91,7% - 92,84% - 93,28% - 87,73% pour *Atriplex canescens* (Purch) Nutt représentant respectivement le témoin, les sels, les sulfates de cuivre et l'effet combiné de (NaCl 0,5% + CuSO₄.5H₂O 3000 ppm) et (NaCl 3% + CuSO₄.5H₂O 3000 ppm). Ces constatations sont confirmées par plusieurs travaux, en effet le stress salin induit des changements au niveau du statut hydrique de la plante (Hasegawa et al., 2000), réduit le contenu relatif en eau des feuilles, diminue la transpiration et l'absorption hydrique par les racines. Ce fait a été établi chez les plantes de résistance différentes comme : *Zygophyllum album* et *Atriplex verrucifera*.

Nos résultats sont en conformité avec les travaux de (Soualem S., 2005), ayant indiqué que chez *Atriplex halimus* L. stressée au NaCl et à l'eau de mer (50% et 100%), le RWC diminue ; (Albouchi et al., 2003) chez *Casuarina glauca* (Soualem S., 2005), chez la luzerne et chez le blé.

Notre résultat ne montre pas de significativité entre les traitements par la salinité, les sulfates de cuivre et la solution combinée (tableau 18-119-20-21). Cela se traduit par la diminution des pertes d'eau par transpiration dans les feuilles de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt après la 30^{ème}, 60^{ème} et la 120^{ème} minute dans les différentes doses déjà citées.

Des travaux récents ont démontré que la diminution de la transpiration de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt serait une conséquence de la fermeture des stomates lorsque le

stress salin s'intensifie, pour minimiser les pertes d'eau. (MONNEVEUX, P ; 1989 ;ABOUSSOUANE et al ;1985) pensent que cette résistance stomatique se manifeste par une présence de nombreux stomates de petites tailles et à fermeture rapide.

Le maintien d'une certaine quantité d'eau intracellulaire permet également de diluer les sels introduits HELLER , R et al (2004), notent que les plantes soumises à un stress salin, ferment leurs stomates plus tôt que les plantes à conditions normales, cela augmente la résistance stomatique du fait de la diminution de l'absorption hydrique.

En outre, (NILSON et al. ,2007) ont établi la relation entre la transpiration et la résistance stomatique chez *Arabidopsis thaliana* par l'augmentation de cette résistance lors du stress salin, afin de minimiser les pertes d'eau.

Nos résultats sont en accord avec les travaux menés par TREMBLIN et FERARD (1994) puis OUERGHI et al (2000), montrent que les teneurs en Na^+ sont plus élevées dans les parties aériennes et que ce cation migre vers les feuilles pour s'y accumuler. Ce transfert de Na^+ des organes souterrains vers les parties aériennes et son enrichissement, augmente avec l'intensité et la durée du stress salin (OUERGHI et al. ,2000).

Pour *Atriplex canescens* (Purch) Nutt, notre résultat montre une augmentation du Na^+ dans les feuilles par rapport aux racines aux doses de (NaCl 0,5% et 3%), contrairement aux

doses de ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2500 et 3000 ppm) où l'accumulation du sodium est plus élevée dans les racines que les feuilles.

Sous l'effet du stress combiné salin et métallique l'augmentation est remarquable au niveau de (NaCl 3% $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 3000 ppm) dans les racines comparativement aux feuilles. Alors que AZZOUZ (2011) rapporte cette réduction du cation seulement dans les racines de la fève (*vicia faba*) sous l'effet du plomb.

Les mêmes observations sont rapportées chez le blé (KHIZAR et al. ,2013 ; LAMHAMDI et al. , 2013), l'épinard (LAMHAMDI et al. ,2013), chez *Atriplex canescens* (Purch) Nutt sous l'action combinée du sel et du plomb (GHELLAI. ,2014).

Une significativité est remarquée au niveau des différents traitements du stress salin, métallique et combiné.

Le potassium joue un rôle dans le contrôle de la turgescence cellulaire (SAIRAM et TYAGI. ,2004), et contribue également dans la réduction du potentiel osmotique des cellules racinaires pour faciliter les processus de solutés (HOUALA. ,2007).

Par conséquent, le maintien d'un k^+ adéquat est essentiel pour la survie de la plante dans le milieu salin (HOUALA. , 2007).

L'accumulation du k^+ dans la plante de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt accroît au niveau des feuilles par rapport aux racines dans les différents traitements du stress salin, métallique et combiné, avec un effet significatif.

Nos résultats convergent vers ceux obtenus par BOUKRAA (2008) sur les plantes d'*Atriplex halimus* traitées au NaCl ou NaCl+CaCl₂ à 300 et 600 meq, où les teneurs de k^+ baissent dans les feuilles quand le milieu salin est concentré en NaCl, mais augmentent dans les tiges, comparativement aux plantes témoins.

Par ailleurs, avec l'utilisation du NaCl+CaCl₂ (OULD EL HADJ-KHELIL 2001) signale que les teneurs en k^+ diminuent dans les plantes de tomate cultivées en présence de NaCl à 50mm et de NaCl à 100mm. La teneur en k^+ diminue fortement dans les organes, et rapporte que cette diminution est reliée avec la forte augmentation de la teneur en Na⁺, tout particulièrement dans les feuilles âgées.

En conclusion finale, cette étude montre que l'espèce de *Atriplex canescens* (Purch) Nutt semble être tolérante au sel et aux sulfates de cuivre (CuSO₄.5H₂O) sous ces conditions expérimentales.

Ceci est témoigné par l'accumulation du Na⁺ et du K⁺ dans les feuilles et les racines de cette espèce (le Na⁺ est le seul cation absorbé en forte concentration).

En plus, nos observations personnelles concernant la morphologie de cette espèce montrent une plante verte pendant le traitement et sous de fortes concentrations en cuivre.

Suite aux résultats que nous venons de décrire, nous pouvons proposer quelques orientations afin d'apporter de nouvelles informations sur les réponses des plantes aux stress salins et métalliques.

- Il serait important de tester la capacité phytoremédiatrices de cet espèce sous d'autres conditions expérimentales en tenant compte de l'âge de la plante car elle répond aux contraintes environnementales de manière différente au cours de son développement.
- Il serait aussi intéressant de tenir compte de la durée du stress pour mieux valoriser la réponse de la plante.
- Il serait important d'augmenter les concentrations phytoremédiantes vis-à-vis des sols très pollués.
- Généralement, les sols sont pollués par plusieurs métaux, dans ce contexte, il serait souhaitable de faire d'autres études sur cette espèce sous diverses contraintes métallique

Références bibliographiques

1. **ADEL, J. ET BARDER, J., 2002** : Studies of some traits related to salinity tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L). Proceeding of the International Symposium on optimum resources utilization in salt-affected Ecosystems in arid and semi-arid regions, Cairo, Egypt, p102.
2. **Afshin Qishlaqi et Farid , 2007**. More Statistical Analysis of Accumulation and Sources of Heavy Metals Occurrence in Agricultural Soils of Khoshk River Banks, Shiraz, Iran. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci., 2 (5): 565-573, 2007. ISSN 1818-6769. IDOSI Publications, 2007
3. **ALARCON J J., SANCHEZ-BLANCO M J., BOLARIN M J., TORRECILLAS A., 1994**: Growth and osmotic adjustment of two tomato cultivars during and after saline stress. Plant Soil, Vol. 66: 75- 82.
4. **Albouchi A., Bejaoui Z., et Hedi El Aouni M., 2003** – Influence d'un stress hydrique modéré ou sévère sur la croissance de jeunes plants de *Casuarina glauca* Sieb. Edit. Science et changements planétaires. Sécheresse. Vol. 14, (3), pp137-142.
5. **ALEM C., AMRI A., 2005**: Importance de la stabilité des membranes cellulaires dans la tolérance à la salinité chez l'orge. Reviews in Biology and Biotechnology, Vol. 4, No. 1 : 20- 31.
6. **AL-KARAKI G N., 2000**: Growth, water use efficiency, and sodium and potassium acquisition by tomato cultivars grown under salt stress. Journal of Plant Nutrition. Vol. 23, No. 1: 1- 8
7. **Anonyme , 2000** Introduction to Phytoremediation. EPA/600/R-99/107.
8. **Anonyme, 2004**. Phytoremédiation. CLEFS CEA - N° 49 - PRINTEMPS.
9. **ARAUS JL , FERRERO A and VENDRILL P. , 1991**: Epidermal conductance in different parts of durum wheat grown under Mediterranean condition : the role of epicuticular waxes and stomata. Plant. Cell Environ 14, p.545-558.
10. **ARBAOUI, M., BBENKHELFA, M. ET BELKHODJA, M. , 1999** : Réponses physiologiques de quelques variétés de blé dur à la salinité au stade juvénile . CIHEAM – Option Méditerranéennes, pp. 167-169.
11. **Archambault DJ, & K Winterhalder. 1995**. Metal Tolerance in *Agrostis-Scabra* from the Sudbury, Ontario, Area. Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique 73, 766-775.

Références bibliographiques

12. **Arfaoui, A., Frini, N., et Sara, E., 2008.**Modelling of adsorption of the chromium ion modified clays. *J. Desalination*, 222:474- 481.
13. **ASLOUM H., 1990:** Elaboration d'un système de production maraîchère (Tomate, *Lycopersicon 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.
14. **Auboiroux, M., Baillif, P., Touray, J.C. et Bergaya, F.,1996.** Fixation of Zn²⁺ Pb by a Ca-montmorillonite, *J. Applied Clay Science*, 11:117-126.
15. **Auge R., Beauchsne G., BOCCON- Gibod J., Decourtye L., Digat B., Jalouzot R.,Morand J-CI., Reynoird JP., Strull DG etVidalie M., 1986** – La culture in vitro et ses applications horticoles. Techniques et documentations. Ed. Lavoisier, 256P.
16. **Azzouz F., 2011-**Effet de l'interaction plomb-salinité sur les réponses physiologiques et biochimique d'un halophyte (*Atriplex halimus* L .) et une glycophyte (*vicia faba* L). Mémoire de magistère. P 65.
17. **BAATOUR O., M'RAH S., BEN BRAHIM N., BOULESNEM F., LACHAAL M., 2004** : Réponse physiologique de la gesse (*Lathyrus sativus*) à la salinité du milieu. *Revue des Régions Arides*, Tome 1, No. spécial : 346- 358.,
18. **BARRS C et WEATHERLEY PE.,1968:** A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves .*Australian Journal of Biological Sciences* .15:413-428.
19. **BEKHOUCHE H., 1992:** Etude de la germination de quelques lignées de pois chiche soumis à la salinité, croissance, anatomie des racines. Thèse D.E.S. Biol. Université d'Oran. 68 P.
20. **BENAHMED H., ZID E., EL GAZZAH M., et GRIGNON C., 1996** -croissance et accumulation ionique chez l'*Atriplex halimus* L. *Cahiers Agricul* 5, pp 367-372.
21. **BENATA, H., BERRICHI, A. B., REDA TAZI, M., ABDELMOUMEN, H. ET MISBAH EL IDRISSE, M., 2006** : Effet des stress salins sur la germination, la croissance et le développement de trois espèces légumineuses : *Acacia tortilis* var. *raddiana*, *Leucaena leucocephala* et *Production Agricole Settat* 16-17 Mars 2006. Recueil des résumés. 25p.
22. **BENHAMIDA ., DJEGHBALA, 2005** : contribution à la caractérisation biométrique et anatomique de la végétation halophile dans les dépressions de la cuvette de Ouargla (cas du chott Ain El-Beida et de la sebkha de Bamendil). Mémoire Ingénieur en Ecologie végétale et Environnement, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 71P.

Références bibliographiques

23. **BENNABI F., 2005:** Métabolisme glucidique et azote chez une halophyte (*Atriplex halimus* L.) stressée a la salinité. Mémoire de magistère en physiologie végétale, Université Es-Senia, Oran, 136 P.
24. **BENREBIHA F Z., 1987:** Contribution à l'étude de la germination de quelques espèces d'*Atriplex* locales et introduites. Mémoire de magister en sciences agronomiques, Institut National Agronomique, El-Harrach, Alger: 5- 20.
25. **Bert, V., et Deram, A. 1999.** Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds. Lille : Environnement et développement alternatif, 154p
26. **BOULGHALAGH, J., BERRICHI, A., EL HALOUANI, H. ET BOUKROUTE, A.,2006 :** Effet des stress saline et hydrique sur la germination des graines du jojoba (*Simmondsia chinensis*(link) scheider). Recueil des résumés. Le Premier Congrès National sur l'Amélioration de Production Agricole, Settat, Maroc,p.24 .
27. **Boukrah H .,2008-**etude comparative de l' adsorption des ions plomb sur différents adsorbants .Mémoire de Magister .P39.
28. **Bradl et al, 2005 Bradl, H. Kim, C. Kramar, U. et Stüben, D. 2005.** Heavy Metals in the Environment H.B. Bradl (editor) 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.
29. **BRUN A., 1980:** Effets comparés de différentes concentrations de NaCl sur la germination, la croissance et la composition de quelques populations de luzernes émeannuelles d'Algérie. Thèse doct. 3 cycle Montpellier.
30. **Brun LA, J Le Corff, & J Maillet. 2003.** Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species. *Environmental Pollution* 122, 361-368.
31. **CALU, G.,2006 :** Effet du stress salin sur les plants. Comparaison entre deux plantes modèles : *Arabidopsis thaliana* et *Thellungiella halophila*. Master 1, Recherche biotechnologie : du gène à la molécule SpectroSciences, article 23, 10p.
32. **Cassereau G., 2001.** Contamination des loutres *Lutra* de l'ouest de la France par quelques éléments traces : Cadmium, Cuivre, Mercure, Sélénium et Zinc. Thèse de Doctorat de l'école nationale vétérinaire de Nantes, 146p.
33. **Chaîneau, C.H., Morel, J.L., Oudot, J. 2000.** Biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize. *Journal of Environmental Quality* 29, 569- 578.
34. **Chatterjee J, & C Chatterjee. 2000.** Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower. *Environmental Pollution* 109, 69-74.

35. **CHERBUY B., 1991:** Les sols salés et leur réhabilitation étude bibliographique. Cemagraf, école. Nat. Renne, 170 P.
36. **CHEVERRY C., 1995:** Comportement des plantes en milieu salé compte rendu de l'ACAD d'ARGRIC De France. Action n° 04. Revu. Bimestrielle. Vol.81 (2) : 42-46
37. **CLARKE JM et Mc MCLAIG T.N.,1982 :** Excised –leaf water retention capability as indicator of drought resistance of Triticum genotype .Can .J.Plant Sci.62,p571-578.
38. **Cook CM, A Kostidou, E Vardaka, & T Lanaras. 1997.** Effects of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of Phaseolus plants. Photosynthetica 34, 179-193.
39. **DABAZ, A., CHAIBI, W. ET BOUZID, S., 2001 :** Effet du NaCl et de régulateurs de croissance sur la germination d'*Atriplex halimus* L. Agriculture. Vol. 10, n°2, pp. 8-135.
40. **Das sarma S et Arora P., 2001** –Halophyls Encyclopedia of life science. 1- 9.
41. **Datta, J. K., S. Nag, A. Banerjef et N. K. Mondal. 2009.** Impact of salt stress on five varieties of wheat (*Triticum aetivum* L.) cultivars under laboratory condition. 13 (3): 93-97.
42. **DEBEZ A., CHAIBI W., BOUZID S., 2001:** Effet du NaCl et de régulateurs de croissance sur la germination d'*Atriplex halimus* L. Cahiers d'Etudes et de Recherches Francophones/Agricultures, Vol. 10, No. 2: 135- 138.
43. **DECHAMP C., MEERTS P. 2003.** La phytoremediation : Panacee pour l'environnementou menace pour la biodiversite ?, Les Naturalistes belges, n°82, pp.135-148.
44. **Dutuit P., 1999** – Etude de la diversité biologique d'*Atriplex halimus* pour le repérage in vitro et in vitro d'individus résistants à des condition extrêmes du milieu. Université de Paris-Sud Publisher by. CTA.
45. **Fernandez-Ballester G., Vicente M., Dionisio R., Antonio C. (1977):** Changes in inorganic and organic solutes in Citrus growing under saline stresses. J. Plant Nutr. 21, p. 2497–2514
46. **FRANCLLET A., LE HOUEROU HN., 1971:** Les Atriplex en Tunisie et en Afrique du Nord. Rome: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture: 249-271.
47. **FROMENT D., 1972:** Etablissement des cultures fourragères d'*Atriplex* en Tunisie central. Bull recherche Agro.C.E.M.L.Vol extra: 590-600.
48. **Gale J. (1967):** Changes in the water balance and photosynthesis of onion, bean and cotton plants under saline conditions. Plant ; 20, 2 : 408-20.

Références bibliographiques

49. **Gale J. (1975)** : Systematic errors in measurement of transpiration and photosynthesis by infrared gas analyses with varying oxygen : nitrogen ratios in the background gas. *J ExpBot* ; 26 : 702-4.
50. **Garbisu, C. et Alkorta I., 2001.** Phytoextraction a costeffective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Biores. Tech.* 77: 229-236.
51. **GAUCHER G., BURDIN., 1974:** Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés, presses, presses Universitaire de France, 230 P.
52. **Ghellai M.,2013-** Action combinée de la salinité et du plomb sur les réponses physiologiques des *Atriplex* .Mémoire de Magister .Labo d'écophysiologie végétale.Université Es-sénia.Oran.
53. **GIRARD P., PROST J., BASSEREAU P., 2005:** Passive or Active Fluctuations in Membranes Containing Proteins *Phys. Rev. Lett.* 94, 088102: 60-64.
54. **Grantz D A., Vaughn D L., Farber R J., Kim B etAshbaug H., 1998** – Transplanting native plants to revegetate abandonet farmland in the western Mojave desert. *J . Environm. Qual.* 27, 960 -967 .
55. **GREENWAY, H. MUNNS, R., 1980:** Mechanism of salt tolerance in non-halophytes. *Annual Review of Plant Physiology.* Vol 3, pp.149-190
56. **GROUZIS M., BERGER A., HEIM G., 1976:** Polymorphisme et germination des grains chez trios espèces annuelles du genre *Salicornia*. *Oecol. Plant.* 11 (1): 41-52.
57. **Guerrier, G. (1984)** Relations entre la tolérance ou la sensibilité à la salinité lors de la germination des semences et les composantes de la nutrition en sodium. *BiologiaPlantarum (PRAHA)* Vol. 26, n°1, pp. 22-28.
58. **H.C.D.S., 1996:** Notice bibliographique sur quelques plantes fourragères et pastorales. Haut commissariat du développement de la steppe.15 P.
59. **HADJADJ S., 2009:** Contribution à l'étude de l'effet de la salinité sur des marqueurs biochimiques (proline et sucres solubles) de plantes juvéniles d'*Atriplex halimus* L. et d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. Mémoire de Magister en Biochimie et analyse des bioproduits, Univer Kasdi Merbah Ouargla, 100 P.
60. **HAMDY A., 1999** - saline irrigation assessment and management for sustainable use, saline irrigation: halophyte production and utilization. Project N° 1C 18 CT 96-0055, pp 152-226.

Références bibliographiques

61. **HAMDY A., LIETH H., MEZHER Z., 1995:** Halophyte performanace under high salinity levelsian overview saline irrigation, halophyte production and utilization. roject. N° IG. 18. CT.96.55: 20-58.
62. **HAMZA M, 1977:** Action de différents apports de chlorure de sodium sur la physiologie de deux légumineuses (Phasolus vulgaris) sensible et (Hedysarumcurnosum) tolérante, relation hydrique et ionique. Thèse de doctorat. Univ Paris VII.
63. **HAOUALA F., FERJANI H., BEN EL-HADJ S., 2007:** Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na^+ , K^+ et Ca^{++}) et du chlore (Cl^-) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, Vol. 11, N°.3 : 235- 244.
64. **HAYASHI H., MURATA N., 1998:** Genetically engineered enhancement of salt tolerance in higher plants. In: Sato Murata N, (Ed.), Stress Response of Photosynthetic Organisms: Molecular Mechanisms and Molecular Regulation. Elsevier, Amsterdam: 133-148.
65. **Henri-Charles, D., Daniel, P., Annabelle, D. et Catherine, L. 2001** LE phytomanagement Eléments de synthèse. Pôle de Compétence Sites et Sédiments Pollués. ISBN 2-9517290-0-6
66. **Hoagland D et Arnon D I., 1938** – The water culture méthode for growing plants soil.Univer. Calif.AES.cir. 347 ,1-36.
67. **HOPKINS W G., 2003:** Physiologie végétale. 2 édition. De Boeck, Bruscelles: 61-476.
68. **Jeannot, R., Lumière, B. et Chiron, 2001.** Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués.
69. **Jemal, F. ,etGhorbal, H.,2002.** la phytoremédiation. Revue H.T. E. N° 122
70. **JOHN H. DUFFUS, 2002,** “Heavy metals”—A meaningless term? Pure Appl.Chem. Vol. 74, No. 5, pp. 793–807, 2002 .
71. **JONES H G., FLOWERS T J., JONES M B., 1989:** Plants under stress. Cambridge, Cambridge University Press.
72. **Judicaëlle, B., 2008.** Adaptation aux métaux lourds d'une Fabacée (légumineuse) :Réponses phénologique et moléculaire au plomb du Lathyrussativus L. Thèsedoctorat Université Paris Est.
73. **Judicaëlle, B., 2008.** Adaptation aux métaux lourds d'une Fabacée (légumineuse) :Réponses phénologique et moléculaire au plomb du Lathyrus sativus L. Thèse doctorat Université Paris Est.

Références bibliographiques

- 74. KINET JM., BENREBIHA FZ., BOUZID S., LAILHACAR S., et DUTUIT P; 1998** - réseau Atriplex. Allier biotechnologie et écologie pour une sécurité alimentaire accrue en régions arides et semi-aride. Cahier agricultures, Vol. 7, N°6, pp 505-509.
- 75. Lailhacar S., Rivera H., Silva H et Caaldentey J., 1996** – les espèces fourragères arbustives d’atriplex sont aussi productives en bois pour la consommation des petits paysans des régions ardes. Faculté des sciences Agraire et forestière, Université du Chili, Santiago.r
- 76. LamhamdiM.,ElGaliou O .,Bakrim A., Novoa-Munoz J C., Aias-EstévezbM etAraba A ., 2013**-Effect of lead stress on mineral content and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.)And spinach (*Spinacia oleracea* L.) seedlings Rene Lafontsaudi. Journal of Biological Sciences 20,29-36
- 77. LARHER F., HUQIS M., GERNAT-SAUUGE D., 1987:** Les colloques d’INRA. N°7, nutrition azotée des légumineuses, P.GUY. Ed INRA: 181-192.
- 78. LE HOUEROU H N., 1992:** Relation entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaires et secondaires en zone arides. In : l’aridité, une contrainte au développement, Ed ORSTOM, Coll. Didactiques : 197-220.
- 79. le Houérou et pontanier, 1988 :**Les plantations sylvopastorales dans la zone aride de Tunisie. Rev : pastoralisme et développement, Montpellier. pp : 16-23 in
- 80. LEVIGNERON A., LOPEZ F., VANSUYT G., BERTHOMIEU P., FOURCROY P., CASSE-DELBART F., 1995:** Les plantes face au stress salin. Cahiers Agricultures.4 (4): 263-273.
- 81. LEVIGNERON A., LOPEZ F., VANSUYT G., BERTHOMIEU P., FOURCROY P., CASSE-DELBART F., 1995:** Les plantes face au stress salin. Cahiers Agricultures.4 (4): 263-273.
- 82. Iyin I., Travnikov, O., Ass, W. and Ugerud, H. Th., 2003.** Heavy metals: transboundary pollution of the environment. EMEP Status Report 2/2003. MSC-E, June, 2003. 40 pgs.
- 83. MAILARD, J., 2001 :** le point sur l’ irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risques et recommandations. Handicap International. Novembre 2001,34p.
- 84. MAIRE R., 1962:** Flore de l’Afrique de Nord Vol (VIII), Ed. PAUL, LECHEVALIER, Paris. 330 P.
- 85. Marc Verloo, 2003.** Les métaux lourds dans les denrées alimentaires :origine et évolution des teneurs. Symposium “Les oligo-éléments dans l’alimentation en Belgique - Données récentes” Institut Danone

Références bibliographiques

86. **Mermoud, A. (2006)** Cours de physique du sol : Maîtrise de la salinité des sols. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 23 p.
87. **Mukesh, K. Raikwar, Puneet Kumar, Manoj Singh et An and, 2008.** Singh Toxic effect of heavy metals in livestock health. Indian Veterinary Research Institute Izatnagar - 243 122, Bareilly (U.P.) Veterinary World, Vol.1(1):28-30.
88. **NDOUR, P. ET DANTHU. P., 2000 :** Effet des contraintes hydrique et saline sur la germination de quelque acacias africain. Projet National de Semences Forestières du Sénégal. 11p.
89. **NIU X., RSESSAN R A., HASEGAWA P M., PARDO J M., 1995:** Ion homeostasis in NaCl stress environments. Plant Physiology. 109 (3): 735- 742.
90. **OMS IPCS., 1998.** Environmental Health Criteria n°200: copper. World Health Organisation International Programme on chemical Safety.
91. **OSMOND CB., BJORKMANNO. , ANDERSON D J., 1980 :** physiological processes in plant ecology : towards a synthesis with Atriplex .Springer- Verlag, Berlin.463P.
92. **OUERGHI, Z., ZID, E., HADJJI, M. ET SOLTANI, A., 1998 :** comportement physiologique du blé dur (*Triticum durum* L.) en milieu salé. CIHEAM – Option Méditerranéennes, pp.309-313.
93. **Ouerghi Z . ,Zid E., Hadji M et Soltani A.,2000-** Comportement physiologique du blé dur (*triticum durum* L.) en milieu salé .in Royo C ., Nachit MM., Difonzo N ., Arous JL., (eds).Durum wheat improvement in the méditerranéan region :New challenges : l'amélioration du blé dur dans la région méditerranéenne : Nouveaux défis. Zaragoza :CIHEAM.IAMZ :309-313.
94. **PAUL M.H , PLANCHTON C, ECOCHARD R.,1979:** Etude des relation entre le développement foliaire , le cycle de développent et la productivité chez les soya .Am Amélio plant ,29,p.479-492.
95. **Pilon-Smits, E. 2005.** Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology 56: 15-39.
96. **POLJAKOFF-MAYBER A., 1988 :**Ecological –physiological studies on the responses of higher plants to salinity and drought. Arid Zone Res.6: 163- 183.
97. **RAACHE I ., KARBOUSSA-HALOUA R., 2004:**caractérisation morphologique et anatomique de quelque espèces halophiles dans la cuvette de Ouargla. Mémoire Ingénieur , Université de Ouargla, 67 P.
98. **REJILI M., VADEL M A., NEFFATP M., 2006:** Comportements germinatifs de deux populations de *Lotus creticus* (L.) en présence du NaCl. Revue des Régions Arides, Vol. 17, N°.1 : 65- 78.

Références bibliographiques

99. **REYNOLDS M P., ORTIZ-MONASTERIO J I., MCNAB A., 2001:** Application of Physiology in Wheat Breeding. Mexico, D.F.: CIMMYT: 101-111.
100. **ROBERT M., 1996:** Le sol : interface dans l'environnement ressource pour le développement. Ed. MASSON, Paris. 96 P.
101. **Sairam RK et Tyagi A. , 2004-** Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants .Current Science, 86(3),10 :407-421.
102. **Salt, D.E., Smith, R.D. et Raskin, I., 1998.** Les mécanismes de la phytoaccumulation cellulaire . La phytotolérance chez les plantes hyperaccumulatrice. Annu. Rev. Plants physiol. 643-668.
103. **SANCHEZ-BLANCO ,M ,J :BOLARIN.M ALARCON.JJ and TORRISLAS A.,1991** :Salinity effect on water relation in lycoperscion and its wild salt-tolerant relative spiciesL.pennel.Physiologia plantarum83 :269-274.
104. **SCIPPA G,DI MICHEL M, ONELLI E,PATRIGNANI G,CHIATANTE R ,and BRAY E.,2004:** The histone –like protein HI-S and the reponse of tomato leaves to water deficit .J Exp. Bot . 55:99-100.
105. **SERRANO R., GAXIOLA R., 1994:** Microbial models and salt stress tolerance in plants. Crit. Rev. Plant Sci. Vol. 13: 121- 138.
106. **SERVANT J M., 1975:** Etude pédologique des sols halomorphes. Thèse. Doc. Uni. Montpellier, 194 p.
107. **SHIPI ET NARENDRA.,2005 :** cold salinity and droughth stress
108. **Soualem S., 2005 -** Contribution à l'étude des comportements morpho physiologiques, anatomiques et biochimiques d'une halophyte,Atriplex halimus L. stressée à la salinité. Thèsede magister 79 p.
109. **SZABOLCS I., 1994 :** Soils and salinization. In: Pessarakli, M. (Ed.), Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker, New York: 3-11.
110. **THOMSON WW., 1975:** The structure and function of salt glands .In: Plants in Saline Environments .Ecological Studies 15. Plojakoff-Mayber, A.and J. Gale (eds.):118-46.Springer-Verlag, Berlin
111. **TREMBLIN G., COUDRET A., 1986:** Salinité, transpiration et échanges de CO2 chez Halopeplisamplexicaulis (Vahl.) Ung. Oecol. Plant. 7 (21) : 417-431.
112. **Tremblin G et Ferard G. , 1994-** Croissance et accumulation de sels chez Halopeplisamplexicaulis (Vahl.) Ung. Cultivé à différentes salinités .Acta Oecologica . 15(3) : 355-364.

113. **TREMBLIN G., 2000** : Comportement auto-écologique de *Halopeplisamplexicaulis*: plante pionnière des sebkhas de l'ouest algérien. *Sécheresse*.11 (2): 109-116.
114. **UNGAR, I. A., 1991: Growth Regulators**. In: *Ecophysiology of Vascular Halophytes*. Ungar, LA. (Ed.). CRC Press Inc. Boca Raton, Florida.pp.87- 93.
115. **Vinit-Dunand F, D Epron, B Alaoui-Sosse, & PM Badot. 2002**. Effects of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. *Plant Science* 163, 53-58.
116. **Voorhees, M.E., Uresk, D.W et Trlica,M.J 1991**. Substrate relations for rillscale(*Atriplex suckleyi*) on bentonite mine soil. *J. Range Manage.* 44:34-38. Watson, M.C., G.S. Banuelos, and J.J Riley. 1994. Trace element.
117. **Wang, L.,Smac, D.A., Shapir, N.,Wackett, L.P., Vance, C.P.,Olszewski, N.F., et Sadowsky, M.J 2003**. Biodegradation of atrazine in transgenic plants expressing a modified bacterial atrazine chlorohydrolase (*atzA*) gene. *Plants Biotechnology Journal*3,475-486.
118. **ZHU J.K., 2001**: Plant salt tolerance. *Trends in plant Sci.* 6: 66-71.
119. **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 LibbeyEurotext, Paris: 91-108

Test t pour des Echantillons Indépendants (surface foliaire)

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoïn vs. saa0,5%	2.545667	1.640667	1.986649	4	0.117901	3	3	0.787337	0.051501	233.7189	0.008521
Témoïn vs. sal3%	2.545667	1.452333	2.393355	4	0.074894	3	3	0.787337	0.078450	100.7258	0.019661
Témoïn vs. cuivre2000	2.545667	2.256000	0.580894	4	0.592469	3	3	0.787337	0.355070	4.9169	0.338014
Témoïn vs. cuivre2500	2.545667	2.239333	0.627842	4	0.564169	3	3	0.787337	0.307053	6.5750	0.264026
Témoïn vs. cuivre3000	2.545667	2.187667	0.755578	4	0.491956	3	3	0.787337	0.231487	11.5683	0.159131
Témoïn vs. sal0,5%+cuivre2000	2.545667	2.239000	0.606120	4	0.577149	3	3	0.787337	0.384782	4.1869	0.385587
Témoïn vs. sal0,5+cuivre2500	2.545667	2.197000	0.753043	4	0.493319	3	3	0.787337	0.152434	26.6784	0.072258
Témoïn vs. sal0,5%+cuivre2000	2.545667	2.085000	0.875147	4	0.430897	3	3	0.787337	0.459729	2.9330	0.508513
Témoïn vs. sal3% Cu2000	2.545667	2.307000	0.515275	4	0.633529	3	3	0.787337	0.154000	26.1385	0.073696
Témoïn vs. sal3% Cu2500	2.545667	2.285000	0.438251	4	0.683833	3	3	0.787337	0.664395	1.4043	0.831833
Témoïn vs. sal3% Cu3000	2.545667	1.948000	1.272375	4	0.272173	3	3	0.787337	0.205000	14.7508	0.126978

Test t pour des Echantillons Indépendants (volume racinaire)

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoïn vs. saa0,5%	35.00000	40.66667	-0.87323	4	0.431826	3	3	5.000000	10.06645	4.05333	0.395778
Témoïn vs. sal3%	35.00000	15.00000	4.89898	4	0.008050	3	3	5.000000	5.00000	1.00000	1.000000
Témoïn vs. cuivre2000	35.00000	70.00000	-2.25144	4	0.087506	3	3	5.000000	26.45751	28.00000	0.068966
Témoïn vs. cuivre2500	35.00000	61.00000	-4.54905	4	0.010425	3	3	5.000000	8.54400	2.92000	0.510204
Témoïn vs. cuivre3000	35.00000	70.00000	-2.25144	4	0.087506	3	3	5.000000	26.45751	28.00000	0.068966
Témoïn vs. sal0,5%+cuivre2000	35.00000	40.66667	-0.87323	4	0.431826	3	3	5.000000	10.06645	4.05333	0.395778
Témoïn vs. sal0,5+cuivre2500	35.00000	26.00000	2.14124	4	0.098950	3	3	5.000000	5.29150	1.12000	0.943396
Témoïn vs. sal0,5%+cuivre2000	35.00000	33.33333	0.37796	4	0.724659	3	3	5.000000	5.77350	1.33333	0.857143
Témoïn vs. sal3% Cu2000	35.00000	25.00000	2.44949	4	0.070484	3	3	5.000000	5.00000	1.00000	1.000000
Témoïn vs. sal3% Cu2500	35.00000	38.33333	-0.37796	4	0.724659	3	3	5.000000	14.43376	8.33333	0.214286
Témoïn vs. sal3% Cu3000	35.00000	48.33333	-2.52982	4	0.064677	3	3	5.000000	7.63763	2.33333	0.600000

Test t pour des Echantillons Indépendants (longueur des tiges)

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoins vs. saa0,5%	69.91333	64.66667	1.11348	4	0.327901	3	3	1.039247	8.094939	60.67223	0.032430
Témoins vs. sal3%	69.91333	79.53333	-2.04011	4	0.110930	3	3	1.039247	8.100977	60.76279	0.032382
Témoins vs. cuivre2000	69.91333	67.45000	3.13169	4	0.035128	3	3	1.039247	0.880965	1.39162	0.836255
Témoins vs. cuivre2500	69.91333	70.85333	-0.47925	4	0.656788	3	3	1.039247	3.234414	9.68621	0.187157
Témoins vs. cuivre3000	69.91333	70.04667	-0.08933	4	0.933115	3	3	1.039247	2.367221	5.18848	0.323181
Témoins vs. sal0,5%+cuivre2000	69.91333	72.54667	-0.80989	4	0.463433	3	3	1.039247	5.535019	28.36619	0.068106
Témoins vs. sal0,5+cuivre2500	69.91333	72.12667	-0.75572	4	0.491880	3	3	1.039247	4.965202	22.82636	0.083941
Témoins vs. sal0,5%+cuivre2000	69.91333	73.98667	-3.08098	4	0.036896	3	3	1.039247	2.040523	3.85519	0.411930
Témoins vs. sal3%Cu2000	69.91333	77.53333	-2.78037	4	0.049800	3	3	1.039247	4.631774	19.86358	0.095861
Témoins vs. sal3%Cu2500	69.91333	79.82000	-5.34113	4	0.005921	3	3	1.039247	3.039852	8.55594	0.209294
Témoins vs. sal3%Cu3000	69.91333	77.28333	-6.78918	4	0.002458	3	3	1.039247	1.566918	2.27329	0.611005

Test t pour des Echantillons Indépendants (RWC)

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoins vs. saa0,5%	97.30333	93.03667	1.888518	4	0.131976	3	3	3.191431	2.264428	1.986342	0.669716
Témoins vs. sal3%	97.30333	91.69667	2.335323	4	0.079786	3	3	3.191431	2.665789	1.433241	0.821949
Témoins vs. cuivre2000	97.30333	94.42000	1.082118	4	0.340076	3	3	3.191431	3.333752	1.091178	0.956399
Témoins vs. cuivre2500	97.30333	93.31667	1.330110	4	0.254254	3	3	3.191431	4.094537	1.646033	0.755848
Témoins vs. cuivre3000	97.30333	92.83667	1.729376	4	0.158798	3	3	3.191431	3.134906	1.036387	0.982132
Témoins vs. sal0,5%+cuivre2000	97.30333	96.92667	0.145267	4	0.891526	3	3	3.191431	3.159815	1.020111	0.990044
Témoins vs. sal0,5+cuivre2500	97.30333	94.92667	1.153927	4	0.312783	3	3	3.191431	1.594062	4.008304	0.399337
Témoins vs. sal0,5%+cuivre2000	97.30333	93.28333	2.019373	4	0.113579	3	3	3.191431	1.305233	5.978536	0.286593

Test t pour des Echantillons Indépendants (RWL 30')

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenn e	Moyenn e	valeur t	d l	p	N Actif s	N Actif s	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoin vs. saa0,5%	0.005267	0.002600	1.75033 3	4	0.15495 6	3	3	0.00253 8	0.00072 1	12.3910 3	0.14935 4
Témoin vs. sal3%	0.005267	0.002600	1.76949 6	4	0.15152 9	3	3	0.00253 8	0.00060 8	17.4144 1	0.10861 1
Témoin vs. cuivre2000	0.005267	0.006800	- 0.72759 7	4	0.50716 3	3	3	0.00253 8	0.00262 3	1.06777	0.96722 5
Témoin vs. cuivre2500	0.005267	0.002967	1.24633 2	4	0.28064 8	3	3	0.00253 8	0.00194 3	1.70760	0.73866 2
Témoin vs. cuivre3000	0.005267	0.004433	0.43427 4	4	0.68648 9	3	3	0.00253 8	0.00214 6	1.39971	0.83343 4
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	0.005267	0.003100	1.19432 0	4	0.29833 2	3	3	0.00253 8	0.00185 2	1.87852	0.69480 1
Témoin vs. sal0,5+cuivre2500	0.005267	0.006000	- 0.46556 3	4	0.66574 7	3	3	0.00253 8	0.00100 0	6.44333	0.26869 7
Témoin vs. sal0.5%+cuivre2000	0.005267	0.005333	- 0.03897 7	4	0.97077 7	3	3	0.00253 8	0.00152 8	2.76143	0.53171 3

Test t pour des Echantillons Indépendants (RWL 60')

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoin vs. saa0,5%	0.003833	0.003367	0.30235	4	0.777452	3	3	0.002201	0.001518	2.102750	0.644590
Témoin vs. sal3%	0.003833	0.004967	- 0.84266	4	0.446857	3	3	0.002201	0.000764	8.302857	0.214988
Témoin vs. cuivre2000	0.003833	0.001800	1.30588	4	0.261631	3	3	0.002201	0.001559	1.993141	0.668194
Témoin vs. cuivre2500	0.003833	0.001933	1.26046	4	0.276021	3	3	0.002201	0.001405	2.454392	0.578973
Témoin vs. cuivre3000	0.003833	0.002667	0.79587	4	0.470670	3	3	0.002201	0.001266	3.020790	0.497415
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	0.003833	0.004700	- 0.39901	4	0.710271	3	3	0.002201	0.003051	1.922230	0.684409
Témoin vs. sal0,5+cuivre2500	0.003833	0.004067	- 0.17099	4	0.872536	3	3	0.002201	0.000862	6.515695	0.266110
Témoin vs. sal0.5%+cuivre2000	0.003833	0.003567	0.19086	4	0.857935	3	3	0.002201	0.001007	4.779605	0.346044
Témoin vs. sal3%Cu2000	0.003833	0.003500	0.20294	4	0.849084	3	3	0.002201	0.001803	1.490256	0.803130
Témoin vs. sal3%Cu2500	0.003833	0.005400	- 1.02906	4	0.361605	3	3	0.002201	0.001453	2.295419	0.606903
Témoin vs. sal3%Cu3000	0.003833	0.003900	- 0.04120	4	0.969108	3	3	0.002201	0.001735	1.609081	0.766553

Test t pour des Echantillons Indépendants (RWL120')

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoin vs. saa0,5%	0.002533	0.001267	2.18665	4	0.094043	3	3	0.000950	0.000321	8.74194	0.205298
Témoin vs. sal3%	0.002533	0.001400	1.86040	4	0.136338	3	3	0.000950	0.000458	4.30159	0.377246
Témoin vs. cuivre2000	0.002533	0.001633	1.53847	4	0.198762	3	3	0.000950	0.000351	7.32432	0.240260
Témoin vs. cuivre2500	0.002533	0.001567	1.33767	4	0.251994	3	3	0.000950	0.000814	1.36181	0.846808
Témoin vs. cuivre3000	0.002533	0.002567	-0.04016	4	0.969889	3	3	0.000950	0.001079	1.28782	0.874194
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	0.002533	0.002733	-0.19225	4	0.856910	3	3	0.000950	0.001531	2.59410	0.556468
Témoin vs. sal0,5+cuivre2500	0.002533	0.002933	-0.58624	4	0.589201	3	3	0.000950	0.000702	1.83108	0.706444
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	0.002533	0.002733	-0.27161	4	0.799366	3	3	0.000950	0.000850	1.24885	0.889344
Témoin vs. sal3%Cu2000	0.002533	0.006800	-0.93950	4	0.400666	3	3	0.000950	0.007808	67.49446	0.029199
Témoin vs. sal3%Cu2500	0.002533	0.003500	-1.14365	4	0.316562	3	3	0.000950	0.001114	1.37269	0.842924
Témoin vs. sal3%Cu3000	0.002533	0.001433	1.81111	4	0.144361	3	3	0.000950	0.000451	4.44262	0.367470

Test t pour des Echantillons Indépendants (Na dans les Feuille)

Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	p
Témoin vs. saa0,5%	1495.000	1955.000	-5.6338	4	0.004884	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%	1495.000	2277.000	-9.5775	4	0.000664	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2000	1495.000	2461.000	-11.8310	4	0.000292	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2500	1495.000	1449.000	0.5634	4	0.603258	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre3000	1495.000	1058.000	5.3521	4	0.005877	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	1495.000	1518.000	-0.2817	4	0.792153	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5+cuivre2500	1495.000	1564.000	-0.8451	4	0.445654	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	1495.000	2277.000	-9.5775	4	0.000664	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2000	1495.000	3174.000	-20.5635	4	0.000033	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2500	1495.000	3289.000	-21.9719	4	0.000025	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu3000	1495.000	1403.000	1.1268	4	0.322862	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000

Test t pour des Echantillons Indépendants (Na dans les racines) Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	P
Témoin vs. saa0,5%	1219.000	943.000	3.3803	4	0.027778	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%	1219.000	2277.000	-12.9578	4	0.000205	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2000	1219.000	2461.000	-15.2113	4	0.000109	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2500	1219.000	1449.000	-2.8169	4	0.047978	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre3000	1219.000	1058.000	1.9718	4	0.119917	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	1219.000	1518.000	-3.6620	4	0.021543	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5+cuivre2500	1219.000	1564.000	-4.2254	4	0.013420	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	1219.000	2277.000	-12.9578	4	0.000205	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2000	1219.000	3174.000	-23.9438	4	0.000018	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2500	1219.000	3289.000	-25.3522	4	0.000014	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu3000	1219.000	1403.000	-2.2535	4	0.087303	3	3	100.0000	100.0000	1.000000	1.000000

Test t pour des Echantillons Indépendants (k dans les Feuille) Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	P
Témoin vs. saa0,5%	441.8700	416.0000	3.16841	4	0.033909	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%	441.8700	494.0000	-6.38460	4	0.003088	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2000	441.8700	442.0000	-0.01592	4	0.988059	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2500	441.8700	416.0000	3.16841	4	0.033909	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre3000	441.8700	416.0000	3.16841	4	0.033909	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	441.8700	468.0000	-3.20026	4	0.032893	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5+cuivre2500	441.8700	386.6667	5.23705	4	0.006353	3	3	10.00000	15.27525	2.333333	0.600000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	441.8700	494.0000	-6.38460	4	0.003088	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2000	441.8700	494.0000	-6.38460	4	0.003088	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2500	441.8700	442.0000	-0.01592	4	0.988059	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu3000	441.8700	390.0000	6.35275	4	0.003146	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000

Test t pour des Echantillons Indépendants (k dans les racines) Note : Variables traitées comme des échantillons indépendants

	Moyenne	Moyenne	valeur t	dl	p	N Actifs	N Actifs	Ec-Type	Ec-Type	Ratio F	P
Témoin vs. saa0,5%	214.5000	360.0000	-17.8200	4	0.000058	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%	214.5000	336.0000	-14.8807	4	0.000119	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2000	214.5000	264.0000	-6.0625	4	0.003738	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre2500	214.5000	312.0000	-11.9413	4	0.000282	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. cuivre3000	214.5000	216.0000	-0.1837	4	0.863176	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	214.5000	312.0000	-11.9413	4	0.000282	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5+cuivre2500	214.5000	288.0000	-9.0019	4	0.000843	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal0,5%+cuivre2000	214.5000	216.0000	-0.1837	4	0.863176	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2000	214.5000	240.0000	-3.1231	4	0.035420	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu2500	214.5000	168.0000	5.6951	4	0.004696	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000
Témoin vs. sal3%Cu3000	214.5000	168.0000	5.6951	4	0.004696	3	3	10.00000	10.00000	1.000000	1.000000

RESUME

L'objectif de notre présent travail est d'étudier l'effet du stress salin induit par l'application de deux doses de NaCl (0,5% et 3%) d'une part, et du stress métallique à des doses croissantes ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ à : 2000 - 2500 et 3000 ppm), et aussi l'effet combiné ($\text{NaCl} + \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sur *Atriplex canescens* (Pursh). Nutt, en conditions semi-contrôlées, au niveau des paramètres biométriques, hydriques et minéraux. La tolérance de cette halophyte a été étudiée par la capacité de croissance et de rendement.

En effet, les paramètres mesurés : la surface foliaire, le volume racinaire, la hauteur des tiges, la teneur en eau, la teneur relative en eau (RWC), la perte d'eau par transpiration (RWL) et les teneurs en sels minéraux (teneurs en Sodium et en Potassium) et leurs rapports respectifs à la fin de l'expérience varient en fonction du niveau du stress salin et métallique.

Les résultats obtenus ont montré que l'addition du sel et des sulfates de cuivre en l'occurrence, varie d'un paramètre à un autre. *Atriplex canescens* (Pursh). Nutt étudiée est résistante aux sulfates de cuivre, et ce, à des concentrations élevées qui peuvent aller jusqu'à 3000 ppm. Il a été enregistré également que le stress salin et métallique ont entraîné des perturbations morphologiques affectant les racines, les tiges et les feuilles.

Enfin, *Atriplex canescens* (Pursh). Nutt possède un important pouvoir d'accumulation dans les racines (partie souterraine) et les feuilles (partie aérienne). Elle a montré une grande résistance à la salinité manifestée par le développement d'un appareil aérien et racinaire important et elle accumule significativement les sels minéraux (Na^+ et K^+) dans les feuilles et les racines.

Mots clés: *Atriplex canescens* (Pursh). Nutt, sulfate de cuivre, phytoremédiation, salinité, stress, bilan hydrique, bilan minéral.

