

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques

Filière : Sciences Agronomiques

Option : Biotechnologie Végétale

THESE

PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée par:

M^{me} BELARBI Amaria

Thème

**Etude physiologique et phytochimique de
la tolérance aux métaux lourds "Pb, Cr(III)
et Cr(VI)" par l'*Atriplex halimus* L.**

Soutenue publiquement le 11 Janvier 2018 devant les membres de jury :

M. REGUIEG YSSAAD Houcine Abdelhakim	Professeur Président	Université de Mostaganem
M. LOTMANI Brahim	Professeur Directeur de Thèse	Université de Mostaganem
M. BEKADA Ahmed Mohamed Ali	Professeur Examineur	Centre Universitaire de Tissemsilt
M. BELHADI Abdelkader	Professeur Examineur	Université de Saida
M. DJEBLI Noureddine	Professeur Examineur	Université de Mostaganem
M. ELOUISSI Mouffok	MCA Examineur	Université de Mascara

Année Universitaire : 2017-2018

Dédicaces

A vant tout c'est grâce à *Allah* je suis arrivé à ce stade
Je Dédicasse ce modeste travail avec toute l'ardeur de mes sentiments :

A Mon très cher Papa
qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde
qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de
reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son
âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

A ma très chère Maman
Aucune dédicace ne saurait exprimer mon grand respect, et ma
reconnaissance pour les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation.
J'implore dieu le tout puissant de vous accorder bonne santé et longue vie.

A mon très cher mari *BAROUDA Khaled*
Tes prières m'ont toujours accompagné, je t'offre en guise de reconnaissance,
ce travail qui, sans ton aide, ta générosité infinie, tes encouragements
n'aurait vu le jour.

Nulla dédicace ne pourrait exprimer mes sentiments et mon profond
attachement.

A mes très chères sœur *Amel* et *Nadia* et mes frères *Mejdoub* et *Djamel*
Votre soutien m'a donné force et encouragement et votre amour
fraternel.

A tous mes amis.

Remerciment

Je remercie tout d'abord le tout puissant qui nous a donné le courage de présenter devant vous aujourd'hui ce travail.

Nous tenant à exprimé une profonde reconnaissance et témoigner notre gratitude pour nos supérieurs et cadres de l'Université ainsi que ceux des établissements qui ont élaboré.

Ce travail doit beaucoup à Monsieur **LOTMANI Brahim**. Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem et Doyen de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Mon travail n'aurait pas vu le jour sans son aide et ses conseils judicieux qui m'ont été très précieux, je le remercie pour la grande gentillesse dont il a su faire preuve à mon égard, la qualité de sa formation et les remarques objectives qu'il m'a apportées depuis plusieurs années, sa disponibilité à tout moment et sa compréhension. Il m'a fait honneur de corriger mon travail et je lui exprime ma vive reconnaissance.

Je tient aussi à remercier vivement Monsieur **REGUIEG YSSAAD Houcine Abdelhakim**. Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury d'évaluation de cette thèse, Hommage respectueux.

Mes vifs et sincères remerciements vont aussi au membre du jury Monsieur **BEKADA Ahmed Mohamed Ali**. Professeur au Centre Universitaire de Tissemsilt pour sa disponibilité, ses orientations, d'avoir eu l'amabilité d'accepter d'être membre jury de ce travail. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude.

Et Monsieur **BELHADI Abdelkader** Maître de conférences à l'Université de Saida, pour avoir accepté de prendre part du jury d'examen de ma thèse.

Je remercie énormément Monsieur **DJEBLI Noureddine**, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem, qui a bien voulu accepter d'examiner cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur **ELOUISSI Mouffok**, Maître de Conférences classe A à l'Université de Mascara d'avoir accepté d'être parmi les examinateurs de ce manuscrit.

J'exprime mes plus vifs remerciements, et ma connaissance toute particulière et gratitude, qui ne seront jamais concrètement exprimées à l'égard de :

Monsieur le Professeur **BELKHODJA Moulay** pour l'aide précieuse et chaleureuse, qu'il ma apportée au sein du laboratoire d'Écophysiologie végétale, Université de Es-Seina -Oran- Algérie, dont il est responsable..

Je ne remercie jamais assez **Dr CHOUIEB Mohamed, Dr BENADJEMIA Mohamed** et le **Pr BENDERDOUCHE Nourredine** pour leurs nombreux services qu'ils m'ont rendus durant la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de mes remerciements les plus chaleureux.

En fin, je ne serais achevée sans remercier tous les amis et collègues de travail au Centre Universitaire Ahmed ZABANA de Relizane et de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

RÉSUMÉ

Ce travail met en évidence, les incidences des facteurs: métaux (Pb et Cr) et leurs concentrations dans le milieu ainsi que la provenance des plantes d'*Atriplex halimus* L., sur l'expression des potentialités de croissance et les capacités de tolérance et d'accumulation de cette espèce. L'étude a été réalisée selon un dispositif expérimental en blocs randomisés. Nous avons étudié l'effet de trois concentrations pour chaque métal : le Pb à 1000, 4000 et 8000 ppm, Cr(III) à 250, 500 et 750 ppm et le Cr(VI) à 50, 100 et 150 ppm, chez quatre provenances (Kharouba, Béni Saf, Sig et Oued'Rhiou), sur quelques paramètres biométriques, physiologiques et biochimiques de cette espèce.

Nous avons étudié les conséquences du stress métallique sur l'activité de la chlorophylle, des sucres solubles, de la proline et des polyphénols (phénols totaux, flavonoïdes et tanins). Les résultats obtenus montrent une accumulation importante des sucres solubles, de la proline et des polyphénols dans les différents organes d'*Atriplex halimus*. Cependant, le RWC des tissus foliaires a subi une diminution remarquable en présence des métaux. En ce qui concerne les chlorophylles (a), (b) et (a+b), leurs teneurs diminuent sous l'influence de toutes les concentrations du Pb, Cr(III) et du Cr(VI) appliquées.

Il a été enregistré également que le stress métallique a entraîné des réductions significatives sur le rendement de la matière organique et sur la croissance (évaluée par l'élongation des tiges). Cependant, aucun effet n'est enregistré sur la survie de la plante d'*Atriplex halimus*, la longueur des racines et sur le nombre des feuilles, ainsi que sur le rendement en matière sèche et minérale.

La dernière partie de notre travail est consacrée à l'étude de la dispersion des métaux au niveau des tissus d'*Atriplex halimus* par Microscopie Electronique à balayage. Nous avons ainsi localisé un ensemble de métaux principalement le plomb et le chrome, dont la concentration semble moins importante au niveau des tiges.

Nous avons observé que cette espèce présente un important pouvoir d'absorption au niveau racinaire et une faible translocation vers les parties aériennes, ce qui confirme l'existence et l'évolution de mécanismes d'absorption, de transport, et de détoxification par stockage ou réactions biochimiques chez l'*Atriplex halimus* et que cette espèce est plus tolérante au Cr(III) et Cr(VI) que pour le Pb, l'effet provenance sur la tolérance à ces métaux est présent.

En comparant les résultats obtenus, il apparaît que les paramètres mesurés peuvent être sujets à des rapports entre eux et de ce fait constituer des outils de compréhension globale sur la manière dont *Atriplex halimus* réagit à différentes conditions grâce à différents mécanismes.

Mots clés : *Atriplex halimus* L.; Métaux lourds; Phytoremédiation; Plomb; Chrome "Cr(III) et Cr(VI)"; Accumulation; Translocation; Tolérance.

ABSTRACT

This work highlighted, the incidences of the factors: metals (Pb and Cr) and their concentrations in the medium as well as the provenance of *Atriplex halimus* L. plants, on the expression of the growth potentialities and the tolerance and accumulation capacities of this specie. The study has been achieved according to an experimental disposition in random blocks. We studied the effect of three doses for each metal : Pb at 1000, 4000 and 8000 ppm, Cr(III) at 250, 500 and 750 ppm and Cr(VI) at 50, 100, 150 ppm in four provenances (Kharouba, Beni Saf, Sig and Oued'Rhiou), on some biometric, physiological and biochemical parameters of this specie.

We studied the effects of metallic stress on the activity of chlorophyll, soluble sugars, proline and polyphenols (total phenols, flavonoids and tannins). The results obtained show an important accumulation of soluble sugars, proline and polyphenols in the different organs of *Atriplex halimus*. However, the RWC of foliar tissues has undergone a remarkable decrease in the presence of metals. For chlorophylls (a), (b) and (a+b), their contents decrease under the influence of all the concentrations of Pb, Cr(III) and Cr(VI) applied.

It was also recorded that metallic stress entailed meaningful decreases on the yield of organic matter and growth (evaluated by the elongation of the stems), However, no effects are recorded on survival of *Atriplex halimus* plants, root length, the number of leaves and yield of the dry and mineral matter.

The last part of our work is devoted to the study of the dispersion of metals at the tissues of *Atriplex halimus* by Scanning Electron Microscopy. We have located a set of metal mainly lead and chromium, which the concentration seems less important in the stems.

We observed that this specie has an important absorption capacity at the root level, and a weak translocation towards the aerial parts, which confirms the existence and the evolution of mechanisms of absorption, transport, and detoxification by stocking or biochemical reactions at the *Atriplex halimus* and this specie is more tolerant to Cr(III) and Cr(VI) than for the lead, the effect provenance on the tolerance to these metals is present.

While comparing the gotten results, it appears that the measured parameters can be subjects to reports between them, and of that made constitute tools of global understanding on the manner of which *Atriplex halimus* reacts to different conditions through to different mechanisms.

Key words: *Atriplex halimus* L.; Heavy metals; Phytoremediation; Lead; Chromium "Cr(III) and Cr(VI)"; Accumulation; Translocation; Tolerance.

المخلص

يوضح هذا العمل مدى تأثير المعدين الثقيلين (الرصاص والكروم) وتراكيزهما في الوسط وعلى إمكانية نمو النبات *Atriplex halimus* L. ومدى قدرتها على الاحتمال و التجميع لهذين المعدين.

لقد أنجزت هذه الدراسة وفقاً لجهاز تجريبي لفئة عشوائية، سار بظروف مثلى، بحيث درسنا أثر ثلاثة تراكيز (١٠٠٠ و ٤٠٠٠ و ٨٠٠٠ ج م م) لمعدن الرصاص و (٢٥٠ و ٥٠٠ و ٧٥٠ ج م م) لمعدن الكروم (III) و (٥٠ و ١٠٠ و ١٥٠ ج م م) لمعدن الكروم (VI) ، في أربعة مناشئ (خروبة و بني صاف و سيق و وادي رهيو) على بعض المعايير البيولوجية والفسولوجية والبيوكيميائية لهذا النوع النباتي.

درسنا آثار إجهاد المعادن الثقيلة على نشاط كل من اليخضور، السكريات القابلة للذوبان، البرولين والبوليفينول (مجموع الفينول، مركبات الفلافونويد والعفص). أظهرت النتائج وجود تراكم كبير من السكريات القابلة للذوبان و البرولين و البوليفينول في مختلف أعضاء نبات *Atriplex halimus*. غير أن المحتوى النسبي للماء في الأنسجة الورقية للنباتات شهدت انخفاضاً ملحوظاً في وجود المعادن الثقيلة. وفيما يتعلق باليخضور (أ) و (ب) و (أ+ب)، سجلنا انخفاض كمياته تحت تأثير تراكيز كل من الرصاص و الكروم (III) و الكروم (VI).

كما تم تسجيل أن الاضطرابات المعدنية تتسبب في نقص معتبر في كل من مردود المادة العضوية وفي النمو (المقدر بإستطالة السيقان). في حين أنه لم يتم تسجيل أي تأثير على بقاء النبات *Atriplex halimus* على قيد الحياة وعلى طول الجذور وعدد الأوراق وكذلك على مردود المادة الجافة و المعدنية.

الجزء الأخير من عملنا خُصص لدراسة تموضع المعادن في أنسجة *Atriplex halimus* عن طريق المجهر الإلكتروني الماسح . ولقد قمنا بتحديد مجموعة من المعادن أهمها الرصاص و الكروم، أين سجلنا أقل تركيز على مستوى السيقان.

لاحظنا أيضاً أن هذا النوع له قدرة الامتصاص على مستوى الجذور، وانتقال ضعيف نحو الجزء الهوائي، حيث يفترض نشوء آلية للامتصاص ولانتقال و لإزالة السموم، بالتخزين أو بتفاعلات بيوكيميائية خاصة بنبات *Atriplex halimus*، كما أظهرت النتائج أن هذا النوع من النبات هو أشد تحمل للكروم (III) و للكروم (VI) منه إلى للرصاص. وقد تبين أن المنشأ له تأثير على تحمل هذه المعادن.

فبمقارنة النتائج المتحصل عليها يظهر أن المعالم المقاسة متأثرة ببعضها البعض، ومن جراء هذا تنشأ مفاهيم عامة حول كيفية استجابة *Atriplex halimus* بطرق متعددة عند ظروف مختلفة.

الكلمات المفتاحية : *Atriplex halimus* L. (القطف) ; المعادن الثقيلة ; النباتات المعالجة للأراضي الملوثة ;

الرصاص ; الكروم "الكروم (III) و الكروم (VI)" ; تجميع ; إنتقال ; التحمل.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Classification botanique d'espèce <i>Atriplex halimus</i> L.....	08
Tableau 2. Composition chimique moyenne d' <i>Atriplex halimus</i> , en % de la MS.....	19
Tableau 3. Contenu des roches en éléments traces (ppm).....	29
Tableau 4. Etude de transfert des ETM vers le sol et les plantes.....	37
Tableau 5. Influence des propriétés du sol sur la mobilité des métaux.....	41
Tableau 6. Exemples de plantes accumulatrices de métaux lourds.....	58
Tableau 7. Quelques caractéristiques physico-chimiques des substrats (Sol) avant la mise en culture d' <i>Atriplex halimus</i>	73
Tableau 8. Coordonnées géographiques des sites de récolte.....	75
Tableau 9. Concentrations des solutions mères constitutives du milieu de culture.....	76
Tableau 10. Composition des solutions métalliques.....	82
Tableau 11. Taux de germination des graines d' <i>Atriplex halimus</i> , des quatre provenances ± Ecart-Type.....	96
Tableau 12. Taux de levée des graines d' <i>Atriplex halimus</i> , des quatre provenances ± Ecart-Type.....	97
Tableau 13. Taux moyen de survie des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> . Les résultats sont présentés sous forme de moyenne.....	97
Tableau 14. Taux moyen de survie des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> (en %), traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	101
Tableau 15. Longueurs moyennes (en cm) des racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	103
Tableau 16. Longueurs moyennes (en cm) des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	106
Tableau 17. Nombre moyen des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	110
Tableau 18. Teneur moyenne en matière sèche (MS en % de MF) dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..	113

- Tableau 19.** Teneur moyenne en matière sèche (MS en % de MF) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.. **114**
- Tableau 20.** Teneur moyenne en matière sèche (MS en % de MF) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.. **116**
- Tableau 21.** Teneur moyenne en matière minérale (MM en % de MS) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..... **119**
- Tableau 22.** Teneur moyenne en matière minérale (MM en % de MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.. **120**
- Tableau 23.** Teneur moyenne en matière minérale (MM en % de MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..... **122**
- Tableau 24.** Teneur moyenne en matière organique (MO en % de MS) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..... **125**
- Tableau 25.** Teneur moyenne en matière organique (MO en % de MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..... **126**
- Tableau 26.** Teneur moyenne en matière organique (MO en % MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..... **128**
- Tableau 27.** Quantités moyennes de plomb et de chrome (en mg/kg MS) dans les substrats (sol) de la culture des plantes d'*Atriplex halimus* soumises au plomb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..... **137**

Tableau 28. Valeurs moyennes des teneurs en plomb (en mg/kg MS) dans les feuilles (F), tiges (T) et racines (R) d' <i>Atriplex halimus</i> L. traitées au plomb \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..	144
Tableau 29. Valeurs moyennes des teneurs en chrome (en mg/kg MS) dans les feuilles (F), tiges (T) et racines (R) d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(III) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	149
Tableau 30. Valeurs moyennes des teneurs en chrome (en mg/kg MS) dans les feuilles (F), tiges (T) et racines (R) d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	153
Tableau 31. Facteur de translocation (FT) d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par différentes concentrations de Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type.....	156
Tableau 32. Teneurs moyennes en chlorophylle a et chlorophylle b (en mg/g MS) chez l' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type.....	162
Tableau 33. Teneurs moyennes en phénols totaux (en mg EAG/g MS) dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	180
Tableau 34. Teneurs moyennes en phénols totaux (en mg EAG/g MS) dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	182
Tableau 35. Teneurs moyennes en flavonoïdes (en mg EC/g MS) dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	185
Tableau 36. Teneurs moyennes en flavonoïdes (en mg EC/g MS) dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.....	187

- Tableau 37.** Teneurs moyennes en tanins (en mg EC/g MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA..... **190**
- Tableau 38.** Teneurs moyennes en tanins (en mg EC/g MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.. **192**
- Tableau 39.** Récapitulatif des données les plus marquantes obtenues au cours de cette thèse, concernant les mécanismes d'absorption, de transport, et de détoxification par stockage ou réactions biochimiques chez l'*Atriplex halimus* L. vis-à-vis les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI)..... **215**

LISTE DES FIGURES

Figure 1. A) Touffes d' <i>Atriplex halimus</i> sur le littoral de Mostaganem (en Septembre) ; B) Panicule terminale portant les épis de graines ; C) Epi des graines de <i>Atriplex halimus</i>	11
Figure 2. Différentes formes des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> de provenance « Kharouba ».....	13
Figure 3. Diagramme florale de l' <i>Atriplex halimus</i>	15
Figure 4. Origine des éléments traces dans le sol.....	31
Figure 5. Contamination diffuse et locale.....	33
Figure 6. Principaux mécanismes de phyto-dépollution : phyto-extraction, phyto-dégradation, phyto-stabilisation et rhizo-dégradation.....	51
Figure 7. Métabolisme des xénobiotiques chez la plante.....	53
Figure 8. Schéma d'une coupe transversale de racine de blé montrant les voies possibles de mouvement des composés solubles.....	60
Figure 9. Structure de la phytochélatine.....	63
Figure 10. Organigramme montrant le protocole expérimental adopté de la culture d' <i>Atriplex halimus</i>	72
Figure 11. Carte de situation des sites de récolte des graines d' <i>Atriplex halimus</i> (Ouest d'Algérie).....	74
Figure 12. Dispositif expérimental des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L. de 60 jours.....	77
Figure 13. Protection de semis (Installation d'une sous serre).....	78
Figure 14. Dispositif expérimental de l'essai conduit sous serre.....	81
Figure 15. Organigramme montrant le protocole expérimental adopté pour l'impact des métaux lourds sur d' <i>Atriplex halimus</i>	83
Figure 16. Organigramme montrant les différentes méthodes expérimentales de traitements de plantes d' <i>Atriplex halimus</i> utilisées.....	85
Figure 17. Microscope électronique à balayage.....	94
Figure 18. Dispositif métallique de fixation des échantillons examinés par microscopie électronique à balayage.....	95
Figure 19. Croissance des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , exprimée en longueur moyenne des tiges (en cm). Les barres représentent les écarts types.....	99
Figure 20. Taux moyen de croissance des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , en fonction des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) et leurs concentrations.....	108

Figure 21. Effet des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en eau relative (en %) chez l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	131
Figure 22. Valeurs moyennes du pH dans le substrat après 30 jours de traitement par différentes concentrations des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	133
Figure 23. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en chlorophylle totale (en mg/g MS) chez l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	160
Figure 24. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en sucres solubles (en μ moles/100 mg MS) dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	165
Figure 25. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en sucres solubles (en μ moles/100 mg MS) dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	167
Figure 26. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en proline (en μ moles/100 mg MS) dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	171
Figure 27. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en proline (en μ moles/100 mg MS) dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	173
Figure 28. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en proline (en μ moles/100 mg MS) dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	175
Figure 29. Observation microscopique de la surface d'une feuille d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Pb par le MEB.....	195
Figure 30. Spectres par EDX des métaux lourds dans une feuille d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Pb.....	195
Figure 31. Observation microscopique de la surface d'une feuille d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(III) par le MEB.....	197
Figure 32. Spectres par EDX des métaux lourds dans une feuille d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(III).....	197
Figure 33. Observation microscopique de la surface d'une feuille d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(VI) par le MEB.....	199
Figure 34. Spectres par EDX des métaux lourds dans une feuille d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(VI).....	199
Figure 35. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une tige d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Pb par le MEB.....	201
Figure 36. Spectres par EDX des métaux lourds dans une tige d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Pb..	201
Figure 37. Observation microscopique d'une coupe longitudinale d'une tige d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(III) par le MEB.....	203

Figure 38. Spectres par EDX des métaux lourds dans une tige d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(III).....	203
Figure 39. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une tige d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(VI) par le MEB.....	205
Figure 40. Spectres par EDX des métaux lourds dans une tige d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(VI).....	205
Figure 41. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une racine d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Pb par le MEB.....	207
Figure 42. Spectres par EDX des métaux lourds dans une racine d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Pb.....	207
Figure 43. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une racine d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(III) par le MEB.....	209
Figure 44. Spectres par EDX des métaux lourds dans une racine d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(III).....	209
Figure 45. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une racine d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(VI) par le MEB.....	211
Figure 46. Spectres par EDX des métaux lourds dans une racine d' <i>Atriplex halimus</i> traitée au Cr(VI).....	211

LISTE DES ANNEXES

Annexe 01. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de germination des graines d' <i>Atriplex halimus</i> , mises en culture».....	281
Annexe 02. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de levée des graines d' <i>Atriplex halimus</i> , mises en culture».....	281
Annexe 03. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de survie des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , mises en culture».....	281
Annexe 04. Traitement statistique des résultats du paramètre « Croissance des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , mises en culture».....	281
Annexe 05. Croissance des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , après sept mois, exprimée en longueur moyenne des tiges (en cm).....	283
Annexe 06. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de survie des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	283
Annexe 07. Traitement statistique des résultats du paramètre «Longueur des racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	284
Annexe 08. Traitement statistique des résultats du paramètre «Longueur des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	285
Annexe 09. Traitement statistique des résultats du paramètre «Croissance des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	286
Annexe 10. Influence des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur l'élongation des tiges chez l' <i>Atriplex halimus</i> , en fonction du temps.....	287
Annexe 11. Traitement statistique des résultats du paramètre Nombre des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	287
Annexe 12. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en matière sèche (MS) dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	288
Annexe 13. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière sèche (MS) dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	289
Annexe 14. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière sèche (MS) dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	290
Annexe 15. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	290
Annexe 16. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	291
Annexe 17. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	292

Annexe 18. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière organique dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	294
Annexe 19. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière organique dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	296
Annexe 20. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière organique dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	296
Annexe 21. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en eau relative d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	297
Annexe 22. Teneurs moyennes en eau relative chez l' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressés au Plomb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart Type.....	298
Annexe 23. Quelques caractéristiques physico-chimiques des substrats (Sol) étudiés.....	298
Annexe 24. Traitement statistique des résultats du paramètre « pH des substrats (Sol) des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	299
Annexe 25. Mesures de pH dans le substrat après application des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les plantes d' <i>Atriplex halimus</i>	300
Annexe 26. Traitement statistique des résultats du paramètre « Quantités de Pb dans les substrats (Sol) des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Plomb».....	300
Annexe 27. Traitement statistique des résultats du paramètre « Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(III))».....	301
Annexe 28. Traitement statistique des résultats du paramètre « Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(VI))».....	301
Annexe 29. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Pb dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Plomb».....	302
Annexe 30. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Pb dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Plomb».....	303
Annexe 31. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Pb dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Plomb».....	304
Annexe 32. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(III))».....	304
Annexe 33. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(III))».....	305
Annexe 34. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(III))».....	306
Annexe 35. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(VI))».....	306
Annexe 36. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(VI))».....	307
Annexe 37. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées au Cr(VI))».....	308
Annexe 38. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en chlorophylle totale d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	308

Annexe 39. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en sucres solubles dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	309
Annexe 40. Teneurs moyennes en sucres solubles chez les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI).....	310
Annexe 41. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en sucres solubles dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	310
Annexe 42. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en proline dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	311
Annexe 43. Teneurs moyennes en proline chez les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI).....	312
Annexe 44. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en proline dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	313
Annexe 45. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en proline dans les racines d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	314
Annexe 46. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en phénols totaux dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	315
Annexe 47. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en phénols totaux dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	316
Annexe 48. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	317
Annexe 49. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	318
Annexe 50. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en tanins dans les feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	319
Annexe 51. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en tanins dans les tiges d' <i>Atriplex halimus</i> , traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».....	320
Annexe 52. Effet du Pb sur la croissance des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	321
Annexe 53. Effet du Cr(III) sur la croissance des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	325
Annexe 54. Effet du Cr(VI) sur la croissance des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	329

LISTE DES ABREVIATIONS

- ⊕ **A.** : *Atriplex*.
- ⊕ **aa** : Acide Aminé.
- ⊕ **ADL** : Acid Detergent Lignine.
- ⊕ **ADN** : Acide désoxyribonucléique.
- ⊕ **AFD** : Acid Detergent Fiber.
- ⊕ **Ag** : Argent.
- ⊕ **Al** : Aluminium.
- ⊕ **ALAD** : Acide aminolévulinique déshydratase.
- ⊕ **As** : Arsenic.
- ⊕ **ATP** : Adénosine Tri Phosphate.
- ⊕ **B** : Bore.
- ⊕ **Ba** : Baryum.
- ⊕ **BCR** : Boulonnerie Coutellerie & Robinetterie.
- ⊕ **Bo** : Bore.
- ⊕ °C : Degré Celsius.
- ⊕ **Ca** : Calcium.
- ⊕ **CaCl₂, 2H₂O** : Chlorure monopotassique.
- ⊕ **CB** : Cellulose brute.
- ⊕ **Cd** : Cadmium.
- ⊕ **CDTA** : Cyclohexane-Diamine-Tetraacétique Acide.
- ⊕ **CEC** : Capacité d'Echange Cationique.
- ⊕ **Chl** : Chlorophylle.
- ⊕ **cm** : Centimètre.
- ⊕ **C.M** : Carré Moyen.
- ⊕ **Co** : Cobalt.
- ⊕ **CoCl₂, 5H₂O** : Chlorure de Cobalt.
- ⊕ **Cr** : Chrome.
- ⊕ **Cr(III)** : Chrome trivalent.
- ⊕ **Cr(VI)** : Chrome hexavalent.
- ⊕ **Cr Cl₃ 6H₂O** : Chlorure de Chrome.
- ⊕ **Cs** : Césium.
- ⊕ **Cu** : Cuivre.
- ⊕ **Cys** : Cystéine.

- ⊕ **D** : Distance.
- ⊕ **d0** : Dose 0 (Témoin).
- ⊕ **d1** : Dose 1.
- ⊕ **d2** : Dose 2.
- ⊕ **d3** : Dose 3.
- ⊕ **Da** : Dalton.
- ⊕ **DDL** : Degré de liberté.
- ⊕ **DO** : Densité Optique.
- ⊕ **DTPA** : Diéthylène Triamine Penta Acide.
- ⊕ **E** : Est.
- ⊕ **EAG** : Equivalent d'Acide Gallique.
- ⊕ **EC** : Equivalent de Catéchine.
- ⊕ **EDDHA** : Ethylène -Diamine-Dihydroxyphenyl Acétique Acide.
- ⊕ **EDTA** : Ethylène Diamine Tetraacétique Acide.
- ⊕ **EDX** : Spectrométrie de Dispersion en Energie des rayons X.
- ⊕ **EGTA** : Ethylène Glycole Tétra Acétique Acide.
- ⊕ **Eh** : Potentiel d'oxydoréduction.
- ⊕ **ETM** : Elément Trace Métallique.
- ⊕ **F** : Test de Fisher.
- ⊕ **Fe** : Fer.
- ⊕ **FT** : Facteur de Translocation.
- ⊕ **g** : Gramme.
- ⊕ **Glu** : Glutamine.
- ⊕ **Gly** : Glycerine.
- ⊕ **GTP** : Guanine Tri Phosphate.
- ⊕ **h** : Heure.
- ⊕ **ha** : Hectare.
- ⊕ **HAP** : Hydrocarbure Aromatiques Polycyclique.
- ⊕ **Hg** : Mercure.
- ⊕ **HMW** : High Molecular Weight.
- ⊕ **HSP** : Heat Shock Proteins (protéines de choc thermique).
- ⊕ **I** : Iode.
- ⊕ **K** : Potassium.
- ⊕ **K₂CrO₄** : Chromate de Potassium.

- ⊕ **Kd** : Coefficient de distribution.
- ⊕ **kDa** : Kilodalton.
- ⊕ **Kg** : Kilogramme.
- ⊕ **kV** : kilo Volt.
- ⊕ **l** : Litre.
- ⊕ **LMW** : Low Molecular Weight.
- ⊕ **m** : Mètre.
- ⊕ **M** : Mole.
- ⊕ **MAD** : Matière Azoté Digestible.
- ⊕ **MAT** : Matière Azoté Totale.
- ⊕ **MEB** : Microscope Electronique à Balayage.
- ⊕ **MF** : Matière Fraiche.
- ⊕ **mg** : Milligramme.
- ⊕ **ml** : Millilitre.
- ⊕ **mm** : Millimètre.
- ⊕ **MM** : Matière Minérale.
- ⊕ **Mn** : Manganèse.
- ⊕ **Mo** : Molybdène.
- ⊕ **MO** : Matière Organique.
- ⊕ **MOS** : Matière Organique du Sol.
- ⊕ **MS** : Matière Sèche.
- ⊕ **MT** : Métallothionéines.
- ⊕ **N** : Nord.
- ⊕ **Na** : Sodium.
- ⊕ **Na Cl** : Chlorure de Sodium.
- ⊕ **NADPH** : Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate.
- ⊕ **Ni** : Nickel.
- ⊕ **nm** : Nanomètre.
- ⊕ **NTA** : Nitrilo Triacétique Acide.
- ⊕ **O** : Ouest.
- ⊕ **OGM**: Organismes Génétiquement Modifiés.
- ⊕ **P** : Probabilité.
- ⊕ **Pb** : Plomb.
- ⊕ **Pb (NO₃)₂**: Nitrate de plomb.

- ⊕ **PC** : Phytochélatine.
- ⊕ **pH** : Potentiel hydrogène.
- ⊕ **ppm** : Partie Par Million.
- ⊕ **R²** : Coefficient de corrélation.
- ⊕ **Rf** : Facteur de rétention.
- ⊕ **ROS** : Reactive Oxygen Species.
- ⊕ **RWC** : Relative Water Content.
- ⊕ **S** : Soufre.
- ⊕ **SCE** : Somme des Carrés des Ecart.
- ⊕ **Se** : Sélénium.
- ⊕ **Si** : Silicium.
- ⊕ **Sn** : Etain.
- ⊕ **SO₄²⁻** : Ion sulfate.
- ⊕ **t** : Tonne.
- ⊕ **T** : Témoin.
- ⊕ **TRE** : Teneur Relative en Eau.
- ⊕ **U** : Uranium.
- ⊕ **UF** : Unité Fourragère.
- ⊕ **UFL** : Unité Fourragère Lait.
- ⊕ **µg** : Microgramme.
- ⊕ **µl** : Microlitre.
- ⊕ **µM** : micromoles.
- ⊕ **UV** : Ultra Violet.
- ⊕ **V** : Volume.
- ⊕ **WANA** : West Asiatic and North Africa (Ouest Asiatique et Afrique du Nord).
- ⊕ **Zn** : Zinc.
- ⊕ **%** : pourcentage.
- ⊕ **[]** : Concentration.

TABLE DES MATIERES

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
المخلص.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des Annexes.....	XIII
Liste des abréviations.....	XVI

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I: GENERALITES SUR L'*Atriplex halimus*.

I- Généralité.....	05
II- Présentation de l'espèce	06
II-1- Systématique	07
II-2- Noms vernaculaires	08
III- Origine et Diffusion	08
IV- Ecologie de l'espèce	09
V- Description botanique et morphologique de l' <i>Atriplex halimus</i>	10
V-1- Graines.....	12
V-2- Feuilles.....	13
V-3- Tiges.....	14
V-4- Fleurs.....	14
V-5- Racines.....	15
VI- Description génétique de l' <i>Atriplex halimus</i>	16
VII- Techniques de propagation et plantation de l'espèce.....	17
VII-1- Par graine.....	17
VII-2- Par bouturage.....	18
VII-3- Par éclat de souche.....	18
VIII- Intérêts de la plante.....	18
VIII-1- Intérêt agronomique.....	18
VIII-2- Intérêt écologique.....	20
VIII-3- Intérêt économique.....	21
VIII-4- Intérêt médical.....	22
IX- Utilisation des <i>Atriplex</i> en phytoremédiation.....	23

CHAPITRE II : POLLUTION DE L'ENVIRONNEMENT PAR LES METAUX LOURDS.

I- Généralité sur la situation environnementale.....	25
II- Pollution.....	25
II-1- Définition.....	25
II-2- Principales causes.....	26
II-3- Relations Pollutions-Végétaux.....	27
II-4- Pollution par les Métaux Lourds.....	28
III- Métaux Lourds.....	29
III-1- Définition.....	29
III-2- Origine des Métaux Lourds.....	30
III-2-1- Sources naturelles.....	31
III-2-2- Sources anthropiques.....	32
III-3- Toxicité des métaux lourds.....	34
III-3-1- Effets sur la santé humaine.....	34
III-3-2- Effets sur les végétaux.....	35
III-3-3- Effets sur l'environnement.....	37
III-3-2-1- Pollution des sols.....	38
III-3-2-1-1-Paramètres physico-chimiques influençant la mobilité des métaux dans le sol.....	39
1. pH.....	39
2. Potentiel d'oxydoréduction (Eh).....	40
3. CEC.....	41
4. Matière organique.....	42
5. Texture et la structure du sol.....	42
6. Température.....	42
7. Pratiques culturales.....	43
III-3-2-2- Pollution des eaux.....	43
III-3-2-3- Pollution de l'air.....	44
IV-Contamination des sols par le Cr et le Pb.....	45
IV-1- Cas du chrome.....	45
IV-2- Cas du plomb.....	47

CHAPITRE III: DIFFERENTS PROCEDES DE LA PHYTOREMEDIATION.

I- Phyto-dépollution.....	49
I-1- Principes de la phyto-dépollution.....	49
II- Définitions et généralités de la phytoremédiation.....	49
II-1- Mécanismes de phytoremédiation.....	50
II-1-1- Phytœxtraction (ou Phytoaccumulation ou Phytofiltration).....	51
II-1-2- Phyto-transformation (ou Phyto-dégradation).....	52
II-1-3- Rhizo-dégradation (ou Phyto-stimulation).....	53
II-1-4- Phyto-stabilisation.....	54
II-1-5- Phyto-volatilisation.....	54
II-2- Critères de choix des plantes pour la phytoremédiation.....	55
II-2-1- Principales plantes phytoremédiantes.....	57
II-3- Différentes étapes de la phytoremédiation.....	59

II-3-1- Solubilisation du métal dans la matrice du sol.....	59
II-3-2- Prise dans la racine.....	59
II-3-3- Transport aux feuilles.....	61
II-3-4- Détoxification/Chélation.....	62
II-3-4-1- Méthallothionéines (MT).....	62
II-3-4-2- Phytochélatines (PC).....	63
II-3-4-3- Acides organiques.....	64
II-3-4-4 - Acides aminés libres.....	65
II-3-5- Séquestration/Volatilisation/Compartimentation.....	65
II-4- Autres systèmes de défense au stress métallique.....	66
III- Stratégies d'augmenter les performances la phytoremédiation.....	68
III-1- Amélioration de l'absorption et de la translocation.....	68
III-2- Création des plantes transgéniques à performances améliorées.....	69

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

1- MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE I : CULTURE D'*Atriplex halimus*.

I-Introduction.....	71
II-Protocole expérimental.....	71
III-Conduit de l'essai.....	73
III-1-Matériel sol.....	73
III-1-1-Préparation du substrat de culture.....	74
III-2-Matériel végétal.....	74
III-2-1-Echantillonnage et description de la provenance.....	74
III-2-2-Préparation du matériel végétal (graines).....	75
III-2-2-1-Décorticage des graines.....	75
III-2-2-2-Stérilisation des graines.....	75
III-3-Mise en germination.....	75
III-4-Semis.....	75
III-5-Milieu de culture pour l'irrigation.....	75
III-6-Installation de l'essai.....	76
III-6-1-Protection de semis.....	78
IV-Paramètre étudié.....	79
IV-1-Paramètres biométriques.....	79
IV-1-1-Taux de germination.....	79
IV-1-2-Taux de levée.....	79
IV-1-3-Taux de survie.....	79
IV-1-4- Hauteur des tiges.....	79

CHAPITRE II : IMPACT DES METAUX LOURDS SUR L'*Atriplex halimus*

I- Introduction.....	80
II-Protocole expérimental.....	81
II-1- Conduit de l'essai.....	82
II-1-1- Application du stress métallique.....	82
II-1-2- Prélèvement, préparation et conservation des échantillons pour analyses.....	84
III- Paramètres étudiés.....	86

III-1- Taux de survie.....	86
III-2- Paramètres biométriques.....	86
III-2-1- Nombre des feuilles et Croissance en longueur.....	86
III-2-2- Détermination de la matière sèche, de la matière organique et des cendres... 86	
III-2-2-1- Détermination de la matière sèche.....	86
III-2-2-2- Détermination des cendres ou la matière minérale totale.....	87
III-2-2-3- Détermination de la matière organique.....	88
III-2-3- Teneur en eau relative.....	88
III-3- Paramètres physico-chimiques des substrats étudiés.....	89
III-3-1- Mesure du pH.....	89
III-3-2- Analyses des métaux lourds dans les différents substrats.....	89
III-4- Dosage des métaux lourds dans les plantes.....	89
III-4-1- Calculs du facteur de translocation (FT).....	89
III-5- Paramètres biochimiques.....	90
III-5-1- Dosage de la chlorophylle.....	90
III-5-2- Dosage des sucres solubles.....	90
III-5-3- Dosage de la proline.....	91
III-5-4- Dosage des composés phénoliques.....	92
III-5-4-1- Extraction des composés phénoliques.....	92
III-5-4-1-1- Préparation des extraits bruts (composés phénoliques).....	92
III-5-4-2- Dosage des phénols totaux.....	92
III-5-4-3- Dosage des tannins condensés.....	92
III-5-4-4- Dosage des flavonoïdes.....	93
III-6- Etude anatomique.....	93
III-6-1- Microscopie électronique à balayage (MEB) couplée avec l'EDX.....	93
III-6-1-1- Principe général d'un Microscope électronique à balayage (MEB).....	94
III-6-1-2- Réalisation des coupes anatomiques au Microscope électronique à balayage.....	94
IV- Analyse statistique.....	95

2-RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE I : CULTURE D'*Atriplex halimus*.

I-Paramètres biométriques.....	96
I-1- Taux de germination.....	96
I-2- Taux de la levée.....	97
I-3- Taux de survie.....	97
I-4- Hauteurs des tiges.....	98

CHAPITRE II : IMPACT DES METAUX LOURDS SUR L'*Atriplex halimus*

I- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la croissance des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	100
I-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur le taux de survie des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	100
I-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les caractéristiques biométriques des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	102

I-2-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la longueur des racines d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	102
I-2-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la croissance des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	105
I-2-2-1- Longueur des tiges.....	105
I-2-2-2- Taux de croissance des tiges.....	107
I-2-3- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur le nombre des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	109
I-2-4- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la biomasse d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	112
I-2-4-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en matière sèche (MS).....	112
I-2-4-1-1- Dans les racines.....	112
I-2-4-1-2- Dans les tiges.....	114
I-2-4-1-3- Dans les feuilles.....	115
I-2-4-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en matière minérale (MM).....	118
I-2-4-2-1- Dans les racines.....	118
I-2-4-2-2- Dans les tiges.....	119
I-2-4-2-3- Dans les feuilles.....	121
I-2-4-3- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en matière organique (MO).....	124
I-2-4-3-1- Dans les racines.....	124
I-2-4-3-2- Dans les tiges.....	125
I-2-4-3-3- Dans les feuilles.....	127
I-2-5- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en eau relative (RWC) d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	129
II- Effet du stress par les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur les propriétés physico-chimiques des substrats (sol) obtenus dans les différents types d'expérimentation.....	132
II-1- Evolution du pH dans les substrats (sol) en fonction des traitements au Pb, Cr(III) et au Cr(VI).....	132
II-2- Effet du stress par les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur la teneur en plomb et en chrome dans les substrats (sol) de la culture des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	136
III- Effet du stress par les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur l'accumulation du plomb et du chrome par les plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	141
III-1- Effet du stress par le Pb sur l'accumulation du Pb par les plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	141
III-2- Effet du stress par le Cr(III) sur l'accumulation du Cr par les plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	146
III-3- Effet du stress par le Cr(VI) sur l'accumulation du Cr par les plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	150
III-4- Facteur de translocation (FT) du Pb, Cr(III) et du Cr(VI).....	156
IV- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les caractéristiques biochimiques des plantes d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	159
IV-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en chlorophylle a, chlorophylle b et chlorophylle a+b chez l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	159

IV-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en sucres solubles d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	164
IV-2-1- Dans les feuilles.....	164
IV-2-2- Dans les tiges.....	166
IV-3- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en proline d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	170
IV-3-1- Dans les feuilles.....	170
IV-3-2- Dans les tiges.....	172
IV-3-3- Dans les racines.....	174
IV-4- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en polyphénols d' <i>Atriplex halimus</i> L.....	179
IV-4-1- Teneur en phénols totaux.....	179
IV-4-1-1- Dans les feuilles.....	179
IV-4-1-2- Dans les tiges.....	181
IV-4-2- Teneur en flavonoïdes.....	184
IV-4-2-1- Dans les feuilles.....	184
IV-4-2-2- Dans les tiges.....	186
IV-4-3- Teneur en tanins.....	189
IV-4-3-1- Dans les feuilles.....	189
IV-4-3-2- Dans les tiges.....	191
V- Localisation des métaux lourds dans les tissus des feuilles, tiges et des racines d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI).....	194
V-1- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI).....	194
V-1-1- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Pb.....	194
V-1-2- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Cr(III).....	196
V-1-3- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Cr(VI).....	198
V-2- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI).....	200
V-2-1- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Pb.....	200
V-2-2- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Cr(III).....	202
V-2-3- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Cr(VI).....	204
V-3- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI).....	206
V-3-1- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Pb.....	206
V-3-2- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Cr(III).....	208
V-3-3- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d' <i>Atriplex halimus</i> traitées à différentes concentrations de Cr(VI).....	210

CONCLUSION GENERALE	216
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	223
ANNEXES	281

A l'heure actuelle et à l'échelle mondiale, on assiste à une intensification des activités industrielles et agricoles ainsi qu'à une augmentation rapide de la population (**Gold, 2002**), qui sont à l'origine d'une contamination de notre environnement par les métaux lourds et les polluants organiques (**Vavasseur et al., 2003**). Ces substances ont des répercussions néfastes sur l'environnement, mais aussi sur la santé humaine. Dans certains écosystèmes, ces produits chimiques peuvent être à l'origine de la disparition de certaines espèces animales et/ou végétales et par conséquent, entraînent le dysfonctionnement de la chaîne trophique (faible biodiversité) (**Gold, 2002**).

Parmi les principaux polluants générés par les activités industrielles, les métaux lourds (le Pb et le Cr) posent effectivement des problèmes particulièrement préoccupants. Ces éléments, par nature non biodégradables, présentent une forte écotoxicité (**Adriano, 2001 ; Abrahams, 2002**). Leur origine peut être naturelle : les roches serpentiniques sont par exemple riches en nickel et les roches calaminaires en plomb et zinc, dont l'altération entraîne la concentration des éléments métalliques dans le sol (**Friedland, 1990**). Mais les plus importantes concentrations en métaux lourds sont le plus souvent le fait de la pollution humaine, qu'il s'agisse de déchets issus de l'exploitation des minerais, de retombées atmosphériques industrielles et du réseau routier (**Antonovics et al., 1971**). De plus, ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités : en agriculture par l'application de boues d'épuration ou dans l'industrie métallurgique (**Wang et al., 2003**).

Les sols fortement pollués représentent un réel danger pour la santé publique car les substances toxiques sont susceptibles d'être transmises dans la chaîne alimentaire. Il est primordial d'éviter la propagation de ce type de pollution à d'autres sites par l'érosion des sols dénudés ou par filtration dans le sous-sol, mais aussi de les dépolluer pour permettre leur restauration (**Macnair, 1993**). Des techniques de dépollution physico-chimiques et mécaniques existent, mais elles ont le désavantage d'être très coûteuses et lourdes à appliquer.

Afin de pallier les principales limitations des méthodes actuellement disponibles dans les stratégies de dépollution, les recherches s'orientent depuis quelques années vers l'utilisation de plantes supérieures. On sait en effet, depuis longtemps que la présence d'un couvert végétal induit ou stimule la biodégradation d'une grande variété de contaminants organiques et inorganiques (**Reilley et al., 1996**).

Les sites contaminés par les métaux lourds sont un exemple de milieu extrême où se développent pourtant des espèces végétales qui sont devenues résistantes à la toxicité du sol (**Antonovics *et al.*, 1971 ; Gartside et McNeilly, 1974**) et elles développent des moyens de protection efficaces contre ces molécules (**Hall et Williams, 2003**). La plupart excluent les métaux de leurs parties aériennes, mais certains sont capables d'y stocker de très grandes quantités de métal, et sont dits hyperaccumulateurs (**Baker et Walker, 1990**). Ces propriétés naturelles des plantes sont exploitées dans le domaine de la phytoremédiation (**Hall et Williams, 2003**).

C'est pourquoi actuellement de nombreuses recherches sont axées sur de nouvelles méthodes plus écologiques comme la phytoremédiation. Il s'agit d'un ensemble de techniques qui vise à exploiter la capacité de certaines plantes à tolérer ou à accumuler des métaux (**Chaney *et al.*, 1997**), en grandes quantités dans leurs parties aériennes sans que cela affecte leur survie (**Raskin *et al.*, 1994 ; Salt *et al.*, 1995**).

Bien que les plantes possèdent de nombreux systèmes de détoxification pour limiter l'interaction de ces ions avec les molécules biologiques, ces derniers induisent tout un éventail d'effets délétères pour les organismes (**Seregin et Ivanov, 2001 ; Sharma et Dubey, 2005**). En conditions stressantes, les plantes peuvent réagir en mettant en œuvre des mécanismes, entre autres, physiologiques (**Tafforeau, 2002 ; Parida et Das, 2005 ; Martinez *et al.*, 2007**) et biochimiques (**Brugnoli et Lauteri, 1991 ; Attia, 2007**). Cependant, de nombreux chercheurs se sont intéressés à l'impact du plomb sur les végétaux ; ce polluant affecte le métabolisme global de la plante (**Fargašová, 2001 ; Sharma et Dubey, 2005**), inhibe l'élongation racinaire (**Peng *et al.*, 2005**) et peut causer des dommages membranaires (**Seregin et Ivanov, 2001 ; Sharma et Dubey, 2005**), perturbe ainsi les structures membranaires et pariétales, modifie le statut hydrique, perturbe l'absorption et/ou la translocation des éléments minéraux essentiels (calcium, manganèse, zinc, fer, etc.) ou encore réduit la photosynthèse (**Sharma et Dubey, 2005**). Il présente également une forte affinité pour les protéines qui possèdent des groupements thiols ou des cofacteurs métalliques (métallo-enzymes) (**Pourrut, 2008**).

En revanche, plusieurs auteurs ont rapporté que les teneurs en éléments dans les tissus des plantes varient avec la concentration et la forme auxquelles la plante est exposée (**Nakada *et al.*, 1979 ; Blake *et al.*, 1987 ; Jackson *et al.*, 1991**). En effet, **Cary *et al.* (1977)**, ont montré qu'il y a une meilleure translocation du chrome vers la tige à partir d'une solution du Cr(VI) qu'avec une solution de Cr(III). En outre, son effet toxique dépend de son degré d'oxydation, Cr(III) ou Cr(VI) (**Kleiman et Cogliatti, 1998**). La toxicité de Cr(VI) est due à son pouvoir oxydant mais aussi à la formation de radicaux libres lors de sa réduction en Cr(III) dans les cellules (**Chatterjee et Chatterjee, 2000 ; Shanker *et al.*, 2005**). Cependant, la toxicité de Cr(III), à forte concentration, est

due essentiellement à sa capacité à se lier avec des composés organiques, ce qui conduit à une altération du métabolisme (inhibition de l'activité enzymatique). Cr(III) a également la capacité de générer des espèces possédant un oxygène actif, ce qui conduit alors à un stress oxydatif (**Mei et al., 2002**). Cette phytotoxicité peut être à l'origine de dommages au niveau des racines, d'une diminution de la croissance et d'une chlorose.

En effet, pour atténuer l'effet de toxicité dans les milieux hautement concentrés, les plantes, aussi bien les halophytes que les glycophytes, peuvent développer plusieurs mécanismes pour assurer leur cycle de croissance et de développement ; certaines espèces utilisent le mécanisme d'exclusion des sels en excès (**Alem et Amri, 2005**) ou les compartimentent dans la vacuole (**Niu et al., 1995**). L'utilisation du profond enracinement des espèces halophytes est d'intérêt particulier dans ce contexte parce que ces plantes sont naturellement présentes dans des milieux caractérisés par un excès d'ions toxiques (**Lutts et al., 2004**). Ces plantations peuvent valoriser les terres marginales inutilisables en agriculture traditionnelle (**Nefzaoui et Chermiti, 1991**).

Parmi la flore de l'halophyte, les espèces qui appartiennent au genre *Atriplex* peuvent être d'intérêt spéciale à cause de leur haute production de la biomasse associée avec un système racinaire profond capable de se débrouiller avec la structure pauvre et caractéristiques du xérique de plusieurs des substrats polluants (**Lutts et al., 2004**). Dans cette grande gamme des espèces du genre *Atriplex*, une espèce très prometteuse pour être un outil efficace pour la dépollution des sols contaminés par les métaux lourds, c'est l'*Atriplex halimus* L. (**Le Houérou, 2000**), elle joue un rôle majeur dans la réhabilitation des terres dégradées, spécialement dans les zones arides et semi arides méditerranéennes (**Abbad et Benchaabane, 2004**).

Les critères pour mesurer l'efficacité d'une plante à dépolluer des sols contaminés sont sa capacité à croître sur le sol contaminé et sa capacité à absorber de grandes quantités de polluants, voire à les dégrader. Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à une espèce de plante tolérante aux métaux et sur son potentiel en tant qu'outil de stabilisation des sols et qui permettrait de restaurer les sites pollués. Cette espèce est *Atriplex halimus*.

Notre contribution se situe à ce niveau de la problématique. Ainsi, en se basant sur des approches et techniques variées on a étudié la toxicité, la tolérance et l'accumulation de deux métaux lourds, le plomb et le chrome, chez l'espèce susceptible d'être utilisées en phytoremédiation (*Atriplex halimus*) à des différentes doses dans le but de préciser le lien entre disponibilité dans le sol et dans la plante. Les capacités de tolérance et d'accumulation de cette espèce ont été évaluées dans le dispositif expérimental ; qui va nous permettre des avancées importantes dans la compréhension des mécanismes de disponibilité de ces métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) et leurs transferts vers la plante.

C'est dans cette perspective que s'inscrit l'objectif de ce travail de Thèse qui est l'évaluation de la tolérance et de l'accumulation du plomb (Pb) et du chrome (Cr) sous deux formes: la forme hexavalente Cr(VI) et la forme trivalente Cr(III) chez *Atriplex halimus*. Ainsi, on pense apporter une contribution originale sous forme d'une étude comparative des potentialités de cette espèce, vis-à-vis de deux métaux lourds. Le choix de ces deux métaux a été guidé par l'importance de la pollution par ces deux métaux, et particulièrement dans la région de l'ouest Algérien.

Du fait du quasi inexistence de littérature concernant la réponse d'*Atriplex halimus* et comprendre la variabilité de cette halophyte face à ce type de stress abiotique à différentes concentrations en plomb (1000, 4000 et 8000 ppm), en Cr(III) (250, 500 et 750 ppm) et en Cr(VI) (50, 100 et 150 ppm), nous nous sommes attachés dans un premier temps, à déterminer les effets de ces métaux sur l'*Atriplex halimus*, en considérant plus particulièrement : la réponse de la plante à cette exposition par l'évaluation de plusieurs paramètres biométriques, physiologiques et biochimiques, et l'absorption du plomb et du chrome et leurs translocation vers les parties aériennes.

Une étude de localisation des métaux dans les feuilles, les tiges et les racines d'*Atriplex halimus* soumises à un stress métallique a également été entreprise par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) dans le but de localiser les métaux au niveau tissulaire.

I- Généralité

Les plantes du genre *Atriplex* se rencontrent dans la plupart des régions du globe. Elles appartiennent à la famille des *Chénopodiaceae* (**Le Houérou, 1992**), ce sont des espèces halophytes (**Ben Salem et al., 2005**) et se caractérisent par leur grande diversité, certaines espèces sont herbacées, d'autres arbustives ; elles peuvent être annuelles ou pérennes (**Kinet et al., 1998**).

Mulas, M. et Mulas, G. (2004), ont identifié plus de 400 espèces d'*Atriplex* sur tous les continents et compte environ 200 espèces réparties dans les régions tempérées et sub-tropicales ; entre 20 et 50° de latitude Nord et Sud (**Le Houérou, 1992**).

En Afrique du nord le genre *Atriplex* compte 15 espèces naturalisées dont 07 vivaces, 01 bisannuelles et 09 annuelles (**Ouadah, 1982**). Parmi les espèces les plus utilisées en Afrique septentrionale, citons l'*Atriplex nummularia* et *A. halimus* (**Papanastasis et al., 2002**). *A. halimus* a mieux répondu à l'utilisation par rapport à *A. nummularia* (**Aouissat et al., 1993**). Par ailleurs, **Maire (1962)**, a identifié une dizaine d'espèces en Algérie dont les plus répandues sont: *Atriplex halimus* et *Atriplex portulacata*.

Les *Atriplex*, espèces très appréciées par les camélidés, supportent bien les conditions climatiques et pédologiques des régions arides et semi-arides (**Benchâabane, 1997**). Leur production fourragère, bien qu'ayant un maximum en fin de printemps, peut être exploitée dans certains milieux presque, toute l'année (**Froment, 1972**). Par ailleurs, elles ont la propriété de produire une abondante biomasse foliaire et de la maintenir active durant les périodes défavorables de l'année (**Mulas, M. et Mulas, G., 2004**).

Au vu de sa grande résistance à la sécheresse, à la salinité et à l'ensoleillement, les *Atriplex* constituent une réserve fourragère importante (**Castroviejo et al., 1990**) et constituent un excellent supplément à la paille (**Nefzaoui, 2000**).

D'après **Nefzaoui et Chermiti (1991)**, les *Atriplex*, essentiellement *halimus* et *nummularia*, ont une valeur énergétique (0,6 à 0,8 UFL/kg de MS) et surtout azotée (20 à 25 % de MAT) intéressante.

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 les quelles peu d'espèces peuvent se développer (**Froment, 1972**). Elle sert principalement à affronter le phénomène de la salinisation des sols (**Malcom, 2000**). Généralement, il est associé aux sols salins ou alcalins (**Par-Smith, 1982 ; Rosas, 1989**), Bien que certaines soient implantées dans des marais salants ou des marais d'eau douce (**Kelley et al., 1982**).

Sa tolérance à la sécheresse et à la salinité la met une plante idéale pour des projets de stabilisation des sols et des dunes dans les sols arides et salins (**Dutuit, 1999**). Elle semble donc, l'une des meilleures voies de réhabilitation des zones désertiques et leur restauration pour la production (**Le Houérou, 1992**).

On a également obtenu des données à partir de recherches pour la lutte contre la désertification effectuées en Afrique Australe, où *Atriplex nummularia* et *A. halimus* ont fourni les meilleurs résultats par rapport à de nombreuses espèces arbustives testées ; *A. undulata* et *A. breweri* ont elles aussi suscité un grand intérêt (**Van Heerden et al., 2000**).

Plusieurs espèces appartenant au genre *Atriplex* sont bien adaptées aux conditions environnementales dures et constituent pour cette raison un matériau utile pour l'identification des mécanismes physiologiques et des gènes concernés dans la résistance au stress abiotique (**Shen et al., 2003 ; Cabello-Hurtado et Ramos, 2004 ; Wang et Showalter, 2004**).

II- Présentation de l'espèce

L'*Atriplex halimus* (Saltbush méditerranéen) (**Ortiz-Dorda et al., 2005**), (synonymes: *A. vestita* ou *A. capennis*) (**Anonyme, 2000**), est un arbuste vivace (**Haddioui et Baaziz, 2001**), halophyte (**Martínez et al., 2003**), natif d'Afrique du Nord où il est très abondant (**Kinet et al., 1998**) ; Il est classé second après l'espèce australienne *A. nummularia* pour la superficie occupée (**Le Houérou, 2000**), Il s'étend également aux zones littorales méditerranéennes de l'Europe et aux terres intérieures gypso-salines d'Espagne. *Atriplex halimus* L. est un arbuste fourrager autochtone qui tolère bien les conditions d'aridité (sécheresse, salinité, etc.) (**Souayah et al., 1998**), peut être trouvé dans la zone intertidale des déserts côtiers et les habitats intérieurs sec-salins (**Glenn et Brown, 1998**). D'autre part, que cette espèce est plus adaptée aux différentes contraintes climatiques (gelées du printemps et stress hydrique et salin en été) de la zone steppique (**Rahmoune et al., 2000**).

Cette espèce peut contribuer à la valorisation des sols marginaux et dégradés et à l'amélioration des productions végétale et animale dans plusieurs régions démunies (**Le Houérou, 1992**). De plus, elle appartient aux espèces d'*Atriplex* les plus appétibles pour le bétail dans les zones arides du WANA (**Tiedeman et Chouki, 1989**), ces arbustes fourragers ont été introduits tant avec l'objectif de combler le déficit alimentaire du bétail que pour améliorer le contenu protéique du régime (**Mulas, M. et Mulas, G., 2004**).

L'espèce *Atriplex halimus* présente deux sous-espèces distinctes qui diffèrent par leur morphologie (densité de feuillage et longueur des rameaux florifères) et loge écologique (**Ben Ahmed et al., 1996**), subsp. *halimus* et subsp. *schweinfurhii*. La zone de diffusion de la subsp. *halimus* s'étend des zones semi-arides aux zones humides ; elle est très commune le long des côtes du Bassin Méditerranéen (**Mulas, M. et Mulas, G., 2004**).

Plusieurs espèces du genre *Atriplex* ont fait l'objet de travaux de recherche. Les premiers travaux ont porté sur l'aspect fourrager et la nutrition minérale, la résistance et la tolérance à la salinité et à la sécheresse (**Le Houérou, 1992**).

Les expériences menées en laboratoire sur *Atriplex halimus* et les observations faites sur le terrain laissent à penser que cette espèce serait une halophyte facultative (**Waisel et Pollaek, 1972 ; Le Houérou, 1992 ; Bajji et al., 1998 ; Martínez et al., 2003**). Il constitue la base d'une nouvelle agronomie pour les zones arides (**Ben Rebiha, 1987 ; Abbad et al., 2003**).

L'*Atriplex halimus* est l'espèce xéro-halophyte méditerranéenne de haute résistance à la sécheresse (**Le Houérou, 2000**), à la salinité (**Bajji et al., 1998**), et au stress des métaux lourds (**Lutts et al., 2004**).

II-1- Systématique

L'espèce *Atriplex halimus* est une plante halophyle (**Pottier, 1981 ; Ben Ahmed et al., 1996**), se trouve à l'intérieur du genre *Atriplex* (**Bajji et al., 1998**), qui est le plus grand et le plus diversifié de la famille des *Chenopodiaceae* (**Mulas, M. et Mulas, G., 2004**). A cette famille appartiennent environ cent genres qui peuvent être divisés, suivant la forme de l'embryon : *Cyclobae*, qui présente un embryon en forme de fer à cheval ou en demi-cercle comprenant l'endosperme en entier ou en partie. A cette tribu appartient le genre *Atriplex* (**Rosas, 1989**).

L'embranchement des *Spermaphytes* renferme la quasi-totalité des végétaux d'intérêt agronomique (**Messaili, 1995**). L'*Atriplex halimus* est une plante fourragère importante des zones arides méditerranéennes (**Pourrat et Dutuit, 1994**). Selon **Grenet (1997)**, les plantes fourragères appartiennent au sous embranchement des *Angiospermes*, qui renferme des végétaux très variés (**Tableau 1**).

Tableau 1. Classification botanique d'espèce *Atriplex halimus* L. (Quezel et Santa, 1962 ; Dupont et Guignard, 2007).

Règne	Végétale
Embranchement	<i>Phanérogames ou Spermaphytes</i>
Sous embranchement	<i>Angiospermes</i>
Classe	<i>Dicotylédones</i>
Sous classe	<i>Préastéridées</i>
Ordre	<i>Caryophyllades</i>
Sous ordre	<i>Chénopodiales</i>
Famille	<i>Amaranthacées</i>
Genre	<i>Atriplex</i>
Espèce	<i>halimus</i> L.

II-2- Noms vernaculaires

- ✿ **En Arabe :** G'ttaf, (Legtaf) en Algérie (Longuo *et al.*, 1989), Chenane en Maroc (Aboura, 2005), Aramass (Quezel et Santa, 1962), Hachichat Ezzaj, Ghassoul el Aachebi (Halimi, 1997) ;
- ✿ **En Français :** Pourpier de mer, Arroche maritime, Arroche sauvage, Arroche halime (Picard *et al.*, 1982), épinard de mer, nommé localement dans le sud de la France « Blanquette » ;
- ✿ **En Anglais:** Saltbush. Mediterranean, Saltbush (Ortiz-Dorda *et al.*, 2005), Roghaata, Cape saltbush, Brakbos, Brak vaalbos, Soutbos, Vaalbosse, Aalbrak (Anonyme, 2000).

III- Origine et Diffusion

L'origine de cette espèce n'est pas bien connue (Kinet *et al.*, 1998), certains présumant qu'elle est originaire d'Afrique du Nord (Le Houérou, 1980) ; on la considère aussi comme plante native d'Iran (Nazari, 1997). D'autres estiment qu'elle est d'origine de l'Australie et s'étend aux parties arides et semi-arides du monde (Osman et Ghassalie, 1997). On trouve également des exemplaires de ce genre dans les régions polaires, bien qu'en nombre très réduit (Par-Smith, 1982 ; Rosas, 1989).

Elle s'étend aux zones littorales méditerranéennes de l'Europe et aux terres gypso-salines de l'Espagne (Dutuit, 1999) ; Elle paraît comme une espèce bien adaptée au milieu car elle assure un rendement en fourrage relativement stable, tout au long de l'année (Rahmoune *et al.*, 2000).

Atriplex halimus est la plante indigène la plus représentée sur le pourtour méditerranéen, couvrant pas moins de 80.000 ha en Syrie, Jordanie, Egypte, Arabie Saoudite, Libye et Tunisie (**Martínez et al., 2003**) ; En Tunisie, elles sont utilisées pour la réhabilitation des pacages et couvrent 400.000 ha et sont très bien pâturées durant l'été. Cependant, elles sont sujettes d'un surpâturage durant les années sèches (**Nefzaoui, 1997**). Elle se retrouve aussi en France, en Espagne, au Portugal, en Italie, en Grèce, en Albanie, à Malte, à Chypre, en Algérie, au Maroc, et en Afrique du Sud à des altitudes comprises entre 0 et 1.000 mètres (**Castroviejo et al., 1990 ; Le Houérou, 1992**).

Depuis le Canaries jusqu'en Iran vers le sud Algérien l'espèce atteint le massif du Hoggar (**kinet et al., 1998**). Le genre *Atriplex* se rencontre aussi sur les littorales et même sur le Sahara, au Hoggar, et particulièrement dans les régions de Bechar où les nappes logent les dépressions d'Oued (**Rahmoune et al., 2000**). En l'Algérie, certaines espèces sont menacées de disparaître (**Chamard, 1993**), d'autres manifestent des mécanismes d'adaptation (**Batanouny, 1993**), des essais ont été réalisés sur le cordon dunaire dans la région de Djelfa et Boussaâda avec plusieurs espèces d'*Atriplex* semblent donné des résultats satisfaisants dans la fixation des dunes (**Benrebiha, 1987**).

IV- Ecologie de l'espèce

En Algérie, et à cause de ce déséquilibre, la production fourragère dans ces régions arides traditionnellement à vocation pastorale, diminue de façon continue et le taux de satisfaction des besoins alimentaires du bétail par la production fourragère locale est passé de 70% en 1978 à 40% en 1986 et se maintient jusqu'en 1996 (**Houmani, 1997**). L'aménagement de ces régions en vue d'une amélioration de la production fourragère des parcours passe d'abord par une meilleure connaissance de la biologie et de l'écologie des *Atriplex* (**Kinet et al., 1998**).

Les environnements extrêmes, comme les zones arides ou semi-arides où les précipitations sont souvent irrégulières, sont les loges écologiques préférentielles de la plupart des espèces du genre *Atriplex* (**Martínez et al., 2003**), l'espèce *Atriplex halimus* s'accommode à divers types de sols (**Pouget, 1971**), mais il préfère les sols limoneux (**Forment, 1972**), sableux (**Killian, 1953**), argileux, marneux, gypseux, calcaires, hydromorphes et salés (**Vilax, 1963**).

Dans les régions arides et semi-arides, la salinité des sols est une contrainte pour le développement des plantes (Lauchli et Eptein, 1990 ; Higazy *et al.*, 1995). Selon Ozenda (1991), *Atriplex halimus* L. est une espèce qui est Largement distribué, « cosmopolite » ; qui peut être adapté à un environnement doublement dur dans les sols arides halomorphe (Glenn et Brown, 1998) ; elle peut tolérer une pluviosité de (150-500 mm/an), on a rapporté qu'elle peut survivre entre une et plusieurs années sans pluies sur une large variété de sols et pourra tolérer des sols pauvres et peu profonds (Anonyme, 2000). C'est ainsi que Gale *et al.* (1970), ont montré que chez *Atriplex halimus* la salinité optimale pour la croissance est décalée vers les salinités plus faibles en atmosphère humide.

Sa résistance à l'environnement dur peut être raisonnable pour son exploitation dans les terres avec une teneur élevée en sel sur laquelle peu d'espèces peuvent se développer (Ben Ayed, 1975 ; Ferchichi, 2005), elle se développe mieux dans les sols salés (Wainwright, 1980 ; Choukr Allah *et al.*, 1997), par une croissance plus rapide et une production de phytomasse plus importante (Le Houérou et Pontanier, 1987 ; Ferchichi et Periploca, 1990 ; Zoofouri, 1993).

La présence de cet arbuste est aussi notée dans les zones minières contaminées par les métaux lourds (Lutts *et al.*, 2001), Grâce à sa tolérance à la toxicité du métal (Cibils *et al.*, 1998), leur permettent d'occuper un choix écologique important et très intéressant.

V- Description botanique et morphologique de l'*Atriplex halimus*

A. halimus a été souvent citée comme une espèce très polymorphe (Chalbi *et al.*, 1997 ; Ferchichi *et al.*, 1997 ; Kinet *et al.*, 1998), probablement en relation avec sa grande amplitude écologique et à sa reproduction allogame dominante (Haddioui et Baaziz, 2001). Ce polymorphisme se manifeste au niveau de la morphologie des structures végétales qu'au niveau des structures reproductives. La forme des feuilles d'*Atriplex halimus* peut correspondre à celle d'autres espèces du même genre (Dutuit, 1999). Il se manifeste au niveau de la dimension et la forme des feuilles des arbres fructifères et des graines, ainsi qu'un polymorphisme dans la production de la biomasse (Ben Ahmed *et al.*, 1996). Ce polymorphisme semble être une caractéristique des Chénopodiacées (Ozenda, 1983).

Du point de vue morphologique, les *Chénopodiaceae* sont caractérisées par des racines profondes et pénétrantes, destinées à absorber la plus grande quantité d'eau possible, et des feuilles alternées, petites et farineuses ou recouvertes de poils, lobées, parfois épineuses, formées de manière à réduire les pertes en eau dues à la transpiration (Mulas, M. et Mulas, G., 2004).

Atriplex halimus est un grand arbrisseau très rameux (Pottier, 1981 ; Ben Ahmed *et al.*, 1996). La plante adulte est très ramifiée, ayant un aspect blanc argenté, à tige dressé d'une couleur blanche-grisâtre, à racine blanchâtre s'orientant horizontalement pivotante en surface atteindre 3 à 5 fois la longueur de tige (Benrebaha, 1987). Dotée d'une biomasse aérienne et racinaire assez importante (Wills *et al.*, 1990 ; Chisci *et al.*, 1991), Il ramifie presque de la base, peut accroître 1 à 3 m élevé et peut atteindre 3 m de diamètre (Ortiz-Dorda *et al.*, 2005), à rameaux terminés par des grappes allongées et un peu ramifiées (Ozenda, 1983 ; Garnier *et al.*, 1995) (Figure 1) ; Si elle n'est pas broutée par le bétail, cette espèce peut atteindre 4 m d'hauteur (Négre, 1961).

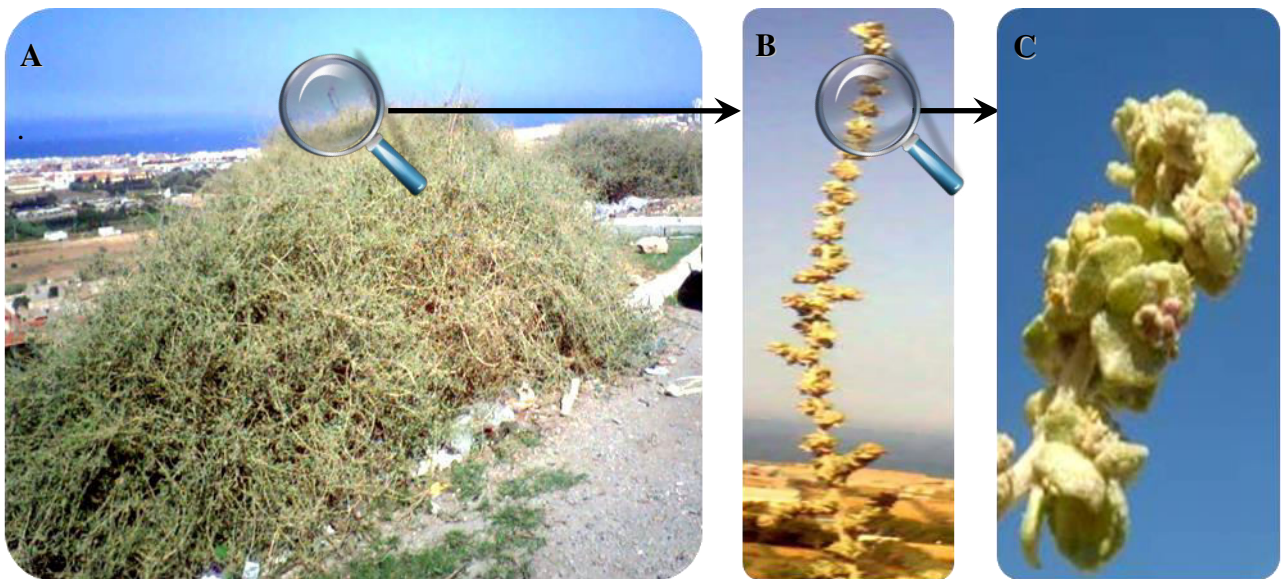


Figure 1. A) Touffes d'*Atriplex halimus* sur le littoral de Mostaganem (en Septembre) ;
 B) Panicule terminale portant les épis de graines ;
 C) Epi des graines de l'*Atriplex halimus*.

Le Houérou (1992), a divisé *A. halimus* en deux sous-espèces: *halimus* et *schweinfurthii*. Cette décision est basée sur les différences de morphologie et de niche écologique : *halimus* a une plus petite taille (0,5-2,0 m de hauteur, par rapport à 1,0-3,0 m pour *schweinfurthii*), courtes branches fructifères (0.2- 0,5 m, par rapport à 0,5 à 1,0 m).

- La première, *Atriplex halimus* L. subsp. *halimus* se rencontre en région littorale semi-aride à humide ; c'est un arbuste généralement plus feuillu, au port érigé, très ramifié, pouvant atteindre trois mètres de haut (Ben Ahmed *et al.*, 1996) ;
- La seconde, *Atriplex halimus* L. subsp. *schweinfurthii* est caractérisée par des rameaux florifères longs et nus, est plus strictement liée aux zones arides (Le Houerou, 1992).

V-1- Graines

Les graines d'*Atriplex halimus* sont des akènes (**Piotto et al., 2003**), ont un diamètre de 0,9 à 1,1 mm (**Castroviejo et al., 1990**), terne (**Negre, 1961**), lenticulaires, noires et disposées verticalement (sauf dans les fleurs hermaphrodites où elles sont horizontales) (**Quezel et Santa, 1962**). Elles sont entourées par des bractées dures et persistantes qui entravent la germination, menant aux problèmes d'indéhiscence et d'imperméabilité à l'eau et aux gaz, de plus, ces bractées contiennent des substances qui inhibent la germination (**Piotto et al., 2003**). **Ungar et Ajmel Khan (2001)**, ont démontré que l'enlèvement de ces bractées augmente la germination de 35 à 98%.

Leur ramassage est facilité du fait que les fruits restent longtemps attachés à la plante, du début d'hiver jusqu'au printemps (**Piotto et al., 2003**). D'autres parts, elles sont d'une très grande légèreté (**Pitt, 2004**), leur dissémination se fait par le vent ou par les animaux. Elles se conservent généralement bien ; si elles sont stockées au sec et au frais, elles conserveront leur viabilité pendant 3 à 10 ans et gardent une faculté germinative estimée entre 50 et 90 % (**Piotto et al., 2003**).

La dormance apparente des graines est liée à la présence des deux bractées entourant l'ovaire qui accumulent des substances inhibitrices de la germination (**Khadre, 1994**). Il y a eu peu d'élucidation des processus normaux qui éliminent la dormance. Néanmoins, l'excision de l'utricule des bractéoles et la scarification mécanique au point de dommages, ainsi qu'une scarification froide pendant 15 à 30 jours peuvent améliorer la germination et sont aussi les seuls traitements qui ont rapporté une germination significative (**Meyer et al., 1998 ; Piotto et al., 2003**).

D'après **Papanastasis et al. (2002)**, le meilleur pré-traitement pour augmenter la capacité germinative des graines est leur lavage dans l'eau courante pendant 24h et une scarification avec l'acide sulfurique. D'autres études montrent que le lavage des graines dans l'eau froide pendant une à deux heures peut éliminer le sel et améliorer la germination (**Choukr-allah, 1991 ; Piotto et al., 2003**).

Toutefois, **Bajji et al. (2002)**, ont démontré que le taux maximal de germination pouvait s'observer en l'absence de sel en conditions contrôlées. En outre, bien que la lumière et la température semblent avoir un effet stimulant sur la germination de certaines halophytes, les graines d'*A. halimus* semblent germer mieux dans l'obscurité et à température constante (**Abbad et al., 2004**).

V-2- Feuilles

Ses feuilles sont alternes brièvement pétiolées, grandes sur les jeunes pousses de printemps (Pottier, 1981 ; Aganga *et al.*, 2003), elles sont de couleur gris-vert argentée (Aganga *et al.*, 2003), caractéristique due au développement de vésicules à sel sur les cellules de leur épiderme (Aganga *et al.*, 2003), plus épaisses, pratiquement cartilagineuses, recouvertes d'une épais duvet et de cristaux de sels qui peuvent former un pseudo-tissu qui entoure la limbe foliaire des deux côtés (Mulas, M. et Mulas, G., 2004), car les plantes d'*Atriplex* sont capables d'accumuler de grandes quantités de sel dans leurs tissus et plus particulièrement dans les trichomes situés à la surface des feuilles (Mozafar et Goodin, 1970). Ces feuilles alternes brièvement pétiolées, grandes sur les jeunes pousses de printemps atteignant 5 à 6 cm, et très petites sur les rameaux florifères de l'automne (Pottier, 1981 ; Aganga *et al.*, 2003).

Abbad *et al.* (2004), ont montré l'existence d'une variabilité phénotypique hautement significative, qui est d'autant plus importante que les populations sont éloignées géographiquement et situées dans des climats différents. Ce polymorphisme important existe au niveau de la dimension et de la forme de la feuille (Ben Ahmed *et al.*, 1996), des fois orbiculaires ovées ou lancéolées ou encore deltoïdes, hastées ou rhomboïdales, généralement entières à sommet obtus, rarement dentées, un peu charnues (Pottier, 1981 ; Aganga *et al.*, 2003) (Figure 2). Ainsi cette forme peut correspondre à celle d'autres espèces du même genre. Elle varie également avec la provenance de l'individu, et sur un même pied, elle est différente selon l'état physiologique de la plante ou la position de la feuille sur un axe (Kinet *et al.*, 1998).



Figure 2. Différentes formes des feuilles d'*Atriplex halimus* de provenance « Kharouba ».

V-3- Tiges

L'*Atriplex halimus* est une espèce très ramifiée, en touffes pouvant atteindre 2 m de hauteur et 1 m de diamètre, avec des rameaux dressés (Pottier, 1981 ; Aganga *et al.*, 2003), érigés (Quezel et Santa, 1962), et ligneuses (Bonnier et Douin, 1996), avec des branches étalées (Osman et Ghassali, 1997), très rameuses d'une couleur blanche-grisâtre plus au moins anguleuses entièrement feuillées (Negre, 1961).

V-4- Fleurs

L'*Atriplex halimus* est une espèce *Chaméphyte* ou *Monophanérophyte* fleurissant (Ben Ahmed *et al.*, 1996), dont la fructification a lieu à partir du moi d'Avril jusqu'à Novembre (Nègre, 1961). La morphologie des inflorescences, et celle des fleurs d'*Atriplex halimus*, ont jusqu'ici fait l'objet de descriptions incomplètes. Cette espèce a été considérée comme monoïque ou dioïque. Chez cette espèce, un seul individu peut porter à la fois des fleurs unisexuées mâles, unisexuées femelles, et bisexuées : *A. halimus* se révèle donc polygame, plus particulièrement tri monoïque (Talamali *et al.*, 2001).

Il existe un gradient temporel d'expression du sexe, la protandrie semblant caractériser l'espèce. L'existence de structures hermaphrodites lors de l'initiation florale a été montrée ; il demeure à établir si ces structures mâles et femelles présentes dans une même fleur, peuvent être toutes deux fonctionnelles dans certaines conditions (Kinet *et al.*, 1998).

Les fleurs, peu visibles et regroupées en inflorescences en épi ou à cyme, sont petites, hermaphrodites ou unisexuelles et sont pollinisées par le vent (Rosas, 1989), de couleur jaunâtres (Pottier, 1981) ; les pétales et les sépales, très semblables, sont généralement constitués par cinq (Rosas, 1989), des fleurs mâles à cinq pétales et cinq étamines (kinet *et al.*, 1998) (Figure 3).

Les fleurs mâles et hermaphrodites sont sans bractées, le périanthe est formé de trois à cinq pétales peu apparents et abritant à sa base les étamines (Castroviejo *et al.*, 1990) ; se situent au sommet (Sabri et Touati, 2001).

Les fleurs femelles sans périanthe développent lors de la fructification deux bractées protégeant le fruit (Castroviejo *et al.*, 1990) ; ces fleurs femelles dépourvues de périanthe dont le gynécée, constitué d'un ovaire surmonté de deux styles, est enveloppé de deux bractées opposées de forme triangulaire (Kinet *et al.*, 1998), se situent à la base (Sabri et Touati, 2001), avec deux stigmates filiformes. Les bractées fructifères entourant l'ovaire sont réniformes à sub-orbiculaires, entières ou dentées, et ont une surface dorsale lisse (Castroviejo *et al.*, 1990).

Généralement, les anthères, en nombre égal ou à peine inférieur à celui des segments du périanthe, sont disposées au sommet de l'ovaire ou sur un disque. L'ovaire est constitué par une seule loge, trois carpelles et deux étamines ; il produit un seul ovule qui en mûrissant produit un akène (**Rosas, 1989**).

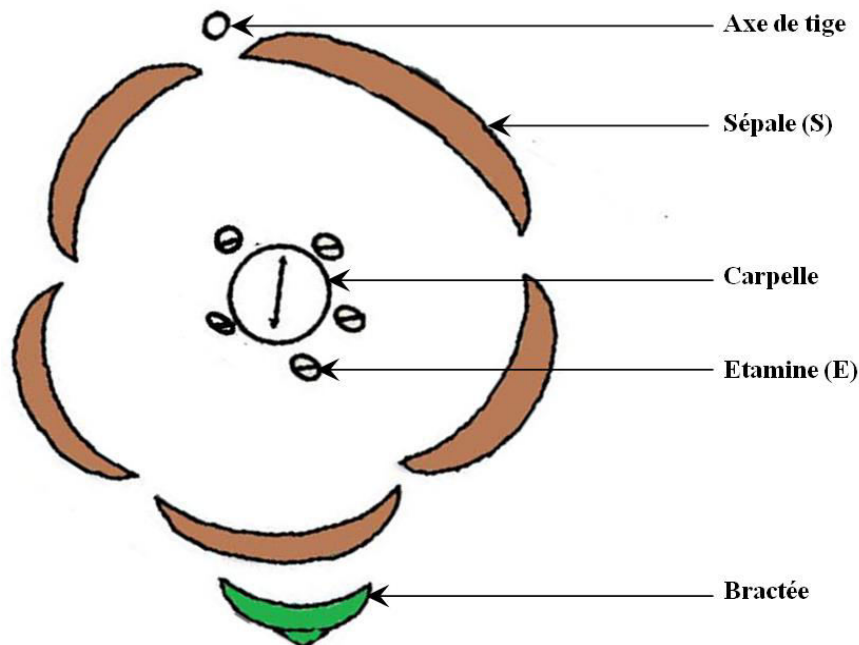


Figure 3. Diagramme florale de l'*Atriplex halimus* (**Bagnouls et Gaussen, 1953**).

V-5- Racines

Les *Chenopodiaceae* sont caractérisées par des racines profondes et pénétrantes, destinées à absorber la plus grande quantité d'eau possible (**Mulas, M. et Mulas, G., 2004**).

Le système racinaire pivotant présente un fort développement chez *A. halimus* (**Le Houérou, 1992**), il se caractérise par une grosse racine tout d'abord étalée oblique puis s'enfonçant verticalement jusqu'à une profondeur variable avec l'âge de la plante. Elle peut atteindre 3 à 5 fois la longueur de la tige. Elle est formée de radicelles blanchâtres (**Bock, 2009**), d'une racine principale de 50 à 90 cm de profondeur, avec des rares racines secondaires de même longueur et par fois plus longues d'où elle sortent plusieurs racines tertiaires, fines et courtes (**Garcia et al., 1996**), S'enraciner profondément leur permet d'atteindre des ressources d'eau indisponibles à l'espèce (**Ben Salem et al., 2002**), fixant les couches supérieures du sol et peut être utilisée comme moyen de lutte contre la désertification (**Belkhoudja et Bidai, 2004**).

En effet, ces plantes possèdent un système racinaire très développé qui leur permet d'utiliser les réserves d'eau du sol et de former un réseau dense susceptible d'agréger le sol et de le rendre résistant à l'érosion (**Dutuit et al., 1991**).

VI- Description génétique de l'*Atriplex halimus*

Les espèces du genre *Atriplex* présentent un polymorphisme morphologique prononcé se manifestant au niveau de la taille et la forme des feuilles, des valves fructifères et des graines, et de la production de biomasse en général (**Ben Ahmed et al., 1996**).

L'*Atriplex halimus* est une espèce qui présente un grand polymorphisme (**Dutuit, 1999**), Le polymorphisme de cette espèce est plus important que celui des autres espèces du même genre (**Quezel et Santa, 1962**), au niveau de la morphologie des structures végétatives et reproductrices ainsi qu'une grande variabilité au niveau du comportement physiologique des individus (**Kinet et al., 1998**), probablement en relation avec sa grande amplitude écologique et à sa reproduction allogame dominante. Il existe, au sein de cette espèce, un grand polymorphisme (phénotypique et génétique) et une différenciation qui est d'autant plus importante que les populations sont éloignées géographiquement et croissent sous un climat différent (**Abbad et al., 2004**).

Du point de vue caryologique, le niveau de ploïdie apparaît très variable, des plantes diploïdes, triploïdes et tétraploïdes ayant été identifiées lors des nombreuses expérimentations (**Barrow, 1997**). Le nombre de chromosomes pouvant varier de 18 ou 36 (**Osmond et al., 1980**). **Talamali et al. (2001) et Walker et al. (2005)**, ont déterminé les niveaux de ploïdie pour 26 populations d'*A. halimus* à travers le bassin méditerranéen et les îles de Canaries. Les deux études ont montré que les populations de la France et de l'Espagne, correspondant au phénotype de subsp. *halimus*, étaient diploïde ($2n = 2x = 18$), tandis que ceux de l'Afrique du Nord, l'Italie, l'Egypte et la Syrie étaient tétraploïde ($2n = 4x = 36$) et correspondait généralement au phénotype de subsp. *schweinfurthii*.

Des données récentes ont montré que la sous espèce *halimus* serait diploïde alors que la sous-espèce *schweinfurthii* est tétraploïde : ceci expliquerait l'existence de barrières non seulement géographiques mais aussi sexuelles entre ces deux groupes et l'absence de type intermédiaire malgré les inévitables échanges de matériel végétal entre les deux rives de la Méditerranée (**Osmond et al., 1980**).

VI- Techniques de propagation et plantation de l'espèce

Les *Atriplex* peuvent se multiplier par diverses méthodes de multiplication : par graine, par bouture ou éclats de souches (**Piotto et al., 2003**).

La propagation d'*Atriplex halimus* par la voie sexuée donne une descendance très hétérogène. La maîtrise de différentes techniques de multiplication végétative s'impose-t-elle pour pallier ces difficultés. La micropropagation in vitro est une voie de multiplication qui permet d'obtenir rapidement et en grande quantité des clones homogènes et performants. Plusieurs espèces du genre *Atriplex* ont fait l'objet de travaux de recherche (**Le Houerou, 1992**).

VI-1- Par graine

Malgré la possibilité de diffuser par multiplication asexuée les principales espèces arbustives du genre *Atriplex*, la technique de multiplication la plus répandue est celle qui utilise les graines, avec la gestion des plants en pépinière. De nombreuses recherches ont été effectuées pour améliorer la germinabilité et la géabilité des graines (**Lailhacar et Laude, 1975 ; Von Holdt, 2000**). C'est une plante qui préfère les sols frais, riches en humus, la multiplication se fait par semis (semis à 20°C-25°C) sur sable au printemps de mars à mai. Elle est extrêmement hétérogène et polymorphe (**Ben Ahmed et al., 1996**).

C'est la méthode de multiplication la plus simple, les graines devront être préalablement traitées en raison de la présence de chlorure de sodium et d'autres substances hydrosolubles. Dans les valves fructifiées de la germination (**Koller et al., 1957**). Il est préférable de faire les semis en chambre de culture que de réaliser un semis direct, après 3 à 6 mois les plantes ayant 20 à 30 cm de longueur doivent être transplantés ailleurs (**Anonyme, 2000**).

Nombreuses recherches ont rapporté que la germination des graines d'*Atriplex halimus* est inhibée par l'augmentation de la salinité, les graines traitées à 4 et 5 % de Na Cl présentent moins de 5 % de germination, alors qu'à des taux supérieurs à 5% aucune germination n'a été observée, cependant une fois placées dans l'eau distillée, leur germination atteint des niveaux équivalents à celles des graines traitées à l'eau distillée (**Choukr Allah, 1991 ; Piotto et al., 2003**).

VI-2- Par bouturage

Cette méthode de multiplication est utilisée en rareté de graines. Pour une bonne réussite les boutures doivent porter des feuilles, des bourgeons apicaux et des bourgeons latéraux. Les meilleures boutures sont celles prélevées sur les plantes âgées d'un an, les petites jeunes se bouturent mieux que les vieilles (**Piotto *et al.*, 2003**), l'enracinement de boutures fournit, d'après de bons moyens à bons prix de propagation d'un matériel de plantation amélioré (**Ellern, 1970**).

VI-3- Par éclat de souche

C'est une technique lente et qui doit être appliquée en pleine saison des pluies pour réussir (**Godet *et al.*, 1998**), donnant des résultats aléatoires, la qualité est assez réduite, il peut être soit préparé en pépinière et transplanté en automne en motte, soit installé directement au champs (**Piotto *et al.*, 2003**) ; la difficulté réside dans les prélèvements (**Bouhraoua, 1989**).

VIII- Intérêts de la plante

Cette espèce est retenue pour ses divers intérêts notamment dans la désalinisation (**Le Houerou, 1992**) et la fixation des sols (**Benrebaha, 1987**), et sa tolérance à la salinité (**Hamdy *et al.*, 1999**). Il est présent dans des régions où le déséquilibre écologique s'accroît et où le phénomène de désertification prend des dimensions alarmantes (**Dutuit, 1999**).

Les plantations d'*A. halimus* constituent un facteur de protection de l'environnement puisqu'elles présentent une action anti-érosive (**Nefzaoui et Chermiti, 1991**).

D'autre part, cette espèce est plus adaptée aux différentes contraintes de la zone steppique (gelée printanières, stress hydrique et stress salin) (**Dutuit, 1999**).

VIII-1- Intérêt agronomique

A. halimus (*Chénopodiaceae*) est une espèce spontanée, pérenne des régions méditerranéennes arides et semi-arides. L'espèce présente une palatabilité et une appétibilité très satisfaisantes (**Kinet *et al.*, 1998**), elle est très appréciée par le dromadaire, comme les caprins, (**Benchaabane, 1997**), les ovins et les camélidés (**Ben Ahmed *et al.*, 1996**). Elle constitue une source importante pour le cheptel en matière azotée, essentiellement en période de disette (**Choukr Allah, 1991 ; El-Shatnawi et Mohawesh, 2000**), parce qu'elle ne perd pas leur feuillage (**Konig *et al.*, 1991**), supporte mieux les conditions climatiques et pédologiques des régions désertiques mais son aire de répartition se réduit de plus en plus, suite au surpâturage et au manque de stratégie de gestion de ces parcours (**Benchaabane, 1997**).

Cependant la consommation en eau des animaux s'élève lorsque la proportion d'*Atriplex* dans leur ration devient importante sur tout si les *Atriplex* ont passé sur un sol ou avec de l'eau contenant du sel (Kayouli, 2001).

Les études de valeurs fourragères et de digestibilité ont permis de situer l'*Atriplex halimus* comme source protéique comparativement à d'autres types de fourrage (Dutuit, 1999), elle est riche en protéines brutes (Choukr Allah, 1991 ; El-Shatnawi et Mohawesh, 2000), et comprend une valeur énergétique estimée entre 0,6 à 0,8 UFL/Kg de MS, un apport azoté de 20 à 25% de MAT avec une teneur en lysine avoisinant 7% de MAT et une teneur faible en cellulose brute (10 à 20% de MS) (Nefzaoui et Chermiti, 1991), dont les proportions sont indiquées dans le **tableau 2**.

Tableau 2. Composition chimique moyenne d'*Atriplex halimus*, en % de la MS.

Paramètres	MS	MO	CB	MAT	P	Ca	K	Na
Auteurs								
(Floret et Pontanier, 1982 ; Ben M'hamed, 1990)	-	-	-	-	0,21	1,77	2,59	7,35
(Aganga <i>et al.</i> , 2003)	-	-	-	-	-	6,29	3,56	1,95
(Nefzaoui et Chermiti, 1991)	30,56	74,60	11,89	18,77	0,44	1,66	2,47	3,33
(Garcia <i>et al.</i> , 2002)	-	-	-	-	0,28	1,21	2,32	11
(El-Shatnawi et Turuk, 2002)	52	-	-	-	0,32	0,55	-	4,4
(Bouhadi, 2002)	24,4	-	-	19,1	-	-	-	-
(Yaakoub, 2006)	24,37	77,76	-	-	2,82	4,19	-	-

En Algérie, et à cause d'un déséquilibre, la production fourragère dans ces régions arides traditionnellement à vocation pastorale, diminue de façon continue et le taux de satisfaction des besoins alimentaires du bétail par la production fourragère locale est passé de 70% en 1978 à 40% en 1986 et se maintient jusqu'en 1996 (Houmani, 1997), *Atriplex halimus* produit 3,7 t MS/ha comparé à 0,8 à 1 t MS/ha avec *Artemisia herba Alba* ou *Arthrophytum scoparium* (Baumer, 1991), et on lui attribue une valeur énergétique de 0,85 UF/Kg MS (Nedjraoui, 2001). En Tunisie, le rendement de la même plante est estimé entre 2 et 5 t MS/ha (Kayouli, 2001).

Nefzaoui et Bensalem (1996), considèrent que les *Atriplex nummularia* et *halimus* constituent un bon complément protéique d'une ration énergétique à base de cactus, dans une perspective de valorisation des plantes résistantes à la sécheresse et à la salinité.

VIII-2- Intérêt écologique

En raison de son intérêt écologique et pastoral (**Kinet *et al.*, 1998**), une large gamme de plantation d'espèces du genre *Atriplex* a été établie récemment (**Nefzaoui, 1997**), particulièrement l'espèce *Atriplex halimus* qui est considérée comme une ressource génétique indispensable pour l'ensemble des pays d'Afrique du nord, face aux risques écosystémiques majeurs (**Dutuit, 1999**).

Dans les régions méditerranéennes arides et semi-arides, le problème de la désertification se manifeste principalement par le recul de zones boisées (soit par exploitation non contrôlée, soit par incendie ou autres ravages) et par la perte de végétation de zones steppiques à vocation pastorale (**Osmond *et al.*, 1980**). Dans ce contexte, l'*Atriplex halimus* joue un rôle très important dans le repeuplement des régions arides et semi-arides méditerranéennes (**Pourrat et Dutuit, 1994**).

En outre, les formations à base de buissons fourragers forment une bonne couverture végétale à feuillage dense qui protège le sol des agressions climatiques, sources d'érosion (pluie, vent, grêle, etc.) (**Pourrat et Dutuit, 1994**). La structure de son système racinaire et son port buissonnant, cette espèce permet de lutter efficacement contre l'érosion éolienne (**Grantz *et al.*, 1998 ; Booth *et al.*, 1999 ; Glenn *et al.*, 2001**), se sont révélés efficaces pour la fixation rapide des dunes (**Franklet et Le Houerou, 1971**), car elle se développe mieux dans les sols salés, possède un système racinaire, très développé fixant les couches supérieures du sol (**Gupta et Abrol, 1990 ; Choukr Allah *et al.*, 1997**), leur permet d'utiliser les réserves d'eau du sol de façon exhaustive et de former un réseau dense susceptible d'agréger le sol et de le rendre résistant à l'érosion (**Osmond *et al.*, 1980**), et peut excréter du sel à travers des poils sur les feuilles en lui donnant le potentiel comme une plante du désalinisation, pourvu que le matériel est périodiquement supprimé pour prévenir du sel qui revient à la terre (**Mozafar et Goodin, 1970**), ces caractéristiques font de *A. halimus* une excellente espèce pour la réhabilitation des zones dégradées pastorales (**Chisci *et al.*, 1991 ; Wills *et al.*, 1990**). Donc elle constitue un outil efficace et relativement peu coûteux dans la lutte contre l'érosion et la désertification, ainsi que dans la réhabilitation des terres dégradées (**Abbad *et al.*, 2004**).

VIII-3- Intérêt économique

L'*Atriplex halimus* est un arbuste halophile fourrager des steppes arides, important dans l'économie d'élevage des pays de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (**Pourrat et Dutuit, 1994**) ; il est utilisé comme plante fourragère car son feuillage persistant, riche en protéines, est très apprécié par les animaux durant la longue période de sécheresse estivale alors que les espèces herbacées ont disparu. Une bonne formation d'*Atriplex halimus* peut produire jusqu'à cinq tonnes hectare de matière sèche par an sur des sols dégradés ou salins inutilisables pour d'autres cultures (**Dutuit et al., 1991**), ce qui permet d'accroître la production animale des régions arides méditerranéennes et préserve l'équilibre alimentaire de ces régions.

Ces arbustes fourragers présentent un grand nombre d'avantage dans la steppe sous le climat aride (**Aronson, 1985 ; Le Houérou, 1989 ; Edward et al., 1997 ; Kinet et al., 1998**).

- Aptitude à utiliser des pluies hors saison ;
- Aptitude à donner un excellent rendement pour des faibles doses d'eau ;
- Empêchent la réduction des surfaces cultivables ;
- Aspect esthétique, ornementale, paysagisme et aménagement des territoires.

De nombreuses recherches ont démontré que ce type de plantes est caractérisé par une grande productivité, la résistance au déficit hydrique, la capacité particulière d'utiliser l'énergie lumineuse et le fait qu'elles exigent du sodium comme élément essentiel de leur métabolisme (**Mulas, M. et Mulas, G., 2004**). Elles ont une croissance rapide, nécessitant peu de soins dans les premiers stades de développement, et leur exploitation peut donc commencer rapidement (**Pourrat et Dutuit, 1994**), c'est une voie pertinente de restaurer les terrains méditerranéens épuisés (**Correal et al., 1990 ; Le Houérou, 1992**).

L'*Atriplex halimus* est tout à fait indiqué pour constituer des haies en bord de mer (brise-vent) car elle résiste bien au vent (**André Belot, 1978 ; Garnier et al., 1995**). En Italie elle utilise comme une plante pionnière pour la consolidation des pentes et le recouvrement des flancs argileux (**Wills et al., 1990**).

Aux Etats unis d'Amérique des recherches ont été entrepris depuis les années 50 pour l'étude des plantes à faible inflammabilité, et *Atriplex spp* sont considérées comme des plantes retardatrices du feu (**White et al., 1996**). Se référant aux mêmes auteurs, *Atriplex halimus* a montré un taux maximal de dégagement de chaleur, et une chaleur effective de combustion très faible par rapport à dix autres plantes étudiées, et est ainsi caractérisée par une certaine résistance au feu.

Cette espèce est également importante quant à la production de biomasse ligneuse dans des conditions ambiantes extrêmes comme celles du Maroc méridional (**Benchâabane, 2000**). Les tiges ligneuses des *Atriplex* sont également utilisées pour satisfaire les besoins des petits éleveurs et agriculteurs en combustible, une pratique qui contribue, elle aussi, à accélérer le processus de désertification de parcours déjà détériorés par le surpâturage et la céréaliculture (**Dutuit, 1999**). Il a été réalisé aussi, qu'une véritable production laitière est obtenue à partir des suspensions cellulaires d'*Atriplex halimus* (**kinet, 1998**).

Comme beaucoup de *Chénopodiacées* riches en sels alcalins, l'*Atriplex halimus* produit par incinération des sondes employées pour le dégraissage des vêtements et pour les préparations des savons (**Marouf, 2003**), (une solution de cendres est ajoutée à des matières grasses puis le tout est porté à l'ébullition quelques heures pour obtenir la saponification) (**Francllet et Le Houérou, 1971**).

Du point de vue cosmétologie, sa décoction donne une teinture rouge, d'emploi analogue à celui du henné pour les mains et les pieds (**Sengui et Djennas, 2003**).

VIII-4- Intérêt médical

L'*Atriplex* est une plante nutritive, riche en protéine (**Francllet et Le Houerou, 1971**), en vitamines C, A, et D et sels minéraux (**Benrebiha, 1987**).

Cette plante est aussi utilisée comme plante médicinale dans la pharmacopée traditionnelle (**Dutuit et al., 1994**). Elle était préconisée aux malades présentant les symptômes de diabétiques, car les sels de chrome, de manganèse et de magnésium présent dans l'*Atriplex halimus* sont censés pour empêcher le diabète chez les rats de sable qui alimentent régulièrement sur la plante et qui ont une prédisposition génétique au diabète (**Marles et Farnsworth, 1995**). En conséquence, les scientifiques ont exploré la possibilité que *Atriplex halimus* a un effet antidiabétique (**Adier et al., 1986**) et hypolipémiante (**Yaniv et al., 1987 ; Mirsky et Nitsa, 2001**).

Au Sahara occidental, les cendre de l'*Atriplex halimus*, reprise par l'eau, sont utilisées dans le traitement de l'acidité gastrique, les graines sont ingérées comme vomitif (**Bellakhdar, 1997**).

Alicata et al. (2002), ont noté la présence des tannins, des flavonoïdes, des saponines, des alcaloïdes et des résines chez *Atriplex halimus*. Cependant, il peut y avoir d'autres substances actives dans l'*Atriplex halimus* (**Shani et al., 1972**).

D'autres auteurs rapportent également l'utilisation vétérinaire d'*Atriplex halimus* par les Bédouins, comme d'autres halophytes, de combattre les parasites internes (**Alicata et al., 2002**).

IX- Utilisation des *Atriplex* en phytoremédiation

Les données concernant *Atriplex halimus* sont fragmentaires (**Chisci et al., 2001**), dans son environnement naturel, cet espèce est soumise à divers stress (**Dutuit, 1999**). Plusieurs études récentes ont permis de souligner le caractère promoteur de l'espèce qui a montré de grandes capacités d'absorption de certains cations métalliques tels que le cadmium (Cd), zinc (Zn), plomb (Pb) (**Vickerman et al., 2002 ; Kadukova et al., 2004 ; Lutts et al., 2004 ; Belarbi, 2008**), fer (Fe), manganèse (Mn) et aluminium (Al) (**Voorhees, 1990 ; Voorhees et al., 1991**). Certaines espèces d'*Atriplex* accumulent également du molybdène (Mo) (**Stark et Redente, 1990 ; Voorhees et al., 1991**), et du sélénium (Se) en grandes quantités, dans ce dernier cas la plante pourrait être capable d'en assurer la volatilisation (**Vickerman et al., 2002**). *Atriplex halimus* est utilisé pour la phytoremédiation des parcours contaminés par des métaux lourds et la population testée, en revanche, apparaît particulièrement sensible au cuivre (Cu) (**Belarbi, 2008 ; Martinez et al., 2011**).

Dans la majorité des cas, les espèces du genre *Atriplex* sont testées à des fins de phytostabilisation plutôt que dans un but de phytoextraction (**McFarland et al., 1994**). La phytoextraction implique l'utilisation des plantes pour enlever des polluants de l'environnement et a été proposée comme solution de rechange intéressante pour la décontamination de grands secteurs (**Lutts et al., 2004**). Plusieurs études récentes suggèrent que les halophytes puissent être utiles pour la phytoremédiation dans les sols salés pollués (**Williams et al., 1994 ; Glenn et al., 1999 ; Jordan et al., 2002**). C'est particulièrement le cas pour l'espèce américaine *Atriplex canescens*, qui permet d'assurer la stabilisation dans les horizons superficiels du sol d'éléments comme le barium (Ba), le chrome (Cr) et le nickel (Ni) (**McFarland et al., 1994**). La résistance aux métaux lourds dans cette espèce peut être en partie liée à la précipitation du Cd dans des cristaux d'oxalate dans les tiges. Ceci mène à conclure que le saltbush méditerranéen, qui peut produire jusqu'à 5 tonnes de matière sèche par hectare annuellement, peut être une espèce très efficace pour la phytoextraction (**Lutts et al., 2004**).

Plusieurs études récentes suggèrent que les halophytes puissent être utiles pour la phytoremédiation dans les sols salés pollués (**Williams et al., 1994 ; Glenn et al., 1999 ; Jordan et al., 2002**). La comparaison de la salure des sols en début et à la fin de l'expérimentation a également montré l'aptitude des halophytes à extraire une quantité appréciable de sel (**Abdelly, 2006**). Chez les espèces du genre *Atriplex*, il y a une translocation préférentielle des ions Na^+ vers les parties aériennes (**Reimann, 1992**) ; le sel qui entre dans la plante se rassemble en sacs cellulaires situés sur les surfaces foliaires, qui va être excrété par l'éclatement de ces cellules (**Niekerk et al., 2004**).

Mandak (2003), à démontré que dans le genre *Atriplex*, certaines espèces halophytes facultatives se sont répandues en Europe de façon non contrôlée le long d'axes routiers où des doses massives de sels (NaCl, KCl, CaCl₂) sont utilisées en période hivernale. Toutefois, quelle que soit la stratégie utilisée sur le site contaminé, il conviendra au préalable de déterminer le potentiel invasif de l'espèce utilisée (**Belkheiri, 2009**).

I- Généralité sur la situation environnementale

L'environnement est le milieu global au contact duquel sont affrontées les collectivités humaines et avec lequel elles se trouvent placées dans une situation des rapports dialectiques d'actions et de réactions ; réciproques, qui mettent enjeu tous les éléments du milieu (**George, 1973**).

L'environnement dispose d'une faculté prodigieuse d'autorégulation mais l'ampleur des actions dégradantes semble avoir dépassé ses capacités et les altérations deviennent inquiétantes (**Frolov, 1983**), dont découle de redoutables conséquences, non seulement pour la santé de l'Homme, mais pis encore pour l'équilibre écologique de la biosphère prise dans son ensemble (**Ramade, 2000**).

En effet, au fur et à mesure que la population augmente et que l'industrialisation devient plus intense, le problème de la pollution s'aggrave (**Mellanby, 1976**). L'Homme apparaît comme l'unique et le seul responsable de la dégradation de l'environnement avec le développement de la pensée, des progrès biologiques et de la technologie (**Benabdeli et benmansour, 1998**). Cependant, le potentiel et le développement technologiques n'ont pas toujours des effets bénéfiques (**Barceló, 1989**), parmi les principales causes de la crise mondiale de l'environnement, les pollutions revêtent une dimension importante qui les place au tout premier plan des divers facteurs de cette dégradation (**Ramade, 2000**).

Donc, il est devenu banal de dire que les Hommes qui appartiennent aux sociétés industrielles sont victimes d'agressions de la part du milieu qu'ils occupent et dont leurs techniques et leurs formes d'organisation sont responsables (**George, 1973**).

II- Pollution

II-1- Définition

La pollution est une altération artificielle ou naturelle d'un milieu en équilibre, en perturbant partiellement ou en totalité sa composition ou son fonctionnement (**Kozlowski et al., 2003**), peuvent vraisemblablement endommager la santé des humains, les animaux et les plantes, ou autrement compromettre l'aptitude de l'environnement à supporter la vie (**Evans et Furlong, 2003**).

Selon **Novotny (1995)**, la pollution comme est la modification, engendrée par l'Homme et ses activités, des qualités physique, chimique, biologique et radiologique des ressources naturelles (air, terre ou eau) et pouvant ainsi nuire aux utilisations actuelles, prévues ou potentielles de ces ressources.

Population et pollution se croisent de façon ininterrompue, alors que le pouvoir auto-épurateur de la biosphère suit une évolution inverse en fonction du temps (**Kozłowski et al., 2003**). En définitive, quand le terme est pris à son sens le plus large, il englobe toute action par laquelle l'Homme dégrade la nature (**Ramade, 1982**).

(La pollution ignore les frontières) (**Miquel, 2001**), L'évaluation d'une pollution et de son évolution au cours du temps s'en trouve donc d'autant plus complexe (**Alloway et Steinnes, 1999**).

II-2- Principales causes

L'équilibre des écosystèmes naturels a été fortement perturbé au cours des récents derniers ans dans la plupart des régions arides et semi arides sous l'effet de la modification des systèmes d'exploitation du milieu liée aux transformations des conditions socio-économiques et à l'évolution des techniques de production (**Nefzaoui et Chermiti, 1991**).

L'industrialisation rapide, les activités anthropogènes accrues, les pratiques agricoles modernes et les méthodes défectueuses de disposition de rebut ont augmenté les concentrations des polluants élémentaires dans l'environnement, qui causent la toxicité à toute la matière organique (**Schneegurt et al., 2001**). D'autres sources de pollutions sont plus spécifiquement liées aux terres agricoles comme l'épandage de boues d'épuration, de fumiers, de composts et d'engrais (**Evans et Furlong, 2003**).

Cinq causes déterminantes et incontournables sont énumérées par **Aguesse (1975)**, pour cerner l'aspect fondamental de la pollution :

- ⊕ Accroissement de la population ;
- ⊕ Industrialisation et procédés de production non améliorés ;
- ⊕ Diminution de la biodégradabilité des produits ;
- ⊕ Carence en récupération et recyclage ;
- ⊕ Augmentation de matière non recyclé par les écosystèmes.

Le problème du contrôle de la pollution est lié à celui de la persistance et des effets des polluants ; Dans la majorité des cas, il suffit de diluer la substance toxique pour qu'elle devienne sans danger (**Dajoz, 1985**). Cependant certains polluants sont persistants car non biodégradables, ils peuvent être concentrés par des organismes et leur taux s'élève avec le temps et deviennent dangereux.

Le terme de pollution ne doit être utilisé que s'il y a un dommage réel ou potentiel sur l'Homme ou son environnement. Les effets biologiques des agents polluants sont importants à connaître car ils sont souvent détectés avant les effets physiques ou chimiques (**Crid, 1992**).

II-3- Relations Pollutions-Végétaux

L'usage intensif de substances agrochimiques (que l'on retrouve dans les engrais, les pesticides et les fongicides), peut laisser des résidus de ces substances dans les cultures ou dans la nappe phréatique, et avoir des effets négatifs sur la santé des agriculteurs (**Birley et Lock, 1999**).

L'utilisation à long terme de certains types de pesticides (**Lebohec et Gîraud, 1999**) et des engrais pour la protection des plantes (**Evans et Furlong, 2003**), associée à de nombreux autres facteurs a causé une importante acidification des champs (**Lebohec et Gîraud, 1999**). Dans les sols acides les métaux lourds sont plus mobiles. Par conséquent, on prévoit que dans les terres où l'acidité va augmenter, les plantes absorbent une quantité plus importante de métaux lourds.

En effet à des concentrations élevées les éléments traces deviennent toxiques et s'accumulent dans les sols, les plantes et dans les organes des animaux consommant ces végétaux (**Miranda et al., 2005**). Ainsi les métaux lourds contenus dans notre environnement (eau, air ou sol) peuvent, par des cycles parfois complexes, se retrouver dans une étape végétale de notre chaîne alimentaire et entraîner des contaminations (**Barnea et Ursu, 1974**) ; ces métaux lourds peuvent s'accumuler dans la partie comestible des cultures consommée par les hommes ou les animaux. L'absorption de métaux lourds par les plantes est variable, ce qui permet d'adapter le choix des cultures au niveau et au type de contamination. Généralement, les plus grandes quantités de métaux lourds s'accumulent dans les feuilles, alors qu'on les trouve en quantités moindres dans les semences (**Iretskaya et Chien, 1999**).

Le mécanisme de l'action nocive des polluants sur la végétation est complexe, dépendant d'une part des caractères anatomiques et physiologiques des plantes d'autre part de la nature physico chimique des polluants (**Barnea et Ursu, 1974**).

Les espèces halophytes ont été naturellement sélectionnées dans un environnement caractérisé par la présence d'un excès d'ions toxiques : elles possèdent des mécanismes de tolérance (**Hagemeyer et Waisel, 1988 ; Neumann et al., 1995 ; McFarlane et Burchett, 1999**).

Donc les plantes sont utilisables de différentes manières pour dépolluer biologiquement les milieux souillés. Polluants organiques, métaux et radionucléides peuvent être plus ou moins facilement éliminés au moyen de diverses techniques développées par les chercheurs (**Vavasseur et al., 2003**).

L'absorption de ces métaux par les plantes peut être influencée par les mécanismes de synergie et l'antagonisme des éléments, par exemple, la présence élevée de zinc peut limiter l'accumulation du cadmium dans les plantes. Selon certains auteurs, l'application de zinc sous forme de Zn SO₄ réduit généralement l'accumulation de cadmium dans les graines (**Kozlowski et al., 2003**).

D'autre part, les plantes peuvent avoir un rôle stabilisant, voire curatif. Sans négliger l'atout esthétique, les plantes évitent surtout les envols de poussière et peuvent servir à végétaliser les sites pollués, sous réserve que la pollution ne soit pas excessive, et concerne certains métaux (**Miquel, 2001**).

II-4- Pollution par les Métaux Lourds

Les métaux lourds sont des éléments naturels. Ils se retrouvent dans l'air, l'eau, les sols, les sédiments, et par conséquent les plantes, les animaux et les poissons, tous éléments de l'alimentation humaine (**Miquel, 2001**), ils font partie des composants élémentaires de la lithosphère et ils ne peuvent pas être désignés à priori comme des substances polluantes (**Baize, 1997**) ; en effet chaque sol renferme une certaine teneur en métaux lourds selon la composition de sa roche mère (**Tableau 3**) et selon ses transformations chimiques (**Meyer, 1991**) ; les teneurs rencontrées dans les sols ne sont pas suffisantes pour être phytotoxiques, mais les métaux lourds s'accumulent (**Lefevre, 1998**) et l'introduction possible de ces éléments dans la chaîne alimentaire est un souci croissant de santé humaine (**Cakmak et al., 2000**).

Leur présence dans les terres agricoles et les nappes phréatiques est essentiellement liée à l'activité humaine (**Gremion, 2003**). L'industrialisation rapide, les activités anthropogènes accrues, les pratiques agricoles modernes et les méthodes défectueuses de disposition de rebut (**Schneegurt et al., 2001**), se sont accompagnées de l'extraction des substances minérales hors de leurs gisements naturels et de leurs distribution (**Palmer et Moy, 1991**), qui sont à l'origine d'une contamination de notre environnement par les métaux lourds (**Vavasseur et Richaud, 2004**). En conséquence, les métaux lourds et les métalloïdes sont un problème écologique croissant dans le monde entier (**Cakmak et al., 2000**).

Tableau 3. Contenu des roches en éléments traces (ppm) (Kabata-Pendias et Pendias, 1992).

Eléments	Roches magmatiques			Roches sédimentaires		
	Roches basiques	Roches intermédiaires	Roches acides	Roches sédimentaires argileuses et sableuses	grès	Carbonates
Cd	0,13-0,22	0,13	0,09-0,20	0,22-0,30	0,05	0,035
Cr	170-200	15-50	4-25	60-100	20-40	5-16
Cu	60-120	15-80	10-30	40	5-30	2-10
Mn	1200-2000	500-1200	350-600	500-850	100-500	200-1000
Ni	130-160	5-55	5-15	50-70	5-20	7-20
Pb	3-8	12-15	15-24	18-25	5-10	3-10
Zn	80-120	40-100	40-60	80-120	15-30	10-25

III- Métaux Lourds

III-1- Définition

Le terme « métal lourd » se rapporte à des métaux et à des métalloïdes ayant les densités plus grands que 5 g.cm^{-3} (Adriano, 2001), de numéro atomique élevé et présentant un danger pour l'environnement et/ou pour l'Homme (Borovik, 1990) et est habituellement associé à la pollution et à la toxicité (Adriano, 2001).

Vinogradov (1959), définit les métaux lourds comme étant les éléments dont la quantité totale dans la croûte terrestre est très faible $< 1 \text{ mg/g}$. Selon Adriano (2001), les éléments traces sont les éléments qui ne se trouvent dans les systèmes biologiques qu'en concentrations relativement faibles (de l'ordre de mg/kg , voire moins).

Leurs concentrations dans les tissus vivants sont normalement très faibles. Ils peuvent être séparés en deux catégories. La première catégorie comprend les éléments à l'état de trace essentiels à la croissance, au développement voire à la reproduction des organismes vivants aussi bien microscopiques que macroscopiques (Buffle, 1988 ; Tessier et Turner, 1995). La deuxième catégorie comprend les éléments métalliques toxiques, non nécessaires à la croissance des organismes vivants, tels que le cadmium, le plomb et le mercure (Mench *et al.*, 2003 ; Freitas *et al.*, 2004 ; Zvereva et Kozlov, 2004). Ils ont des impacts sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur l'Homme (Di Benedetto, 1997).

L'ensemble de ces éléments peut être d'origine naturelle mais les activités anthropiques peuvent augmenter leurs concentrations dans les écosystèmes terrestres. Cette contamination du sol n'est pas sans effet sur ces écosystèmes. En effet elle est à l'origine d'un stress pour les animaux et les végétaux et entraîne la diminution de la biodiversité et de la couverture végétale et entraîne également un manque de nutriments et d'eau (Mench *et al.*, 2003 ; Freitas *et al.*, 2004 ; Zvereva et Kozlov, 2004).

Les métaux lourds font partie des éléments toxiques (**Kozlowski et al., 2001**), les plus anciennes que l'Homme n'ait jamais connues (**Marc Verloo, 2003**), sont aussi la « trace » du passé géologique et de l'activité de l'Homme (**Miquel, 2001**), se rencontrent couramment dans l'environnement et dans les organismes vivants en faible concentration, il est préférable de classer ces métaux sous la dénomination d'éléments traces toxiques (**Picot, 2003**).

La classification des métaux lourds est d'ailleurs souvent discutée, certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "lourds" (le zinc), tant que certains éléments toxiques ne sont pas tous des métaux (l'arsenic) (**Miquel, 2001**). Ils sont en concentration dans les êtres vivants à moins de 1%. Certains sont essentiels à la vie, ce sont les oligo-éléments. Leur liste se réduit, pour les végétaux supérieurs à 6 éléments : Fer (Fe^{+2}), cuivre (Cu^{+2}), manganèse (Mn^{+2}), Zinc (Zn^{+2}), molybdène (Mo^{-6}) et bore ($\text{Bo}_3 \text{H}$), si le bore ne semble pas indispensable aux animaux et à l'Homme, ces derniers par contre, ont besoin en plus : Iode (I), cobalt (Co), fluor (F), chrome (Cr) et sélénium (Se) (**Mackenzie et Sball, 2000**).

Sous leur forme électriquement chargée, dénommées les cations (ions positifs, électriquement déficients) certains métaux sont indispensables à la vie. Parmi les plus abondants, on trouve le Fer (Fe) et le Zinc (Zn) ; d'autres ne sont essentiels qu'à faible dose, comme le Cuivre (Cu) ou le Cobalt (Co) ce sont des oligoéléments. Par contre, quelques métaux (toujours sous la forme de cations) sont pour les organismes vivants (Homme, animaux, plantes, microbes, etc.) uniquement toxiques, c'est à dire dangereux pour leur survie (**Picot, 2003**).

III-2- Origine des Métaux Lourds

La Terre est constituée pour l'essentiel d'éléments chimiques, parmi lesquels les métaux occupent une place tout à fait privilégiée, car utilisés très précocement par l'Homme pour chasser, se battre et ensuite travailler (**Picot, 2003**). Ils sont présents partout et dans tout. Mais les concentrations peuvent varier considérablement (**Marc Verloo, 2003**).

Les éléments traces dans le sol sont dérivés de ses matériaux parent (roche mère) et des apports anthropiques (**Falandysz, 1993 ; He et al., 2005**). Ainsi les éléments traces dans le sol peuvent être présent naturellement ou apportés par les êtres humains (**Figure 4**).

D'après **Miquel (2001)**, Les métaux lourds se retrouvent dans tous les compartiments de l'environnement ; Les métaux occupent une place prépondérante dans le monde moderne car ils interviennent dans la plupart des secteurs d'activité (métallurgie, infrastructures métalliques, etc.).

Par ailleurs, ils sont, pour beaucoup d'entre eux, indispensables au monde vivant (fer, zinc, etc.) parfois en très faible quantité (oligoéléments essentiels). Certains de ces oligoéléments (chrome, nickel, cobalt, manganèse, etc.) indispensables à petite dose, deviennent toxiques à forte concentration (**Picot, 2003**), ils ne peuvent pas être biodégradés et donc pour résider dans l'environnement pendant de longues périodes. Leur présence dans les sols peut être des origines normales ou anthropogènes (**Ernst, 1998**).

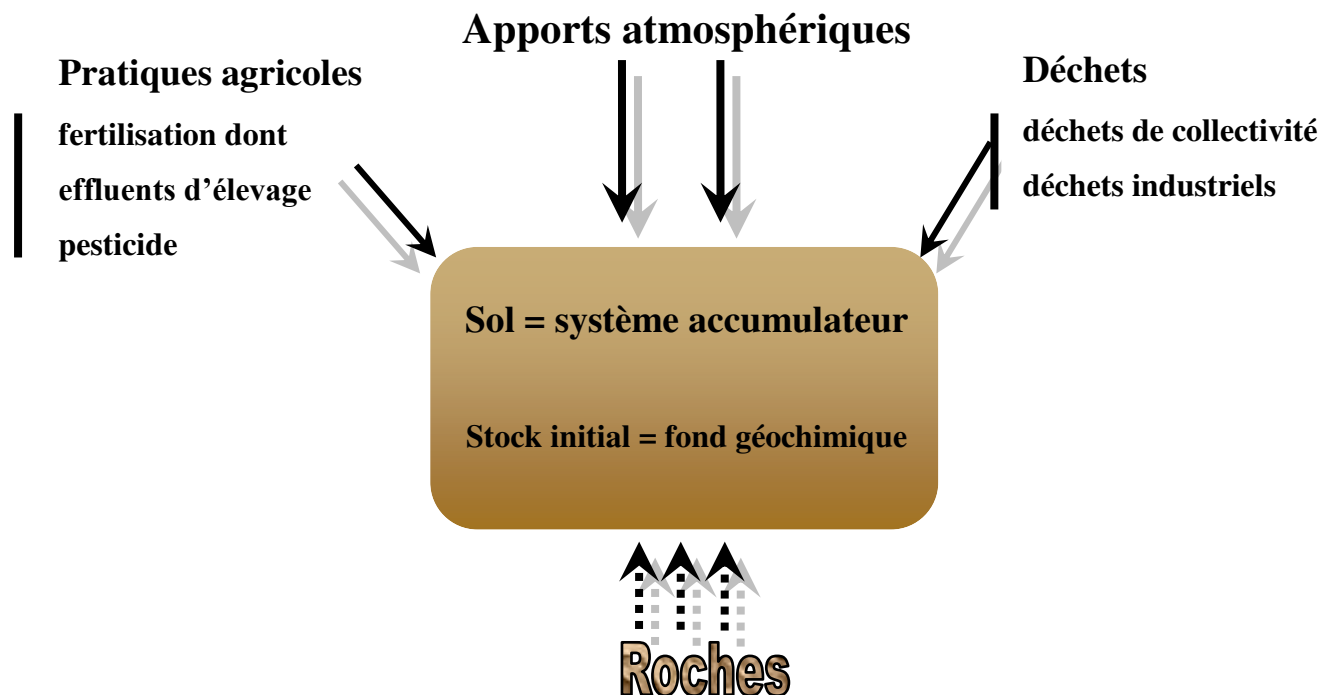


Figure 4. Origine des éléments traces dans le sol (**Robert et Juste, 1999**).

III-2-1- Sources naturelles

Le fond géochimiques est par définition la teneur «naturelle ou originelle» en éléments en traces trouvée dans le sol en l'absence de tout processus d'apport ou d'exportation vers ou hors d'un site considéré. Elle dépend en premier lieu de la teneur dans la roche qui est à l'origine du sol, mais également des processus qui sont intervenus lors de la formation du sol, qui ont pu lessiver ou plus généralement concentrer l'élément en question (**Bourelier et Berthelin, 1998**).

Les métaux lourds, comme tout minerai (**Miquel, 2001**), sont présents naturellement à l'état de trace (**Alloway et Steinnes, 1999**). L'origine naturelle de métaux lourds est fonction du fond pédo-géochimique local et des apports de poussières et aérosols libérés dans l'atmosphère par l'activité volcanique, les embruns marins, (**Baize, 1997 ; Bert et Deram, 1999**), l'activité volcanique, les feux de forêts ou bien l'altération de la roche mère, etc. En dehors de ce bruit de fond géologique, on peut constater une présence importante dans le sol d'aluminium, de cadmium, de chrome, de nickel, de plomb, de zinc, etc. (**Alloway et Steinnes, 1999**). L'agent courant de l'altération des minéraux (**Pedro et Delmas, 1970**) primaires et secondaires comme les argiles, oxydes et carbonates (**Alloway, 1995 ; Baize, 1997 ; Abou Auda et al., 2002 ; Baize et teracé, 2002 ; Wenzel et al., 2003 ; He et al., 2005**) et des roches de surface est constitué par l'eau pluviale (**Pedro et Delmas, 1970**). La composition chimique de la roche-mère va influencer la richesse future du sol en métaux (**Baize, 1997 ; Bert et Deram, 1999**).

III-2-2- Sources anthropiques

La plus part des métaux lourds sont des oligo-éléments constituants naturels du sol. Mais ils peuvent avoir aussi des origines anthropiques, représentent ainsi la majeure partie des composés impliqués dans la pollution du sol (**Lukkari et al., 2005**). Ce type de contamination ne peut être totalement évité : elle est la conséquence d'apports involontaires (émissions atmosphériques industrielles, par exemple) ou d'impuretés indésirables dans les apports volontaires (éléments trace métallique (ETM) dans les engrais minéraux, par exemple) (**Pereira et Sonnet, 2007**).

Les origines anthropiques des métaux sont diverses (**Di Benedetto, 1997**), il existe deux types de contamination suite aux apports en métaux lourds (**Figure 5**) :

- **Les Contaminations locales**, qui touchent une aire relativement faible et sont dues à une ou plusieurs source(s) bien identifiée(s) et souvent très proches(s) (quelques mètres à quelques kilomètres). Il s'agit généralement d'apports massifs, souvent associés aux exploitations minières, aux installations industrielles et à d'autres installations, tant en cours d'exploitation qu'après leur fermeture (**Pereira et Sonnet, 2007**) ; Cette contamination par les métaux lourds provient principalement de hauts fourneaux, de raffineries, d'usines de production, de véhicules, de mines métallifères, d'industries de la céramique (plomb et cadmium), de tanneries pour le cuir (chromates), des centrales électriques utilisant du lignite, d'industries de l'aluminium, et d'industries électroniques et métallurgiques. Certains métaux lourds peuvent précipiter dans les vidanges d'égouts qui peuvent par conséquent en contenir une teneur assez importante (**Iretskaya et Chien, 1999**).

- **Les Contaminations diffuses**, qui affectent tous les sols, plus ou moins faiblement mais de manière généralisée. Ce type de contamination résulte principalement de dépôts atmosphériques qui ne peuvent pas être liés à une ou plusieurs source(s) ponctuelle(s) identifiable(s) et des pratiques agricoles et horticoles (épandage d'engrais, d'amendements, de boues de station d'épuration, traitements phytosanitaires, etc.) (Pereira et Sonnet, 2007) ; On les retrouve principalement dans les eaux usées industrielles et municipales (Cd, Cu, Pb et Zn), les précipitations atmosphériques, et les eaux provenant de l'activité agricole (Hg, Cu et Pb) (Lebohec et Gîraud, 1999).

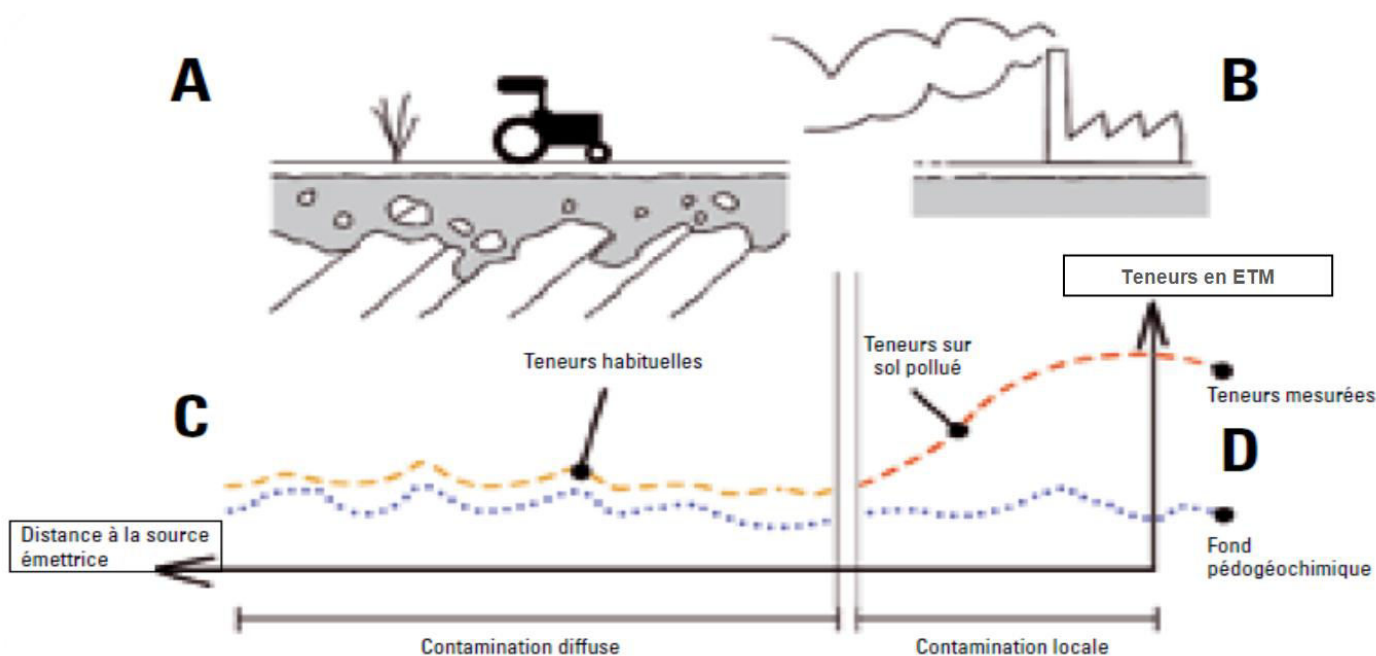


Figure 5. Contamination diffuse et locale (Pereira et Sonnet, 2007).

- A:** la coupe représente l'exemple d'un sol qui s'est formé à partir d'un substrat géologique (en grisé) ;
B: sur ce même sol, présence d'une source d'émission massive de polluants ;
C: en pointillé bleu : les teneurs naturelles en éléments issues du fond pédogéochimique, en l'absence de contamination diffuse. En tirets orange : les teneurs habituelles mesurées dans le sol, sans que l'on ait décelé l'influence d'une contamination locale ;
D: en tirets rouges, les teneurs mesurées sont qualifiées de teneurs sur sol pollué parce qu'elles correspondent à un niveau élevé de contamination locale du sol.

III-3- Toxicité des métaux lourds

Les métaux lourds sont présents dans la nature et leur caractéristique commune est leur toxicité. Cette toxicité est renforcée par un phénomène de concentration qu'on appelle la bioaccumulation ou bioamplification. La bioaccumulation est le processus d'assimilation et de concentration des métaux lourds dans l'organisme (**Miquel, 2001**).

La toxicité étant croissante de la classe A à la classe B, et le terme «métaux lourds» désignant les métaux et métalloïdes toxiques indépendamment de leur densité (**Biocchi, 1998**).

Certains de ces éléments, présents à l'état de trace, sont essentiels pour les organismes vivants (Cu, Zn, Co, Fe, Mn, Ni, Cr, Mo, Se et Sn), mais l'augmentation de leur concentration peut aboutir à des phénomènes de toxicité. D'autres éléments ne produisent que des effets néfastes (Pb, Hg et Cd) (**Bonnet et al., 2000**). La toxicité des métaux lourds vis-à-vis des organismes vivants dépend de leur nature, la concentration, le mode d'action, la spéciation et de leur biodisponibilité (**Alzieu, 1999 ; Bonnet et al., 2000**).

Selon **Picot (2003)**, ces éléments toxiques ont été rassemblés sous le nom de « métaux lourds » car ils possèdent des propriétés communes:

- ⊕ Grande affinité pour le soufre ;
- ⊕ Forte bioaccumulation dans les chaînes alimentaires ;
- ⊕ Importante toxicité pour de nombreux êtres vivants (microbes, plantes, animaux et Homme).

III-3-1- Effets sur la santé humaine

Les métaux lourds font partie des éléments toxiques pour la santé qui passent des champs vers les eaux des écosystèmes (**Lebohec et Gîraud, 1999**). Beaucoup d'entre eux se trouvent dans l'air sous une forme inhalable par l'Homme et peuvent être à l'origine d'une contamination par la voie respiratoire (**Rondeau, 1972**).

Cependant, dans certaines régions durement touchées par la pollution, les aliments cultivés sur place renferment parfois de grandes quantités de contaminants toxiques (**Bellows, 1999**), ils peuvent donc représenter un danger grave pour l'alimentation humaine puisque certains métaux lourds, tels que le plomb, le cadmium et le mercure, ont été reconnus comme étant potentiellement toxiques au-delà de valeurs limites spécifiques (**Becker et Kumplainen, 1991**).

Lock (2000), considère que ces effets chroniques sur la santé pouvant résulter de la consommation de très faibles quantités de métaux lourds pendant de longues périodes. L'ingestion de métaux lourds est potentiellement pathogène pour l'Homme (**Berland et Lassus, 1997**). Les maladies chroniques ont été associées aux résidus se trouvant dans les aliments du fait de la concentration en substances agrochimiques de la chaîne alimentaire, et plus particulièrement dans les légumes, la viande rouge, la volaille et les œufs. Des résidus peuvent être présents également dans le lait humain (**Iretskaya et Chien, 1999**).

Pour être incorporés par les organismes vivants, végétaux ou animaux, les métaux lourds doivent traverser les membranes cellulaires, ainsi que la barrière intestinale dans le cas des animaux. C'est sous forme d'ions ou de composés métalliques que les transferts ont lieu. Parce que la solubilité des métaux dépend du pH, leur incorporation par les organismes augmente avec l'acidité du milieu (**Blaize, 1997**), ces composés métalliques s'accumulent dans les cellules, où ils s'avèrent toxiques à terme (**Berland et Lassus, 1997**) ; ces polluants majeurs de l'environnement sont considérés d'être cytotoxiques (**Hadjiliadis, 1997**) carcinogènes et mutagènes (**Iretskaya et Chien, 1999**). Il a également été prouvé, par de nombreuses recherches et expériences, que les métaux lourds peuvent contribuer à des pathologies immunologiques telles que la sclérose en plaques ou d'autres défauts du système immunitaire (inflammations chroniques, effets immunosuppresseurs et allergies). Ils ont aussi tendance à perturber les systèmes reproducteur et endocrinien (comprenant tous les organes/glandes possédant une fonction de sécrétion d'hormones). Des effets neurotoxiques surviennent directement quand les métaux lourds franchissent la barrière encéphalique, provoquant des atteintes du système nerveux central telles que les maladies de Parkinson et d'Alzheimer et, chez le fœtus, un dérèglement du développement cérébral (**Kyung-Min Lim et al., 2010**).

III-3-2- Effets sur les végétaux

Naturellement présents à très faible concentration dans les tissus vivants, les métaux jouent un rôle important dans le métabolisme et selon leur concentration, ils sont considérés comme des éléments toxiques ou nécessaires (**Shallari, 1997**).

Parmi l'ensemble des métaux lourds, une vingtaine d'entre eux sont indispensables aux processus physiologiques majeurs, en particulier la respiration, la photosynthèse ou l'assimilation des macronutriments (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**). Ils jouent ainsi un rôle d'accepteurs ou de donateurs d'électrons, très important dans les multiples systèmes enzymatiques mettant en jeu des réactions d'oxydoréduction (**Chaignon, 2001**). Nombre de ces métaux, Cu, Zn, Ni, Fe, Co, Se et Ba sont aussi impliqués au niveau de processus moléculaires tels que le contrôle de l'expression des

gènes ; la biosynthèse des protéines, des acides nucléiques, des substances de croissance, de la chlorophylle et des métabolites secondaires ; le métabolisme lipidique ou la tolérance au stress (**Rengel, 1999**). Cependant, des quantités excessives de métaux lourds dans ces plantes affaiblissent non seulement leurs propriétés alimentaires, mais nuisent aussi à la production (**Kozłowski et al., 2003**).

Les plantes, comme les invertébrés, réagissent de façon différente selon les variétés. Certaines sont peu ou pas tolérantes et meurent au contact des métaux lourds. D'autres ont des réactions de défense, et freinent l'absorption en sécrétant des acides qui vont augmenter le pH et par conséquent réduire la mobilité des éléments traces (**Miquel, 2001**),

D'autres enfin, sont tolérantes aux métaux, qui ont la propriété d'accumuler de très grandes quantités de métaux dans leurs tissus. On dit alors de ces plantes (**Cunningham et Ow, 1996**), « hyperaccumulatrices » absorbent et accumulent en grande quantité des ions métalliques dont certains, comme l'arsenic (As) ou le cadmium (Cd), n'ont pas d'utilité apparente pour la plante (**Xiong, 1997 ; Zhu et al., 1999 ; Baroni et al., 2000 ; Piechalak et al., 2002 ; Zhang et al., 2002**).

Parmi les végétaux tolérants, il est possible de caractériser trois grands types différents de stratégies vis-à-vis des contaminants métalliques, basées sur les rapports entre les teneurs en métaux lourds du sol et celles des organes aériens des plantes considérées (**Baker, 1981**). On définit alors :

Les accumulateurs pour lesquels les métaux sont concentrés, souvent préférentiellement dans les parties aériennes, quelle que soit la concentration métallique dans le sol.

Les excluders qui présentent une faible concentration foliaire, maintenue constante par régulation du transport depuis les racines tant que la concentration dans le sol reste relativement peu élevée. Dans le cas contraire, le mécanisme de régulation est dépassé et une accumulation importante a lieu entraînant la mort de l'individu.

Les indicateurs ne présentent aucun contrôle de la translocation. Par conséquent, les concentrations racinaires et foliaires sont en équilibre, et proportionnelles aux teneurs du sol. C'est le cas, par exemple, du pissenlit (*Taraxacum officinale*) qui accumule divers métaux lourds en fonction de la pollution environnementale (**Kuleff et Djingova, 1984**).

Ces stratégies d'adaptation semblent entraîner souvent une contrepartie pour les plantes, que l'on appelle «le coût de la tolérance» (**Antonovics et al., 1971 ; Baker, 1987 ; Macnair, 1993**). Elles présentent souvent un aspect plus frêle et leur croissance normale paraît devenir metallodépendante (**Antonovics et al., 1971**). Par conséquent, ces écotypes tolérants apparaissent souvent moins compétitifs, face aux «plantes normales», et semblent inféodés aux milieux contaminés, incapables de s'étendre aux terrains alentours.

Les plantes capables de prélever les métaux lourds de sols contaminés offrent la possibilité de nettoyer les sites contaminés par ces métaux lourds. Les plantes agissent alors comme des pompes solaires, qui peuvent extraire et concentrer certains métaux présents dans l'environnement (Nehnevajova, 2006), donc les plantes sont utilisables de différentes manières pour dépolluer biologiquement les milieux souillés (Vavasseur *et al.*, 2003). La phytoremédiation s'effectue de façon naturelle par les plantes survivant dans l'eau et les sols contaminés (Alleman, et Leeson, 1997), ces contaminants toxiques s'accumulent souvent dans les parties comestibles de ces usines agricoles et entrent dans de ce fait la chaîne alimentaire humaine (Diego *et al.*, 2004). Certaines plantes peuvent accumuler jusqu'à 1,5% de leur poids sec dans leurs parties aériennes en polluants aussi variés que le plomb, les produits pétroliers et les composés chlorés (Watanabe, 1997).

III-3-2- Effets sur l'environnement

Nous assistons impuissants a une mondialisation sans cesse croissante des problèmes liés a environnement. La production agricole moderne, l'industrie propre, le développement des biotechnologies, en dépit des confort qu'ils nous apportent (Benabdeli et Benmansour, 1998), ont augmenté les concentrations des polluants élémentaires dans l'environnement (Schneegurt *et al.*, 2001). Cependant, la contamination diffuse de grandes étendues de la terre (Barceló, 1989).

La contribution de l'Homme à la mise en circulation des éléments traces métalliques et leur dissémination dans l'environnement sont très variables et dépend des métaux et des voies de rejets. La répartition entre les différentes sources s'établit comme suit : (Tableau 4) d'après (Miquel, 2001).

Tableau 4. Etude de transfert des ETM vers le sol et les plantes (Miquel, 2001).

Elément	Cuivre	Zinc	Cadmium	Plomb
Total (milliers de tonnes)	216	760	20	382
Déchets agricoles	55%	61%	20%	12%
Déchets urbains	28%	20%	38%	19%
Engrais	1%	1%	2%	1%
Retombées atmosphériques	16%	18%	40%	68%

Les métaux lourds restent dans l'environnement et leur spéciation et biodisponibilité pourra changer à travers le temps (Kamnev et Van der Lelie, 2000).

III-3-2-1- Pollution des sols

Situé à l'interface entre l'eau l'atmosphère et les végétaux, le sol assure de nombreuses fonctions : des fonctions économiques, écologiques et biologiques (**Ablain, 2002**) ; c'est l'un des éléments essentiels des écosystèmes naturels et agricoles. Sa contamination par des métaux ou d'autres éléments traces engendre donc des risques pour ces écosystèmes (**Schwartz et al., 1999**), la contamination des sols constitue un enjeu fondamental non seulement parce qu'il affecte notre environnement proche, mais aussi et surtout parce que l'enjeu de la pollution des sols n'est ni plus ni moins que l'alimentation en eau potable (**Miquel, 2001**).

Les métaux peuvent être soit fixés dans les roches et les sédiments, soit mobiles. Dans le premier cas, les quantités disponibles sont infimes et ils n'ont aucune signification sur l'environnement. Mais lorsque les conditions changent de telle manière que les métaux redeviennent solubles, l'augmentation de la concentration devient alors une menace directe pour l'environnement du fait de l'augmentation de leur disponibilité pour les plantes. En outre, depuis quelques années, les pluies acides augmentent la mobilité des métaux dans le sol et causent donc une augmentation de leur concentration dans les produits agricoles (**Di Benedetto, 1997**).

Les causes principales de pollution du sol par les métaux lourds (notamment le plomb, le cadmium, le chrome, le zinc, le cuivre, le nickel, le mercure, le manganèse, le sélénium et l'arsenic) sont l'irrigation par des cours d'eaux et des eaux usées contaminés par les industries, l'introduction de déchets solides contaminés et l'utilisation de terrains utilisés auparavant à des fins industrielles, contaminés par des flaques de pétrole et des déchets industriels (**Iretskaya et Chien, 1999**).

La concentration critique du sol est définie comme étant la valeur au-dessus de laquelle la toxicité est possible, **Kabata-Pendias et Pendias (1984)**, considèrent que les valeurs au-dessus desquelles le sol est critique sont les suivantes : 8 mg.kg⁻¹ (Cd), 125 mg.kg⁻¹ (Cu) et 400 mg.kg⁻¹ pour le Pb et le Zn.

Des travaux ont montré que la contamination métallique à la surface des sols est associée à un cocktail de contaminants plutôt qu'un seul métal. Ainsi, le concept d'un index de pollution a été introduit dans plusieurs études pour identifier une contamination multiéléments aboutissant à une augmentation de la toxicité des sols par l'assemblage de plusieurs métaux (**Nimick et Moor, 1991 ; Jung, 1995 ; Chon et al., 1998**).

La quantité de métaux lourds s'accumulant dans le sol dépend de la contribution de chaque source de pollution, de " l'efficacité " du transport du polluant du site de production à la zone contaminée et de la capacité de rétention du sol par rapport aux métaux lourds (**Alloway et Steinnes, 1999**), leur présence dans les sols modifie considérablement la composition floristique

des sites, ne permettant l'installation que d'un nombre limité d'espèces supportant leur toxicité (**Antonovics et al., 1971 ; Gartside et McNeilly, 1974**). Lorsqu'ils sont en excès, les métaux peuvent agir sur les propriétés biochimiques du sol, perturber la physiologie des plantes et contaminer les chaînes alimentaires (**Shallari, 1997**).

La présence des métaux peut changer les relations entre les différents éléments du sol (antagonismes ou synergies), au niveau de la rhizosphère, et perturber l'alimentation des plantes (**Chon et al., 1998**).

Il existe des facteurs prépondérants lors de la mobilisation des métaux dans le sol par les plantes. La biodisponibilité d'un polluant métallique pour les plantes dépend de (**Edwards, 1986**):

- ⊕ la spéciation du métal dans le sol ;
- ⊕ les caractéristiques physico-chimiques du sol : pH, température et aération ;
- ⊕ la présence et l'activité des organismes biologiques ;
- ⊕ les amendements et pratiques culturales.

III-3-2-1-1-Paramètres physico-chimiques influençant la mobilité des métaux dans le sol

La mobilité des éléments traces jouent un rôle majeur dans les transferts des éléments traces dans les sols ; cette mobilité (**Fageria et al., 2002 ; Hough et al., 2003 ; Tazisong et al., 2004**) est régie par différentes réactions d'origine abiotiques et biotiques : solubilisation /insolubilisation, adsorption/désorption, mécanismes de mobilisation/immobilisation des métaux par dissolution/précipitation, dispersion/floculation. Les paramètres édaphiques qui régissent ces réactions sont : les conditions acido-basiques, d'oxydoréduction, la présence et la nature de ligands organiques et minéraux, la présence et la nature des colloïdes minéraux et organiques, la présence et l'activité des microorganismes (**Hesterberg, 1998 ; Berthelin et Leyval, 2000**) (**Tableau 5**).

Il existe de multiples paramètres influençant la mobilité des métaux dans les sols dont les plus importants sont (**Colinet, 2003**) :

1. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH constitue un facteur dont le rôle est crucial pour la mobilité des ions métalliques, car il influence le nombre de charges négatives pouvant être mises en solution (**McLaughlin et al., 2000**). Les protons proviennent majoritairement de la respiration végétale et microbienne, ainsi que de l'oxydation des sulfures. A l'inverse, ils sont consommés par l'hydrolyse des minéraux altérables. D'une façon générale, lorsque le pH augmente, les cations sont moins solubles et les anions sont plus solubles (**Blanchard, 2000**).

La diminution du pH favorise la mobilité de la plupart des métaux par la mise en solution des sels métalliques ou la destruction de la phase de rétention. De plus, l'augmentation de pH induit souvent la formation d'espèces précipitées qui peuvent limiter la solubilité et la biodisponibilité de toutes les espèces ioniques (**Deneux-Mustin et al., 2003**). Cependant, elle entraîne également la dissolution de matières organiques et la formation consécutive de complexes organo-métalliques plus solubles (**Chaignon, 2001**). Les variations de pH ont donc des conséquences complexes et parfois contraires sur la mobilité des métaux lourds, en particulier en présence de ligands organiques et inorganiques (**Remon, 2006**).

2. Potentiel d'oxydoréduction (Eh)

Le potentiel redox (Eh) permet de caractériser les échanges d'électrons entre les espèces chimiques (**Deneux-Mustin et al., 2003**) ; en conditions réduites, la mobilité des métaux lourds est plus faible. Le potentiel redox est fortement lié au pH (**Alloway, 1995**). Bien que l'influence des conditions oxydoréductrices du sol semble très importante au regard de la mobilité des éléments métalliques, il n'en demeure pas moins que ce facteur apparaît souvent comme secondaire par rapport au pH. En effet, pour un sol donné l'Eh varie en fonction inverse du pH, il augmente quand le pH diminue (**Deneux-Mustin et al., 2003**), en conséquence de quoi l'influence des conditions oxydoréductrices apparaît souvent comme secondaire par rapport au pH. De plus, il est relativement difficile d'interpréter les valeurs obtenues. En raison du nombre important des couples redox et de la cinétique des réactions (**Lespagnol, 2003**), l'influence du potentiel redox est souvent difficile à comprendre.

Le potentiel redox dépend aussi du degré d'aération du sol, des pratiques culturales et des conditions climatiques. En conditions anoxiques, les composés ferriques et manganiques sont plus solubles et libèrent les métaux qui leurs sont associés. En revanche en conditions aérobies, les oxydes de Fe et Mn étant peu solubles, ils immobilisent les métaux (**Deneux-Mustin et al., 2003**).

De plus, la modification du degré d'oxydation des ligands ou des éléments se liant avec le métal influence indirectement la solubilité des métaux lourds. En conditions réductrices, les sulfates sont réduits en sulfures qui piègent volontiers les éléments chalcophiles tels que Fe, Zn, Pb et Cd (**Deneux-Mustin et al., 2003**). D'autre part, la dissolution des (hydro)oxydes est favorisée entraînant de manière opposée la solubilisation des métaux associés (**Chaignon, 2001**).

Tableau 5. Influence des propriétés du sol sur la mobilité des métaux (Berthelin et Leyval, 2000).

Propriétés du sol	Effets fondamentaux	Effets sur la mobilité
pH faible	➤ Diminution de l'adsorption des cations;	↗
	➤ Augmentation de l'adsorption des anions sur les oxydes d'Al, Fe, Mn.	↘
pH élevé	➤ Augmentation de la précipitation des cations sous forme de carbonates et hydroxydes ;	↘
	➤ Augmentation de l'adsorption des anions sur les oxydes métalliques ; ➤ Augmentation de l'adsorption des cations par des composés humiques.	
Potentiel redox	➤ Augmentation de la complexation de certains cations par des ligands solubles ;	↗
	➤ Diminution de l'adsorption des anions.	
Présence de ligands organiques et minéraux en solution	➤ Diminution de la solubilité à faible Eh sous forme de sulfure, si présence de sulfates ;	↘
	➤ Augmentation de la solubilité des oxydes divalents comparativement aux trivalents.	↗
Présence de ligands organiques et minéraux en solution	➤ Augmentation de la solubilité des métaux.	↗
Teneurs élevées en argile	➤ Augmentation de l'échange d'ions pour les cations en traces.	↘
Présence d'oxydes d'Al, Fe et Mn	➤ Augmentation de l'adsorption des cations métalliques traces avec l'augmentation du pH ;	↘
	➤ Augmentation de l'adsorption des anions traces avec la diminution du pH.	

3. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique de la fraction solide est fonction de l'importance et de la distribution des charges dans sa structure, des cations adsorbés et de la nature des cations remplaçant. La surface spécifique est inversement proportionnelle aux diamètres des particules (Bonnet *et al.*, 2000). La teneur en argiles et en matière organique procurent aux sédiments la capacité d'échange cationique (Laing, 2002).

Les métaux lourds ont une grande affinité avec la fraction argileuse du sol ainsi qu'avec d'autres phases minérales comme les oxydes de fer, d'aluminium, de manganèse ou les phosphates, les carbonates, etc. La présence de ces éléments favorise l'immobilisation des métaux lourds. En effet, ils possèdent une charge électro négative qui leur permet de contracter des liaisons réversibles avec, notamment, les cations métalliques, qui restent échangeables. La capacité d'échange ionique minérale joue un rôle plus important dans la fixation que la matière organique (**Impens et al., 1991; Alloway, 1995**).

4. Matière organique

La matière organique joue aussi un rôle majeur dans la répartition des métaux entre elle et la solution du sol et par conséquent dans le contrôle de la disponibilité des métaux. Les composés organiques du sol ont en général une grande affinité pour les métaux du fait de la présence des groupements carboxyliques, phénoliques, alcooliques ou de ligands (**Alloway, 1995**). La présence d'acides humiques agit également comme un facteur important de rétention des métaux du sol (**Mühlbachova et al., 2004**). En effet, sous l'action d'agents chélatants et par leur grande affinité avec la matière organique, les métaux peuvent être complexés. Ils forment alors un complexe organométallique et sont immobilisés. Malgré l'immobilisation, il peut y avoir un phénomène de co-précipitation, c'est-à-dire la précipitation simultanée d'un agent chimique en conjonction avec la matière organique (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

5. Texture et la structure du sol

La texture et la structure du sol sont des facteurs intervenant dans la mobilité des métaux. Dans un sol structuré, la vitesse de l'eau et des composés solubles est plus grande que dans une matrice constituée de micropores. Le transport par les colloïdes du sol (particules d'argile, matière organique soluble, biomasse) peut augmenter la mobilité des métaux associés à ces solides (**Mills et al., 1991**).

6. Température

La température du sol dépend en premier lieu de la météorologie, et donc du climat, mais elle est également liée à l'activité biologique et influence rétroactivement la formation de complexes avec des ligands inorganiques, en modifiant l'activité de l'élément en solution (**Deneux-Mustin et al., 2003**). La température a un impact direct sur la mobilité des éléments métalliques en déplaçant les équilibres des réactions de dissolution - précipitation et co-précipitation, et un impact indirect, en modifiant la teneur en eau du sol, le pH ou l'Eh (**Remon, 2006**).

7. Pratiques culturelles

Les pratiques culturelles peuvent influencer la mobilité des métaux en modifiant les propriétés du sol et les conditions physico-chimiques, à la suite par exemple de l'apport de matière organique (boues chaulées ou non, composts, déjections animales, déchets divers) (**Lavado et al., 2001**). La nature et le mode d'application des fertilisants, la rotation des cultures et le labour jouent aussi un rôle important.

Plusieurs facteurs sont utilisés en pédologie pour décrire les transferts de métaux dans le sol dont le facteur de rétention (R_f) et le coefficient de distribution (K_d). R_f est le rapport entre la vitesse de diffusion effective et la vitesse de diffusion apparente des éléments. Il est lié à la teneur en matière organique, à la CEC, à la somme des bases échangeables et à la teneur en Ca échangeable (**Roehl et Czurda, 1998**). Le K_d , rapport de la concentration de l'élément adsorbé sur la phase solide à la concentration du même élément dans la phase soluble, est variable selon les éléments métalliques : $K_d(\text{Pb}) > K_d(\text{Cu}) > K_d(\text{Cd})$ (**Morera et al., 2001**).

III-3-2-2- Pollution des eaux

L'importance de l'eau dans les activités humaines ne cesse de croître et l'approvisionnement en eau douce devient de plus en plus difficile. La principale cause revient à l'accroissement de la pollution, au développement de l'industrie et de la perturbation du cycle de l'eau dans son ensemble par les activités humaines (**Mackenzie et Sball, 2000**).

L'eau est évidemment un élément particulièrement important pour les polluants en général et les métaux lourds en particulier car l'eau va entraîner des réactions chimiques liées à l'acidité, l'alcalinité, la température, l'oxygénation, etc. (**Miquel, 2001**).

La pollution de l'eau par les métaux lourds est un problème environnemental majeur dans notre monde moderne (**Salt et al., 1995**), l'industrie est responsable du quasi totalité des rejets de métaux lourds dans l'eau (**Miquel, 2001**).

D'autre part, les métaux lourds passent des champs vers les eaux des écosystèmes, on les retrouve principalement dans les eaux usées industrielles et municipales (Cd, Cu, Pb et Zn), les précipitations atmosphériques et les eaux provenant de l'activité agricole (Hg, Cu et Pb) (**Kozłowski et al., 2003**).

III-3-2-3- Pollution de l'air

Les principales sources de pollution de l'air et les plus importantes étant la production d'énergie électrique, l'industrie, l'automobile (**Gremion, 2003**) et l'entraînement de poussières de sol par le vent. Par ordre d'importance, les autres sources d'exposition ubiquitaire sont : l'activité volcanique, la décomposition végétale, les feux de forêts et les aérosols marins (**Pichard et al, 2005**). Les rejets atmosphériques sont principalement anthropiques (**Roels et al., 1976**).

Les principales sources de métaux dans l'air sont des sources fixes. De nombreux éléments se trouvent à l'état de traces dans des particules atmosphériques provenant de combustions à haute température, de fusions métallurgiques, des incinérateurs municipaux, des véhicules, etc. (**Di Benedetto, 1997**) ; une partie importante des métaux lourds émis par les activités humaines dans l'atmosphère retombe à proximité des points d'émission. Il s'en suit des concentrations le long des axes routiers dans les villes (plomb) et à proximité des centres industrielles (cadmium) (**Lebohec et Gîraud, 1999**).

Selon **Di Benedetto (1997)**, les effets biologiques, physiques et chimiques de ces particules sont fonction de la taille des particules, de leur concentration et de leur composition, le paramètre le plus effectif sur l'environnement étant leur taille. En outre, dans l'air ambiant, on trouve de nombreux éléments tels le plomb, le cadmium, le zinc, le cuivre dont la concentration est d'autant plus élevée que les particules sont fines.

Le cuivre est rejeté dans l'atmosphère sous forme particulaire d'oxyde, de sulfate ou de carbonate ou adsorbé à de la matière particulaire (**Dameron et Howe, 1998**).

La vitesse et la distance de redéposition dépendent des caractéristiques de la source, de la taille des particules et de la vitesse du vent.

Le dégagement de métaux lourds n'est que l'une des pollutions atmosphériques : il y en a d'autres : poussières, acides, composés chlorés tels que dioxine et furanes (**Miquel, 2001**).

IV- Contamination des sols par le Cr et le Pb

IV-1- Cas du chrome

Le chrome est un métal de transition, le 7^{ème} élément le plus abondant de la terre et le 21^{ème} de la croûte terrestre qui, sous forme trivalente, est un élément trace essentiel pour les humains et les animaux car impliqué dans le métabolisme des glucides (Alloway, 1995). D'après Juste *et al.*, (1995), le Cr est réputé comme présentant une très faible mobilité, qu'il ait une origine naturelle ou anthropique.

Les teneurs en Cr dans l'environnement varient de 10 à 50 mg/kg pour les sols, jusqu'à 125000 mg/kg pour les sols ultramafiques, de 0,1 à 117 µg/L pour les eaux douces et de 5.10^{-6} à $1,2.10^{-3}$ µg/m³ dans l'air (Adriano, 1986). La concentration moyenne du Cr dans l'écorce terrestre serait de 100 et 200 mg/kg selon les auteurs. Mais cette concentration varie grandement selon le type de roches. D'après Sittig (1975), le chrome représenterait 0,037 %. Les roches magmatiques ultrabasiqes (dunites, serpentine et péridote) sont connues pour être extrêmement riches en Cr (de l'ordre de 1500 à 3000 mg/kg). Dans le cas des roches sédimentaires, la teneur en Cr sera beaucoup tributaire de la teneur en fer et, éventuellement, de la présence de minéraux détritiques riches en Cr (augite et serpentine) (Baize, 1997). Le chrome est le plus souvent extrait de la chromite, minéral de type oxyde mixte : FeCr₂O₄ (Deneux-Mustin *et al.*, 2003). La production mondiale de Cr est de l'ordre de 10⁷ t/an, dont 60 à 70 % sont utilisées dans les alliages (notamment pour l'acier inoxydable), et 15 % dans les procédés industriels, principalement la tannerie du cuir, la production de pigments, les conservateurs du bois et l'électrolyse (Alloway, 1995 ; Barnhart, 1997). Le Cr est présent en tant qu'impureté dans les engrais potassiques et phosphorés avec des teneurs comprises entre 71 et 241 mg/kg selon l'origine des minerais (Al-Shawi et Dahl, 1999) ; l'industrie chimique, qui assure en majeure partie la fabrication des diverses combinaisons du chrome, dont la plus importante est le bichromate de sodium. Ces industries constituent les principales sources de pollution par le biais des rejets de leurs effluents, les fumées, etc. (Boloniaz et Bulinski, 1984 ; Kaminski et Landsberger, 2000 ; Adamo *et al.*, 2002).

Spéciation dans le sol Selon le pH et le potentiel redox du sol, le Cr peut être sous forme anionique ou cationique, sous forme trivalente (Cr³⁺ et CrO²⁻) ou hexavalente (Cr₂O₇²⁻ et CrO₄²⁻). La forme prédominante dans les sols est Cr(III) (Deneux-Mustin *et al.*, 2003), est considérée comme la forme la plus stable dans l'environnement (Abida, 2005) et n'est que faiblement absorbé (Douglas et Lee, 1972), le Cr(VI) étant présent dans les milieux fortement pollués en Cr et dans les eaux de surface ou souterraines (Deneux-Mustin *et al.*, 2003).

Dans un sol neutre alluvial contaminé par du Cr(III), la plupart du Cr est lié aux oxydes de Fe ou Mn et à la matière organique et seule une faible proportion est sous forme échangeable (**Bartlett, 1991**). D'après **Fendorf (1995)**, Le Cr(VI) est largement transformé en Cr(III) dans les sols et les sédiments (favorisé en conditions anaérobies et pH bas). Le Cr(III) est moins mobile que le Cr(VI) et est précipité en tant que $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}_x\text{Cr}_{(1-x)}(\text{OH})_3$ en conditions alcalines ou légèrement acides dans le sol, ce qui conduit à son immobilité (**Wittbrodt et Palmer, 1995**). Tandis que, le Cr(VI) serait mobile. Dans le milieu naturel, seuls les oxydes de manganèse seraient capables d'oxyder le Cr(III) en Cr(VI) (**Fendorf, 1995**). Cependant, certaines formes de Cr(III) peuvent être oxydées en Cr(VI) plus soluble par des oxydes de Mn (III ou IV) ou en présence d'un excès d' O_2 (**Cervantes et al., 2001**).

Le chrome peut être considéré comme un des éléments essentiels à la vie, car il intervient dans le métabolisme des végétaux (photosynthèse) (**Gaughofer, 1991**), sa toxicité vis-à-vis du règne végétal est rare dans les systèmes naturels. Certaines plantes poussent sur des sites hautement contaminés en chrome. Certains auteurs s'accordent à dire qu'il n'y a pas d'absorption du chrome par les végétaux ou seulement une absorption racinaire sans passage vers les autres parties de la plantes (**Losi et al., 1994**). Mais des études récente a montré que certaines plantes cultivée en milieu riche en chrome étaient capables d'accumuler et d'absorber des quantités importantes de chrome (**Eshghi Malayeri, 1995 ; Jean, 2007**). Habituellement, une quantité plus importante en chrome est observée dans les racines, plutôt que dans les feuilles. Tandis que, la concentration la plus faible se trouve dans les graines (**Kabata-Pendias et al., 1992**). Les essais montrent une meilleure translocation du chrome vers la tige à partir d'une solution de Cr(VI) qu'avec une solution de Cr(III). La capacité détoxifiante des plantes permet d'envisager leur utilisation pour la phytoremédiation des zones polluées au Cr(VI) (**Lytle et al., 1998**).

Le Cr est un élément toxique pour les plantes (**Zayed et Terry, 2003 ; Shanker et al., 2005**). Son effet toxique dépend de son degré d'oxydation, Cr(III) ou Cr(VI). En effet, **Kleiman et Cogliatti (1998)**, ont mis en évidence, lors de culture en hydroponie, que Cr(III) est toxique pour la navette (*Brassica napus*), le blé et le sarrasin uniquement à forte concentration, soit 26 mg.L^{-1} , tandis que Cr(VI) est toxique à des concentrations plus faibles, soit $0,52 \text{ mg.L}^{-1}$. La toxicité de Cr(VI) est due à son pouvoir oxydant mais aussi à la formation de radicaux libres lors de sa réduction en Cr(III) dans les cellules (**Chatterjee et Chatterjee, 2000 ; Shanker et al., 2005**). La toxicité de Cr(III), à forte concentration, est due essentiellement à sa capacité à se lier avec des composés organiques, ce qui conduit à une altération du métabolisme (inhibition de l'activité enzymatique). Cr(III) a également la capacité de générer des espèces possédant un oxygène actif, ce

qui conduit alors à un stress oxydatif (Mei *et al.*, 2002). Cette phytotoxicité peut être à l'origine de dommages au niveau des racines, d'une diminution de la croissance et d'une chlorose.

IV-2- Cas du plomb

Le plomb est le métal non ferreux le plus récupéré et recyclé (Di Benedetto, 1997), il est considéré comme l'un des métaux lourds les plus problématiques (Irtelli *et al.*, 2001). Il est présent dans divers minéraux, dont les plus importants sont la galène (PbS), la cérusite (PbCO₃) et l'anglésite (PbSO₄) (Pichard *et al.*, 2002). La concentration moyenne du Pb dans la croûte terrestre serait de l'ordre de 13 à 16mg/kg (Baize, 1997). Nriagu (1978), propose un certain nombre de valeurs moyennes pour différentes roches : Gabbro = 1,9 ; Andésite = 8,3 ; Granite = 22,7 ; Schiste = 23 ; Grès = 10 ; calcaire et dolomie = 71. Les schistes noirs riches en pyrites et en matières organiques seraient riches en Pb (30 mg/kg) (Baize, 1997).

Il est utilisé et rejeté sous différentes formes : Pb métallique (composants de batteries, munitions et soudure Pb-Sn), PbO (batteries, fumées d'incinération et fonderies), autres (peintures, additifs pour carburants, aciérie et pesticides) (Ruby *et al.*, 1999). Le Pb, principalement relargué au cours de l'incinération de combustibles fossiles et de déchets, peut se redéposer sur le sol. Les retombées atmosphériques contribuent ainsi à 68% de l'enrichissement moyen annuel en Pb des sols dont la concentration moyenne dans les sols agricoles est de 64,8 mg/kg de sol (Miquel, 2001).

Une fois dans l'environnement, le Pb est principalement lié à la matière organique, aux oxydes de Fe et Mn et aux argiles (Chlopecka et Adriano, 1997 ; Dong *et al.*, 2000). Les valences principales de Pb dans le sol sont II et IV et les ions PbII et Pb(OH)⁺ prédominent dans la solution de sol (Ruby *et al.*, 1999). Le Pb est très peu disponible dans le sol, la concentration des formes solubles étant en moyenne de 10-8,5 M et les fractions échangeables et liées aux carbonates étant généralement inférieures à 3,5 % de la teneur totale en Pb (Adriano, 1986).

Le pH et la concentration en phosphates sont des paramètres importants régissant la mobilité du Pb (Sauve *et al.*, 1997). La mobilité du plomb dans le sol est très faible, il a ainsi tendance à s'accumuler dans les horizons de surface (et plus précisément dans les horizons riches en matière organique). Cela s'explique par la grande affinité de la matière organique vis à vis du plomb (Adriano, 1986). Les facteurs affectant la mobilité et la biodisponibilité du plomb dans les sols sont donc, la texture du sol (surtout la teneur en argile), la teneur en matière organique (Juste *et al.*, 1995), et le pH du sol est aussi un facteur très important à considérer parce qu'il contrôle la solubilité des métaux dans le sol (Mazoyer et François, 1998). Selon Denaeyer-De Smet et Duvigneaud (1974), une texture légère et un pH acide (4,1 à 4,3) provoqueraient un lessivage important et une contamination en profondeur. Il a été montré que l'adsorption du Pb dans le sol

augmente quand le pH augmente et que des hydroxydes métalliques peuvent se former, tel que $Pb(OH)_2$ (Pierangeli *et al.*, 2001 ; Martinez-Villegas *et al.*, 2004). En présence de phosphates, le Pb précipite sous forme d'hydroxyapatite de plomb $[Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ ou floccule en chloropyromorphite $[Pb_5(PO_4)_3Cl]$ relativement insoluble. Ce dernier complexe peut être déstabilisé par la présence de matière organique dissoute et suite à des variations de pH (Lang et Kaupenjohann, 2001).

Bien que le Pb soit dans le sol un élément très peu soluble, il peut s'accumuler dans les racines (Kabata-Pendias et Pendias, 1992) et est rapidement immobilisé dans les vacuoles des cellules racinaires ou retenu par les parois des cellules de l'endoderme. Son accumulation depuis le sol est assez limitée (Alloway, 1995). Le phénomène de translocation vers les parties aériennes des plantes est faible. Ce qui fait que le Pb n'est pas un toxique systématique en ce sens qu'il ne diffuse pas dans le système vasculaire de la plante, son absorption racinaire n'est effective qu'au-delà de 1000 ppm dans le sol, elle dépend entre autres facteurs de la concentration totale dans le sol, de la concentration dans la solution du sol et de la spéciation (Kabata -Pendias et Pendias, 1992).

Une fois pénétrée dans le système racinaire, la très grande majorité du plomb va y rester (Huang et Cunningham, 1996 ; Huang *et al.*, 1997). Bien qu'il existe quelques espèces capables de transférer de grandes quantités de ce métal vers les parties aériennes, la racine agit comme une barrière très efficace contre les mouvements du plomb à l'intérieur de la plante. Ce phénomène de barrière n'est pas commun à tous les ETM, et son intensité est très spécifique au plomb (Bertrand, 2008).

Les plantes cultivées dans un milieu contaminé par le Pb présentent un ralentissement de leur développement et une inhibition de la croissance des racines et des parties aériennes (Ernst, 1998 ; Seregin et Ivanov, 2001 ; Belarbi, 2008). Le ralentissement de la croissance racinaire par le Pb, et les métaux lourds en général (Pottersetal, 2007), peut résulter d'une inhibition de la division cellulaire (Wierzbicka, 1989 ; Wozny et Jerczynska, 1991 ; Eun *et al.*, 2000) et de l'élongation des cellules (Seregin et Ivanov, 1997 ; Obroucheva *et al.*, 1998 ; Malkowski *et al.*, 2002). Le plomb peut aussi causer des effets graves sur la sensation des métaux. L'accumulation du plomb peut réduire la concentration de chlorophylle, le fer, l'activité de la réaction de Hill, l'activité des catalases, tandis que augmente la concentration des produits phosphorés, l'activité peroxydases, la phosphatase acide et les ribonucléases dans les feuilles du radis (Gopal et Reizvi, 2008).

I- Phyto-dépollution

I-1- Principes de la phyto-dépollution

La phyto-dépollution est une technologie de dépollution qui semble efficace pour un large spectre de polluants organiques et inorganiques. Elle peut être utilisée sur des substrats solides, liquides ou gazeux (**Pilon-Smits, 2005**).

Les plantes peuvent être utilisées comme un filtre à air, en intérieur ou en extérieur, elles absorbent des polluants comme le SO₂, le CO₂, l'ozone, les mauvaises odeurs ou encore les hydrocarbures volatils halogénés (**Jeffers et al., 1998**) ; Dans le cas des substrats solides ou liquides, la dépollution est envisagée pour des produits organiques (HAP, pesticides, explosifs, produits pharmaceutiques) mais aussi des métaux lourds (plomb, cuivre, zinc, etc.) et des radionucléides.

Les plantes étant des organismes photo-Autotrophiques, elles utilisent la photosynthèse pour fixer le dioxyde de carbone qui servira ensuite de source d'énergie et de carbone. Ainsi, elles ne dépendent pas de composés organiques pour leur survie. Elles ne possèdent sans doute pas un très large spectre d'enzymes spécialisées dans la dégradation de composés exogènes (**Komofoa et al., 1995**). Toutefois, lors de la détoxification des xénobiotiques, ces derniers remplacent les substrats naturels d'enzymes impliquées dans le métabolisme secondaire (**Jeffers et al., 1998**). De rares plantes qui se développent sur des sols pauvres en nutriments semblent être capables d'utiliser des contaminants organiques en nutriments pour subsister (**Meagher, 2001**).

Les plantes peuvent agir de façon directe en absorbant le polluant ou de façon indirecte en activant sa dégradation dans la rhizosphère. Cette technologie émergente et prometteuse peut être appliquée aux métaux, aux hydrocarbures, aux pesticides, aux composés nitro-Aromatiques et aux solvants chlorés (**Susarla et al., 2002**).

II- Définitions et généralités de la phytoremédiation

L'étymologie de la phytoremédiation est le grec "phyto" (la plante) et le latin "remedium" (corriger un méfait). **Bert et al. (2000)**, définissent La phytoremédiation comme étant l'utilisation de plantes chlorophylliennes et de leurs microbiotes associés pour éliminer, contenir ou rendre moins toxiques les contamineurs environnementaux.

La Phytoremediation est un processus physiologique (**Baker et al., 2000; Karenlampi et al., 2000 ; Meagher, 2000 ; Salt et Kramer, 2000 ; Clemens et al., 2002; Pilon-Smits et Pilon, 2002; Pollard et al., 2002**), de décontamination des sols et des eaux souillés par des polluants (**Dabouineau et al., 2005**), définie comme l'utilisation de certain végétaux pour leurs capacité de (**Watanabe, 1997**), réduire, enlevez, dégradez, ou immobilisez des toxines de l'environnement (**Wendy et al., 2005**), tel que les métaux lourds, les hydrocarbures ou les composés radioactifs (**Dabouineau et al., 2005**).

L'utilisation des végétaux supérieurs a un double intérêt : en plus de leur action directe sur la dépollution des sols, ils permettent de créer un environnement physico-chimique favorable au développement de la microflore tellurique (bactéries et champignons) capable de désintoxiquer les polluants présents dans les sols (**Horne, 2000**).

II-1- Mécanismes de phytoremédiation

L'action des plantes sur le polluant intervient à différents niveaux. Les polluants peuvent être stabilisés ou dégradés dans la rhizosphère, séquestrés ou dégradés ou encore rendus volatiles et éliminés dans l'air environnant. Divers mécanismes sont mis en oeuvre en fonction de la nature du polluant et de ses caractéristiques physico-chimiques (**McCutcheon et Schnoor, 2003; Pilon-Smits, 2005**).

La phytoremédiation regroupe différentes méthodes qui sont appliquées selon la contamination et les objectifs de remédiation (**Brooks, 1998 ; Bert et al., 2000**), qui peuvent mener à la dégradation du contaminant, enlèvement (par accumulation ou dissipation), ou immobilisation (**Bruce Pivetz, 2001**). Actuellement, la phytoremédiation se divise en cinq domaines d'application différents (**Pulford et Watson, 2003 ; Vavasseur et al., 2003**) :

La phyto-extraction, la phyto-transformation, la rhizo-dégradation, la phytostabilisation (**Figure 6**) et la Phyto-volatilisation.

Cette classification permet de limiter la multiplication de terminologies définissant spécifiquement les différents mécanismes de la phyto-dépollution tels que la bioconcentration, la phyto-assimilation, la phyto-oxydation, la phyto-évaporation, la phyto-séquestration, la dendrorémédiation (utilisation d'arbres pour la phyto-dépollution) (**Schoenmuth et Pestemer, 2004**), ou d'autres termes définissant plus précisément les processus comme la phytophotolyse (activation de la photolyse par l'absorption par la plante) (**Just et Schnoor, 2004**).

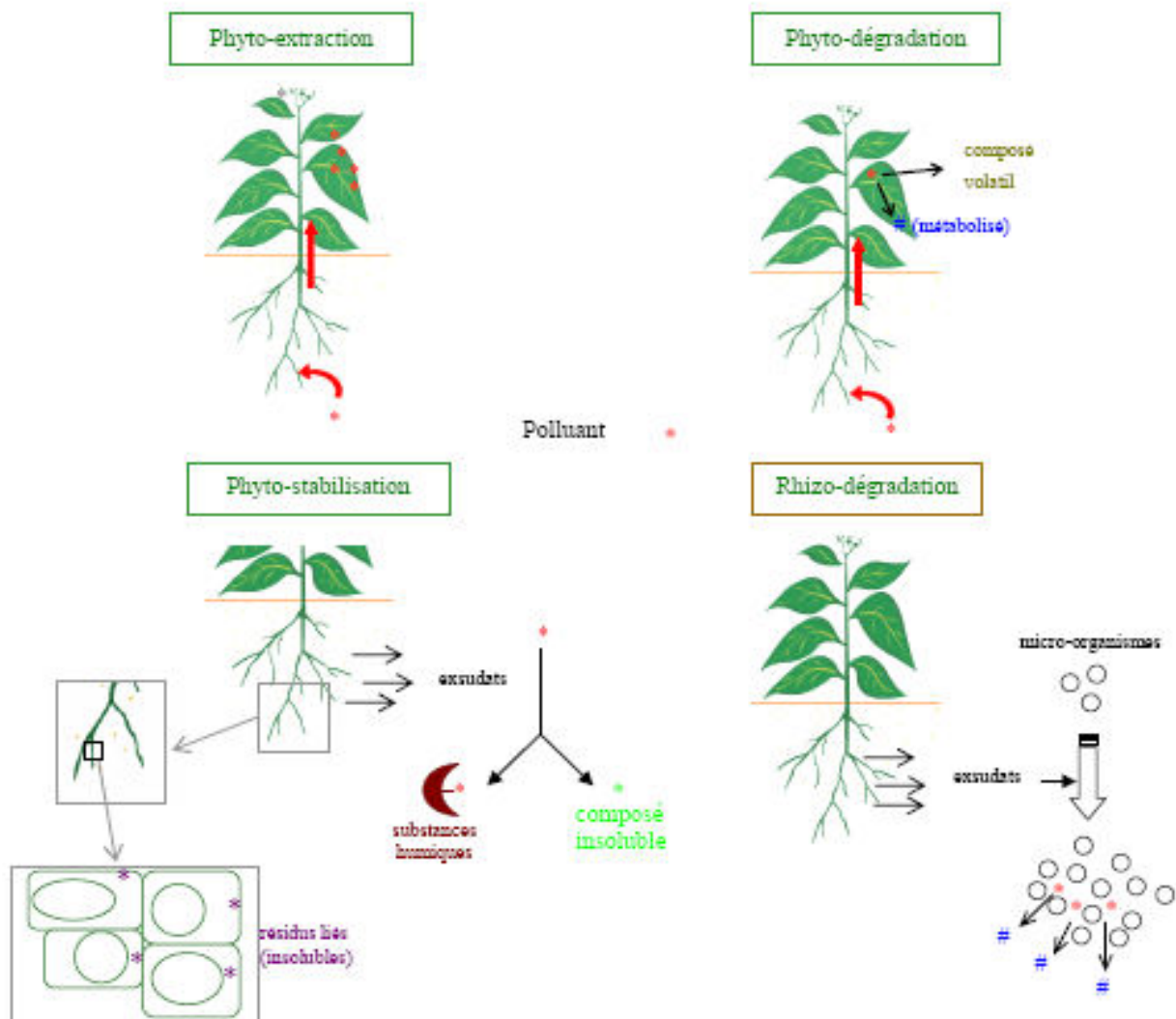


Figure 6. Principaux mécanismes de phyto-dépollution : phyto-extraction, phyto-dégradation, phyto-stabilisation et rhizo-dégradation (Schoenmuth et Pestemer, 2004).

II-1-1- Phytextraction (ou Phytoaccumulation ou Phytofiltration)

La phytoextraction correspond à l'extraction de polluants organiques et/ou inorganiques (Baraud, 2002), présentes dans leur environnement. La source de ces substances peut être l'eau, l'air ou le sol (Blaylock *et al.*, 1997 ; McGrath *et al.*, 2000).

La phytoextraction s'applique aux métaux (par exemple, Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn), aux métalloïdes (par exemple, As, Se), aux radionucléides (par exemple, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{234}U , ^{238}U), et aux non-métaux (par exemple, B) (Cornish *et al.*, 1995 ; Kumar *et al.*, 1995 ; Salt *et al.*, 1995 ; Bañuelos *et al.*, 1999).

Elle consiste à utiliser des récoltes successives d'espèces hyperaccumulatrices de métaux pour tenter de dépolluer les sols (**Salt et al., 1998**).

La phytoextraction en général présente l'avantage d'extraire les métaux lourds se trouvant dans le sol en faible concentration et de les accumuler dans les parties récoltables de la plante (**Mulligan et al., 2001**), dans des organes aériens faciles à récolter (**McGrath et al., 2000**). Cette biomasse contaminée est ensuite fauchée et exportée pour être, dans la plupart des cas, incinérée. Les cendres obtenues (bio-minerais) sont soit réintroduites dans le cycle métallurgique soit confinées dans un lieu étanche (**Brooks, 1998 ; Bert et al., 2000**).

II-1-2- Phyto-transformation (ou Phyto-dégradation)

Après avoir absorbé un contaminant, certaines plantes peuvent être capables de le dégrader (**Timbrell, 1982 ; Blaauboer, 1996**) : transformer ces polluants en substances moins toxiques (**Brooks, 1998 ; Bert et al., 2000**).

Exposés à divers xénobiotiques, végétaux et animaux ont dû développer des systèmes de détoxification mais contrairement aux animaux, les plantes ne disposent pas de système d'excrétion permettant d'éliminer les composés toxiques (**Timbrell, 1982 ; Blaauboer, 1996**).

Chez les végétaux, le métabolisme des xénobiotiques peut être divisé en trois phases aboutissant à la neutralisation du polluant : la transformation ou phase I, la conjugaison ou phase II et la compartimentation ou phase III (**Sandermann, 1992**) (**Figure 7**).

Les deux premières phases sont similaires à celles mises en oeuvre par les animaux. Les enzymes impliquées dans les deux premières phases ne sont pas spécifiques des xénobiotiques, ce sont des enzymes du métabolisme secondaire de la plante (**KomoBa et al., 1995**). Les enzymes de phase I transforment le composé par réduction, oxydation ou hydrolyse créant ainsi un ou plusieurs groupements fonctionnels sur la molécule (**Komives et Gullner, 2005**). Les enzymes de phase II catalysent la fixation d'un ou plusieurs substituants endogènes sur des sites actifs existants ou formés au cours de la phase I (**Sandermann, 1994**). Lors de la phase III, les composés solubles sont soit stockés dans la vacuole, soit incorporés dans la lignine ou dans les autres constituants de la paroi cellulaire devenant ainsi non extractibles.

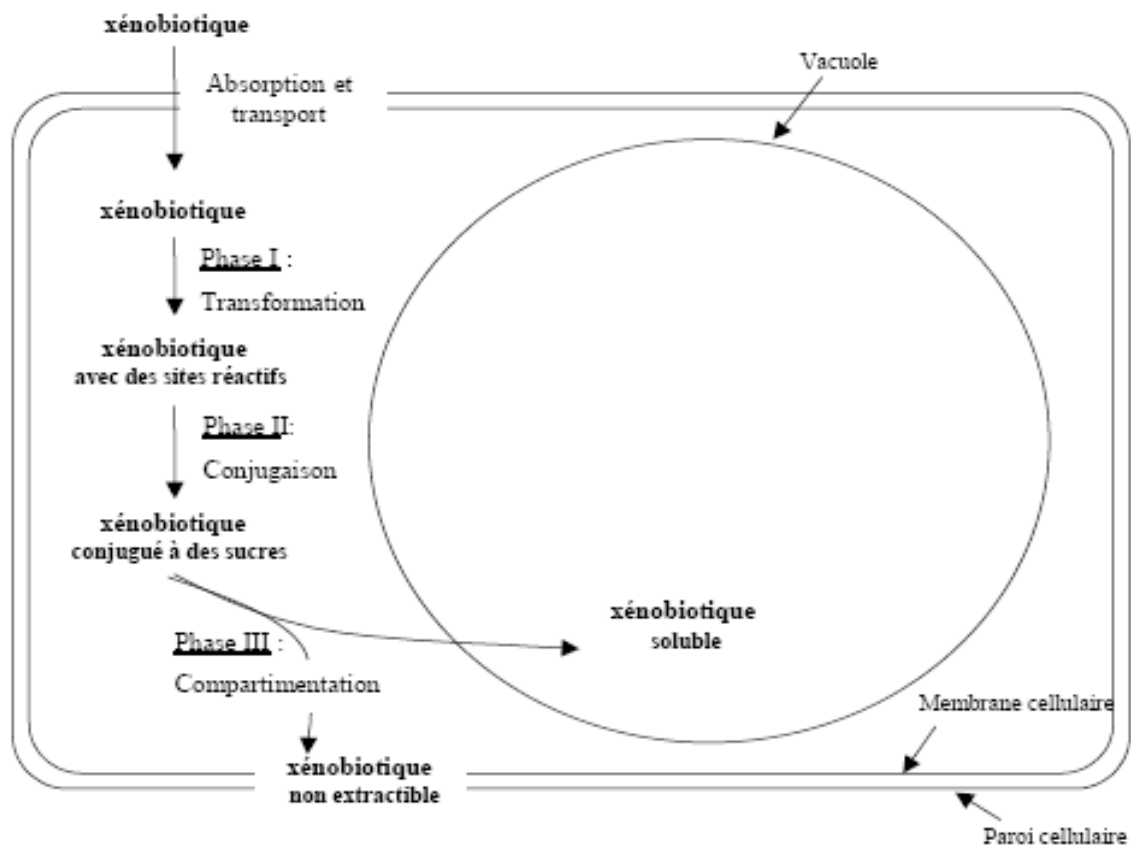


Figure 7. Métabolisme des xénobiotiques chez la plante (D'après Sandermann, 1992).

II-1-3- Rhizo-dégradation (ou Phyto-stimulation)

Dans ce cas, les plantes ont une action indirecte sur le polluant. Elles agissent en activateur de la dégradation microbienne. La rhizosphère, zone de sol à proximité des racines, est une zone de haute densité et d'activité microbiennes. Les plantes peuvent moduler l'environnement géochimique de la rhizosphère ce qui fournit des conditions plus adaptées à la croissance des bactéries et des champignons (Anderson, 2000 ; Newman et Reynolds, 2005).

L'activité des micro-organismes est favorisée par la présence des plantes qui créent un environnement physicochimique approprié favorisant ainsi la dégradation microbienne des polluants organiques (Corgie *et al.*, 2004).

La rhizofiltration qui suppose une absorption racinaire élevée pour les métaux ne nécessite pas une translocation efficace des métaux à partir des racines. Dans ce cas les plantes à grande surface racinaire sont prometteuses, considérant aussi leur taux élevé de croissance et stabilité biochimique (Shanks et Morgan, 1999 ; Nedelkoska et Doran, 2000).

II-1-4- Phyto-stabilisation

Dans ce cas, la phytostabilisation fournit une alternative au problème de contrôle de la contamination (**Oliveira et al., 2001**). C'est un procédé qui réduit la mobilité du contaminant par adsorption à la surface des racines ou par précipitation au niveau de la rhizosphère (**Mazoyer et Francoi, 1998**), Elle peut consister en une simple revégétalisation du site qui évite l'érosion (**Oliveira et al., 2001**), et qui cherche à confiner la pollution à l'aide d'espèces végétales tolérantes aux milieux pollués et dont la couverture stabiliserait les couches des sols, limitant ainsi la dispersion des métaux lourds par ruissellement, par percolation et par le vent (**Salt et al., 1998**), dans l'air et dans l'eau (**Oliveira et al., 2001**). Cette approche vise ainsi à limiter les risques de transfert de la pollution en dehors du sol contaminé et permet en même temps une meilleure intégration paysagère pour des sites présentant d'importants volumes impossibles à stocker en décharge de classe I (**Raskin et al., 1994 ; Chaney et al., 1998**).

La transpiration d'une plante étant un moteur remarquable pour réduire les flux de polluants vers les eaux souterraines (**Jean Louis et Qi-Tang, 2007**).

La phytostabilisation peut se produire à travers la sorption, la précipitation, la complexation, ou réduction de la valence des métaux (**Ghosh et Singh 2005**), les rendant ainsi inoffensifs (**Raskin et al., 1997**).

Le système racinaire de la plante doit être important pour favoriser l'adsorption, l'absorption, la précipitation et/ou la transformation des métaux lourds, et posséder une résistance suffisante à la phytotoxicité du contaminant (**Ralinda et Miller, 1996**).

Parmi les nombreux paramètres pédologiques ayant une influence sur la mobilité des métaux lourds, le pH peut être modifié par les exsudats racinaires ou la libération de CO₂. De même, les plantes, ou les bactéries associés à la rhizosphère, peuvent changer l'état d'oxydation de certains métaux les rendant insolubles (**Salt et al., 1995 ; Laxman et More, 2002**).

Toutefois, nous devons considérer la phytostabilisation comme étant une mesure temporaire de confinement du polluant et non pas une technique remédiation à part entière (**Ralinda et Miller, 1996**).

II-1-5- Phyto-volatilisation

Certaines plantes peuvent convertir un contaminant en composé volatil qui sera rejeté dans l'atmosphère par les stomates des feuilles (**Yu et Gu, 2006**). Ce processus est plus particulièrement appelé phyto-volatilisation.

La phytovolatilisation permet la transformation en produits volatiles puis le relargage dans l'atmosphère (**Bizily et al., 1999**).

Dans ce cas, le composé volatil néoformé peut être toxique mais il sera dilué dans l'air pour diminuer l'exposition et ainsi le risque (**Yu et Gu, 2006**).

Cette méthode est une forme spéciale de la phytoextraction qui peut être utilisée seulement pour les contaminants qui sont hautement volatiles, tels que le mercure ou le sélénium, une fois absorbés ces métaux peuvent être convertis en formes non toxiques (**Salt et al., 1995 ; Hunsen et al., 1998**), et solubles sont pris avec de l'eau par les racines, transportés aux (**Tollsten et Muller 1996 ; Newman et al., 1997 ; Davis et al., 1998**), parties aériennes pour y être stockés avant d'être transformés en composés volatils (**Chaney et al., 1997 ; Brooks, 1998 ; Salt et al., 1998**), et volatiliser dans l'atmosphère par les stomates (**Tollsten et Muller, 1996 ; Newman et al., 1997 ; Davis et al., 1998**), des racines, des tiges ou des feuilles (**Salt et al., 1995 ; Hunsen et al., 1998**).

La phytovolatilisation a été utilisée à l'origine pour le déplacement de mercure, l'ion de mercure est transformé à mercure élémentaire moins toxique. L'inconvénient est que le mercure débloquent vraisemblablement dans l'atmosphère sera recyclé par précipitation et redéposé dans l'écosystème (**Ghosh et Singh, 2005**). Cette technique n'est pas totalement satisfaisante car si elle décontamine les sols, elle libère dans l'atmosphère des substances toxiques susceptibles de contaminer de nouveau le sol ou tout autre chose (eaux, nourritures animales et humaines, cultures, etc.) (**Brooks, 1998 ; Bert et al., 2000**).

II-2- Critères de choix des plantes pour la phytoremédiation

Tous les végétaux absorbent des éléments minéraux. Cependant, certains présentent la particularité de prélever en grande quantité un élément donné. **Baker (2000)**, donne dans son ouvrage la définition suivante : il s'agit de l'accumulation dans un organisme d'un élément à des concentrations plus importantes que celles trouvées dans le sol sur lequel il se trouve et cette concentration est supérieure à celle requise par le métabolisme.

La phytoremédiation s'effectue de façon naturelle par les plantes survivant dans l'eau et les sols contaminés. C'est précisément sur les sites contaminés où des chercheurs ont recueilli des espèces « hyperaccumulatrices » de polluants (**Alleman et Leeson, 1997**). L'hyperaccumulation étant la capacité d'une espèce végétale à très fortement concentrer les métaux dans ses parties aériennes (**Salt et al., 1998**). Au moins 400 espèces distribuées dans 45 familles botaniques sont considérées comme hyperaccumulatrices des métaux (**Brooks, 1998**), sont des métalphytes et appartiennent à la végétation naturelle des sols riches en métaux (**Ernst, 2000**). En sachant que la principale caractéristique des plantes hyperaccumulatrices est leur capacité de sécréter des

substances pouvant solubiliser les métaux dans la rhizosphère (**Chaney et al., 1997**), Il s'agit d'un composé chimique qui empêche les végétaux de s'empoisonner en neutralisant le métal (**Masingue, 2003**).

Dans une stratégie de phytoremédiation de sites contaminés, il est très utile de choisir des plantes qui les ont spontanément colonisés (plantes indigènes), car ces plantes sont souvent mieux adaptées en termes de survie, de croissance et de reproduction en situation de stress environnemental, et qui sont bien adaptées à ces environnements pollués. De plus, ces espèces qui poussent naturellement sont écologiquement adaptées au climat qui prévaut (**Li et al., 2006**). Dans le cas des sites métallurgiques, certaines espèces indigènes ont une tolérance et/ou une capacité accumulatrice. **Remon et al. (2005)**, ont étudié le sol et la végétation représentée par 28 espèces, qui pouvaient être bien adaptée pour faire face aux conditions locales dans une stratégie de phytostabilisation.

Les plantes envisagées pour la dépollution doivent avoir une croissance rapide (**Meagher et Heaton, 2005**), un système racinaire et foliaire développé (**Viatcheslav Dushenkov et al., 1995**). La biomasse des plantes doit être élevée afin d'augmenter les quantités de métaux prélevées, elles doivent être tolérantes à la pollution pour permettre une extraction optimum du polluant (**Meagher et Heaton, 2005**) ; elles doivent aussi développer un système racinaire extensif (**Glebert et al., 2003**), explorant la zone de sol polluée (**Kramer, 2005**), avoir une forte résistance à la sécheresse (**Boyd et Martens, 1998**), et aux polluants liée à des capacités de chélation de celui-ci (**Vavasseur et al., 2003**), métaboliser ces xénobiotiques en produits inoffensifs (**Schwitzguébel, 2002**), et accumuler les éléments traces dans leurs tissus aériens sans avoir développer des symptômes de toxicité (**Baker et Brooks, 1989**). Pour un mécanisme de phytodégradation, il est préférable que les plantes synthétisent de grandes quantités d'enzyme de dégradation (**Pilon-Smits, 2005**).

Dans le cas d'une phyto-extraction de métaux lourds, les plantes envisagées sont celles qui ont les niveaux d'absorption les plus forts, de translocation et d'accumulation dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltés (**Meagher et Heaton, 2005**).

L'implantation de ces plantes doivent être aisée et ses exigences doivent être les plus faibles possibles, être compétitives vis-à-vis des plantes endogènes du site (**Meagher et Heaton, 2005**), et avoir un mécanisme de défense contre les herbivores et les pathogènes (**Boyd et Martens, 1998**).

II-2-1- Principales plantes phytoremédiantes

Aujourd'hui, 417 espèces présentant des individus tolérants et hyperaccumulateurs sont connues, aussi bien dans les zones tropicales que tempérées,

À l'heure actuelle, plus de quatre cent espèces de plantes sont connues comme hyperaccumulatrices de métaux, pouvant accumuler de fortes concentrations de métaux dans leur biomasse aérienne (Yoon *et al*, 2006). Les familles végétales qui dominent dans les accumulateurs et hyperaccumulateurs de métaux, sont : *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Cyperaceae*, *Cunouniaceae*, *Fabaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lamiaceae*, *Poaceae*, *Violaceae* et *Eupobiaceae*, et les hyperaccumulatrices de métaux que sont les *Brassicaceae* présentent plus le nombre de taxons, soit 11 genres et 87 espèces (Prasad et Frietas, 2003). D'autre part, plusieurs plantes ont été trouvées être tolérantes aux métaux, et sont appelées «exclueuses» (excluders) et sont capables de restreindre l'absorption des métaux et/ou la translocation depuis les racines vers les parties aériennes (Baker, 1981), et elles poussent sur des milieux présentant des concentrations élevées en métaux toxiques (Prasad et Frietas, 2003). La majorité d'entre elles (317 espèces) concernant l'hyperaccumulation du nickel (Baker *et al.*, 2000). Les espèces relatives à l'hyperaccumulation du zinc arrivent en deuxième position, bien qu'elles soient en nombre beaucoup plus réduit.

Les autres métaux concernés par l'hyperaccumulation sont le cadmium, le plomb, le cuivre, l'arsenic, le cobalt, le manganèse, le thallium et l'or (Baker et Brooks, 1989 ; Anderson, 2000 ; Baker *et al.*, 2000). Voici quelques plantes hyperaccumulatrices de quelques métaux lourds dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6. Exemples de plantes accumulatrices de métaux lourds.

Auteurs et Année	Métal	Espèces de Plantes
(Quaghebeur et Rengel, 2003)	As	<i>Holcus lanatus</i>
(Webb <i>et al.</i> , 2003)		<i>Pteris vittata</i>
(Gumaelius <i>et al.</i> , 2004)		<i>Pteris cretica</i>
(Gumaelius <i>et al.</i> , 2004)		<i>Pteris longifolia</i>
(Gumaelius <i>et al.</i> , 2004)		<i>Pteris umbrosa</i>
(Salt <i>et al.</i> , 1997)	Cd	<i>Brassica juncea</i>
(Falandyz <i>et al.</i> , 2003)		<i>Salix nigra</i>
(Kupper <i>et al.</i> , 2000 ; Cosio <i>et al.</i> , 2004)		<i>Arabidopsis hallerii</i>
(Yadav <i>et al.</i> , 2010)	Cr	<i>Jatropha curcas</i>
(Kleiman et Cogliatti, 1998)		<i>Brassica napus</i>
(Han <i>et al.</i> , 2004)		<i>Brassica juncea</i>
(Kleiman et Cogliatti, 1998)		<i>Fagopyrum esculentum</i>
(Mishra <i>et al.</i> , 1995)		<i>Zea mays</i>
(Jean, 2007)	Cu	<i>Datura innoxia</i>
(Ernst, 1988)		<i>Streptanthus polygaloides</i>
(Harper <i>et al.</i> , 1998)		<i>Mimulus guttatus</i>
(Jiang <i>et al.</i> , 2004)		<i>Elsholtzia argyi</i>
(Song <i>et al.</i> , 2004)	Hg	<i>Silene vulgaris</i>
(Falandyz <i>et al.</i> , 2003)		<i>Amanita muscaria</i>
(Wang et Greger, 2004)	Ni	<i>Salix spp</i>
(Boyd et Martens, 1998)		<i>Streptanthus polygaloides</i>
(Boyd et Martens, 1998)		<i>Thlaspi caerulescens</i>
(Boyd et Martens, 1998)		<i>Thlaspi montanum</i>
(Salt <i>et al.</i> , 1999)		<i>Thlaspi. arvense</i>
(Baker et Brooks, 1989; Kerkeb et Kramer, 2003)		<i>Alyssum lesbiacum</i>
(Baker et Brooks, 1989; Kerkeb et Kramer, 2003)		<i>Thlaspi goesingense</i>
(Freeman <i>et al.</i> , 2004)		<i>Thlaspi goesingense</i>
(Kumar <i>et al.</i> , 1995)	Pb	<i>Brassica juncea</i>
(Blaylock <i>et al.</i> , 1997; Sahi <i>et al.</i> , 2002)		<i>Sesbania drummondii</i>
(Garcia <i>et al.</i> , 2004)		<i>Piptathertan miliacetall</i>
(Banuelos <i>et al.</i> , 1997)	Se	<i>Brassica juncea</i>
(Pickering <i>et al.</i> , 2003)		<i>Astragalus bisulcatus</i>
(Van Huysen <i>et al.</i> , 2004)		<i>Stanleya pinnata</i>
(Cannon, 1960)	Zn	<i>Arabidopsis lyrata ssp</i>
(Pollard et Baker 1997)		<i>Thlaspi caerulescens</i>
(Zhao <i>et al.</i> , 2000)		<i>Arabidopsis halleri</i>
(Ma <i>et al.</i> , 2001)		<i>Pteris vittata</i>
(Vacchina <i>et al.</i> , 2003; Weber <i>et al.</i> , 2004)		<i>Thlaspi caerulescens</i>
(Vacchina <i>et al.</i> , 2003; Weber <i>et al.</i> , 2004)		<i>Arabidopsis halleri</i>
(Vacchina <i>et al.</i> , 2003; Weber <i>et al.</i> , 2004)		<i>Thlaspi goesingense</i>

II-3- Différentes étapes de la phytoremédiation

II-3-1- Solubilisation du métal dans la matrice du sol

Toutes les plantes prélèvent dans le sol des quantités plus au moins importantes d'éléments (**Duthil, 1973**). Beaucoup de métaux sont trouvés sous formes insolubles (**Blaylock et Huang, 2000**), pour être absorbés, ils doivent être sous forme soluble dans la rhizosphère. Ils sont donc soit libres soit liés à d'autres molécules. Celles-ci sont présentes dans le sol de manière naturelle ou sont sécrétées par la plante (phytochélatines et métallothionéines) (**Anderson, 2000**).

Les plantes emploient deux méthodes pour désorber les métaux de la matrice du sol : acidification de la rhizosphère par l'action des pompes de proton de la membrane plasmique et la sécrétion des ligands capables de chélater ces métaux (**Blaylock et Huang, 2000**).

La solubilisation provient de la production de composés acides tels que les acides carboxyliques, phénoliques, aliphatiques, nitrique et sulfurique. Certaines bactéries chimolithotrophes (**Foy et al., 1978 ; Chaignon, 2001 ; Deneux-Mustin et al., 2003**), Les champignons et les racines des plantes excrètent eux aussi des acides afin d'augmenter leur absorption de nutriments, ou tout simplement comme déchets métaboliques.

Cette acidification favorise aussi la mobilité des autres éléments qui ne sont pas indispensables pour le métabolisme végétal. D'autre part plusieurs autres molécules organiques, capables de complexer spécifiquement certains éléments en solution (**Chaignon, 2001**). Ces molécules favorisent les déplacements d'éléments métalliques et un transfert diffusif jusqu'aux plantes dans lesquelles ils s'accumulent.

II-3-2- Prise dans la racine

La concentration des éléments en traces dans la plante varie d'un organe à un autre (**Bourelrier et berthelin, 1998**). L'absorption racinaire est une voie de passage efficace dans les plantes (**Lefevre, 1998**), pour la plus part des espèces végétales, les racines retiennent la majeure parties des éléments en traces absorbés (80 à 98% de la quantité totale du métal absorbé) (**Bourelrier et Berthelin, 1998**).

En effet, pour pénétrer dans la plante, les composés doivent pénétrer dans les cellules pour pouvoir passer la bande de Caspari (structure subérifiée) (**Figure 8**). Dans le cas contraire, ils restent bloqués dans l'épiderme et le cortex des racines et leur transfert dans les parties aériennes de la plante sera impossible. Les composés très lipophiles sont retenus par les parois cellulaires et sont donc piégés dans les racines (**McFarlane, 1995**).

Les mécanismes racinaires d'absorption sont passifs ou actifs mais semblent différer d'un métal à l'autre et d'une plante à l'autre (Alloway, 1995), la voie principale d'absorption des métaux se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme (voie apoplastique) (Briat et Lebrun, 1999). Une partie des métaux apoplastiques peut donc rejoindre la voie symplastique puis le xylème par les plasmodesmes (Greger, 1999).

Le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de concentration) par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines (Briat et Lebrun, 1999). Puis au niveau de l'endoderme, le transport peut devenir actif au niveau de la membrane plasmique des cellules de la bande de Caspary (voie symplastique), autorisant cette fois un transfert contre le gradient de concentration (Greger, 1999 ; Chaignon, 2001).

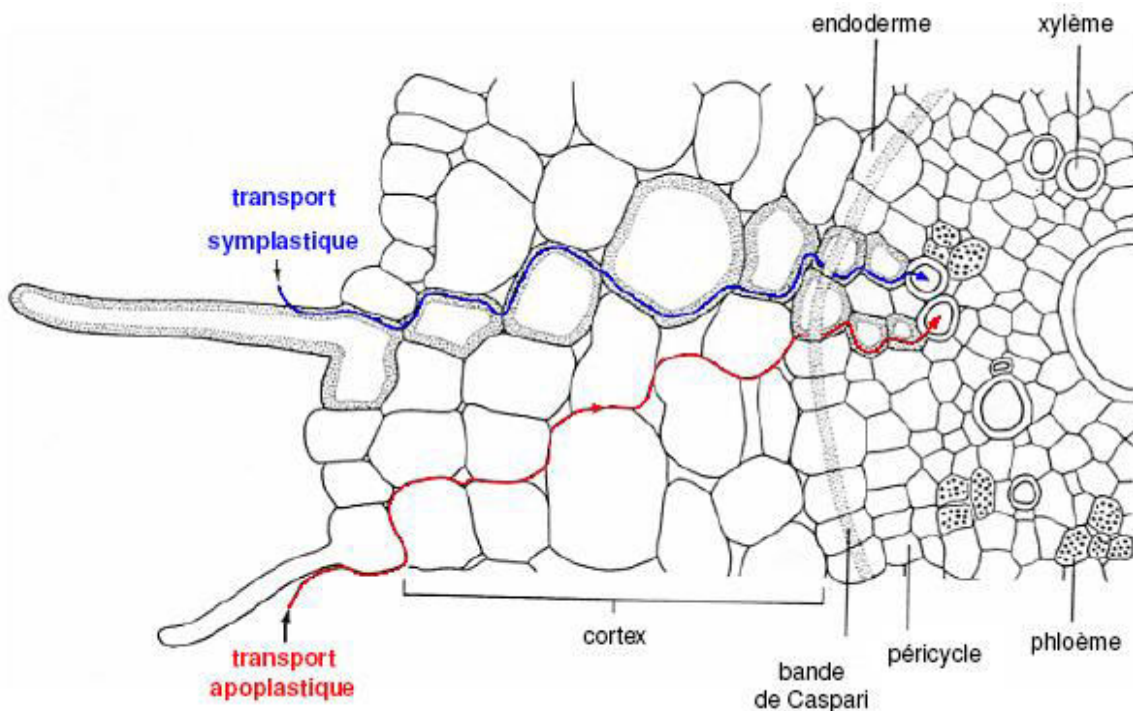


Figure 8. Schéma d'une coupe transversale de racine de blé montrant les voies possibles de mouvement des composés solubles (d'après McFarlane, 1995).

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

Cependant, une partie des ions peut être adsorbés par les charges négatives de surface de l'acide polygalacturonique des pectines, qui agissent comme des échangeurs d'ions (**Briat et Lebrun, 1999**). Les quantités d'ions mobilisables, prélevées par la plante, dépendent de la quantité totale d'ions présents dans le sol et du nombre de poils absorbants (**Alloway, 1995**).

II-3-3- Transport aux feuilles

Une propriété remarquable de certaines espèces, les plantes hyperaccumulatrices, est leur capacité à concentrer des métaux dans leurs parties aériennes à des niveaux exceptionnels (**Jean Louis et Qi-Tang, 2007**), les organes de stockage des métaux sont très variés et dépendent du couple (végétal, métal) considéré. Généralement, ils sont retrouvés dans les feuilles et dans les tiges à des niveaux plus élevés que dans les racines. Ils peuvent également être stockés dans la sève, les bourgeons et les graines (**Brooks, 1998**). Dans la cellule, les métaux ayant pénétré dans le cytoplasme sont pris en charge par diverses molécules afin de les stocker ou d'éviter tout dommage cellulaire (**Boyd, 1998**).

Après leur absorption, Le transport des métaux dans la plante se déroulerait dans le xylème (**Huang et al., 1997**), de la plante vers les parties aériennes, appelé « translocation », peut nécessiter ou non la prise en charge des éléments par des agents complexants, tels que les acides organiques, les acides aminés et divers peptides (**Alloway, 1995**). Chez certaines espèces la translocation d'éléments toxiques est plus importante que chez d'autres, pouvant conduire à une accumulation des métaux dans les feuilles et les autres parties aériennes, sans que l'on sache avec rigueur si elle est due à un transport plus actif ou une absence d'immobilisation dans les racines (**Foy et al., 1978**). Le transport des éléments toxiques par le phloème est moins évident du fait que les cellules qui le constituent sont vivantes et forment un piège supplémentaire (**Greger, 1999**).

II-3-4- Détoxification/Chélation

Les métaux chélatés peuvent être stockés dans les vacuoles des racines ou transportés vers la partie aérienne (Clemens *et al.*, 1999).

Néanmoins, Zhu *et al.* (1999), ont montré, à partir de clones transformés de *Brassica juncea*, que la surexpression des gènes intervenant dans la synthèse du glutathion conduit à une augmentation de la tolérance au cadmium via une augmentation du pool de phytochélatines. La stimulation des voies conduisant aux PC représente donc, comme pour les MT, une stratégie de transgène potentiellement efficace pour l'amélioration des phytoextracteurs.

La présence intracellulaire de ligands organiques, qui assurent une complexation et donc la détoxification de nombreux ions métalliques constitue à l'heure actuelle un aspect fondamental de la résistance aux métaux lourds. Chez les végétaux, quatre groupes principaux de ligands intracellulaires ont été caractérisés (Murphy et Taiz, 1995) :

II-3-4-1- Méthallothionéines (MT)

Les méthallothionéines sont des polypeptides (Sauge-Merle, 2003), on les rencontre chez de nombreux procaryotes et chez la plupart des eucaryotes. Ces protéines sont caractérisées par leur richesse en cations métalliques (essentiellement Cu et/ou Zn) et par leur forte proportion de résidus cystéines (environ 30 %) (De Knecht *et al.*, 1992). Elles se distinguent aussi par leur faible masse moléculaire (6 à 8 kDa et 60 à 75 acides aminés) et par l'absence de résidus aromatiques (Zhu *et al.*, 1999). Bien que leurs séquences en acides aminés soient très variables d'un organisme à un autre (Murphy et Taiz, 1995).

Les méthallothionéines (MT) des mammifères sont caractérisées par : un bas poids moléculaire 6800-7000 Da, elles comportent 60 aminoacides, chaque molécule de MT peut fixer 7 atomes de métaux divalents tels que le Cu^{2+} , mais aussi Zn^{2+} ou Cd^{2+} , qui peuvent induire leur synthèse, et donc interférer avec la résorption du Cu (Howot et Tarallo, 1991).

Martin (1994), montre que les méthallothionéines animaux appartiennent à la classe 01 et ceux végétaux font partie de la classe 02. Ces derniers sont encore classés en deux sous classes ou types:

- ⊕ Le type 1MTs ayant 12 résidus cystéines arrangés comme suit: 6cys- Xaa -6cys avec Xaa = environ 40 acides aminés;
- ⊕ Le type 2MTs qui est soit sous la forme: 6cys - 6cys ou 6cys – Xaa - Xaa – 6cys.

Le rôle précis des MT dans la réponse aux métaux lourds est encore débattu, mais de nombreuses observations ont montré qu'elles pourraient être impliquées dans certains mécanismes de tolérance, notamment vis-à-vis du cadmium et du cuivre. Chez *Arabidopsis thaliana* par exemple, il a été démontré que la présence de cuivre stimule la biosynthèse de MT et que la variation écotypique de la tolérance à ce métal est corrélée au taux de transcription des gènes MT (Murphy et Taiz, 1995).

II-3-4-2- Phytochélatines (PC)

Les phytochélatines (PC) sont des composés chimiques (Masingue, 2003), représentent le deuxième groupe de chélateurs intracellulaires, uniquement rencontrés dans le règne végétal. De nature peptidique, ces molécules sont classées dans une petite famille apparentée aux MT, avec lesquelles elles partagent d'assez nettes similarités de structure et de fonction (De Knecht *et al.*, 1992).

Leur synthèse est stimulée par la présence de métaux lourds (Cd, Cu, Zn, etc.). Une différence essentielle avec les autres MT réside dans l'origine biosynthétique des PC ; elles ne sont pas directement codées par le génome mais sont synthétisées par (De Knecht *et al.*, 1992), une enzyme, la gamma-glutamylcystéine dipeptidyl transpeptidase (ou phytochelatin synthase) (Suresh et Ravishankar, 2004), à partir d'un tripeptide précurseur, le glutathion (Glu-Cys-Gly) (De Knecht *et al.*, 1992), fournissant des groupements gamma-Glu-Cys-Gly (Meinhart, 1996), selon la réaction suivante:



Qui est le thiol le plus abondant dans les plantes, et qui joue un rôle dans la détoxification des peroxydes, il sert aussi de pool de réserve de cystéine pour les phytochélatines (Hopkins, 2003) (Figure 9).

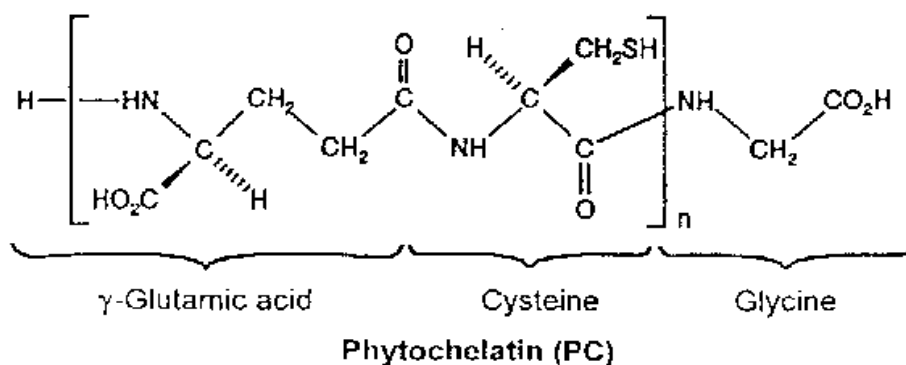


Figure 9. Structure de la phytochélatine (D'après Meinhart, 1996).

Le complexe formé est alors capté et transporté dans la vacuole. Le transport est assuré par un transporteur spécifique de PC et également de PC complexé ; le passage vers la vacuole est ATP dépendant, c'est-à-dire qu'il nécessite l'hydrolyse énergétique d'une molécule d'ATP (Meinhart, 1996). Dans certains cas, le complexe va être stabilisé par addition de sulfides. Au contraire, d'autres fois, le complexe est dégradé (Masingue, 2003).

Dans la vacuole, le pH acide déplacerait le métal permettant au peptide de retourner dans le cytosol, le métal serait, ensuite séquestré par les acides organiques qui sont habituellement en abondance dans la vacuole (Hopkins, 2003), si le complexe n'est pas protégé il est attaqué par l'acidité de la vacuole et les PCs libèrent les ions métalliques (Masingue, 2003), une fois leur rôle accompli, ne vont pas aller perturber le bon fonctionnement des enzymes du métabolisme cellulaire dont l'activité nécessite des ions métalliques (Meinhart, 1996).

Le chélateur emprisonne l'élément toxique et le place en quarantaine dans la vacuole d'une cellule végétale afin qu'il n'en perturbe pas le fonctionnement (Masingue, 2003).

Bien que les PCs soient clairement impliquées dans la liaison des métaux intracellulaires, l'activité PC synthase semble constitutive chez la plupart des plantes. En effet, les écotypes tolérants ne présentent pas de concentrations accrues en PC (De Knecht *et al.*, 1992) ; il est donc difficile d'attribuer la tolérance des phytoextracteurs naturels à la présence de phytochélatines.

II-3-4-3- Acides organiques

Dans la plante, les métaux vont se complexer avec des acides organiques, qui représentent un autre groupe de chélateurs naturels (Ma *et al.*, 1997), comme le malate ou le citrate (Hopkins, 2003). Toutes ces petites molécules sont clairement impliquées dans les phénomènes d'accumulation (Ma *et al.*, 1997), et qui interviennent dans la complexation intracellulaire d'éléments nutritifs, peuvent être sécrétés dans le milieu extérieur. Ils limiteraient ainsi les transferts par des processus de complexation (Baker et Walker, 1990).

Ainsi, les capacités d'hyperaccumulation et de résistance de certaines variétés de blé noir (*Fagopyrum esculentum*) vis-à-vis de l'aluminium sont directement dépendantes de la synthèse d'acide oxalique (Ma *et al.*, 1997). De même, une synthèse accrue de malate a été observée chez une population tolérante de *Festuca rubra* se développant sur des dépôts riches en Cu et Zn, par rapport à une population sensible provenant d'une prairie (Harrington *et al.*, 1996).

II-3-4-4 - Acides aminés libres

Les acides aminés libres comme la proline, l'histidine et la cystéine, s'accumulent lors d'un stress métallique et pourraient être eux aussi impliqués dans la chélation de divers métaux lourds, notamment du zinc et du nickel (**Briat et Lebrun, 1999 ; Bert, 2000**).

L'histidine (un premier exemple d'amines libres ou acides organiques), est impliqué dans le mécanisme de tolérance au nickel, et en faibles concentrations, le cobalt, ainsi que dans le transport du nickel vers le xylème (**Kramer et al., 1996 ; Prasad, 2003**). C'est ainsi que l'accumulation et la tolérance au nickel dans le genre *Alyssum* semblent principalement dues à une synthèse accrue d'histidine (**Krämer et al., 1996**).

II-3-5- Séquestration/Volatilisation/Compartimentation

Après l'absorption des polluants organiques, ils peuvent suivre des destinées différentes, ils peuvent être:

- 1) Transportés vers d'autres tissus de la plante (**Cataldo et al., 1989 ; Schroll et al., 1994**), puis être volatilisés ;
- 2) dégradés partiellement ou complètement (**Wolfe et al., 1993 ; Schnoor et al., 1995 ; Goel, et al., 1997 ; Newman et al., 1997**) ;
- 3) ou transformés en composés moins toxiques et liés dans les tissus de la plante sous forme non disponible (**Field et Thurman, 1996**).

L'étape finale pour l'accumulation de la plupart des métaux est la séquestration du métal loin de tous les processus cellulaires qu'il pourrait perturber. La séquestration se produit habituellement dans la vacuole de la plante, où le metal/metal-ligand doit être transporté à travers la membrane vacuolaire. Les métaux peuvent également rester dans la cellule au lieu de croiser la membrane plasmique dans la cellule, comme emplacements de charge négative sur la cellule peut agir l'un sur l'autre avec les cations polyvalents (**Wang et Evangelou, 1994**).

Une des hypothèses les plus fréquentes pouvant expliquer le phénomène de tolérance serait attribuée à la compartimentation accrue des métaux lourds sous forme ionique dans la vacuole, grâce à plusieurs familles de transporteurs protéiques. Par exemple, un transporteur tonoplastique appartenant à la famille des protéines GTP a été identifié chez un écotype de *Silene vulgaris* tolérant au zinc. Le transport de zinc sous forme ionique dans les vacuoles dépend de la présence de magnésium et de GTP et permet la détoxification du zinc plus rapidement que chez l'écotype sensible (**Chardonnens et al., 1999**).

Chez *Rauvolfia serpentina*, le cadmium forme, avec les phytochélatines, des complexes de faible masse moléculaire (Low Molecular Weight (LMW)), qui s'agrègent les uns aux autres par des pont sulfures pour former des complexes de masse moléculaire élevée (High Molecular Weight (HMW)). Les HMW pourraient alors être transportés par un complexe protéique spécifique dans la vacuole. Le pH vacuolaire provoquerait alors la dissociation du complexe, et les ions seraient pris en charge par les acides organiques présents, tels que le malate, le citrate ou encore l'oxalate (Sanita et Gabbrielli, 1999).

Cas particulier de la phytoremédiation, la phytovolatilisation n'est possible que pour un très petit nombre de métaux (Rugh *et al.*, 1996 ; Salt *et al.*, 1998 ; De Souza *et al.*, 1999), qui sont hautement volatiles, tels que (Salt *et al.*, 1995; Hunsen *et al.*, 1998), le sélénium et le mercure (Hg) en font parti et la possibilité d'y inclure l'arsenic n'est pas à écarter (Rugh *et al.*, 1996 ; Salt *et al.*, 1998 ; De Souza *et al.*, 1999), une fois absorbés ces métaux peuvent être convertis en formes non toxiques et volatilisés vers l'atmosphère (Salt *et al.*, 1995 ; Hunsen *et al.*, 1998). Ce processus ne génère pas de déchets car les plantes n'accumulent pas dans leurs tissus des concentrations importantes en métaux lourds. De plus, la plante volatilise le contaminant tout au long de sa vie, l'extraction est donc continue (Chaney *et al.*, 1997 ; Brooks, 1998 ; Salt *et al.*, 1998).

II-4- Autres systèmes de défense au stress métallique

D'autres mécanismes agissant contre les effets néfastes des métaux lourds peuvent être mis en oeuvre chez les plantes :

Des transporteurs membranaires, de type pompe ATPasique, spécifiques du cadmium seraient présents chez *A. thaliana* et réaliseraient un efflux actif des ions métalliques à l'extérieur des cellules (Briat et Lebrun, 1999).

L'accumulation des métaux dans les feuilles âgées, juste avant leur abscission diminuerait ainsi les concentrations métalliques dans la plante. En général, la concentration dans les feuilles augmente avec l'âge (Dahmani-Muller *et al.*, 1999). Cette observation suggère un transport interne depuis des feuilles vertes, encore actives d'un point de vue photosynthétique, vers les feuilles qui sont sur le point de tomber, préservant ainsi la photosynthèse tout en détoxiquant la plante. Une accumulation de Cd a été également observée dans les trichomes de plusieurs espèces (Salt *et al.*, 1995).

Les protéines de choc thermique (HSP), déjà réputées pour leur implication dans le stress lié à un choc thermique, seraient également responsables de la tolérance aux métaux toxiques. En effet, des stress très variés, ayant en commun de dénaturer les protéines (stress protéotoxique), sont capables d'induire cette réponse de type «choc thermique» (Neumann *et al.*, 1995).

L'induction des HSP par le stress protéotoxique permet à la cellule de réparer les dommages protéiques ainsi occasionnés par resolubilisation des agrégats, renaturation des polypeptides ou, si cela est impossible, par l'engagement des protéines dénaturées vers les voies de dégradation (Banzet *et al.*, 1998).

La biosynthèse d'éthylène dans les racines et les feuilles est provoquée par certains métaux, comme le cadmium. L'éthylène serait alors un messager stimulant la lignification capable de limiter les flux de métaux dans les systèmes vasculaires et accélérant la réponse anti-oxydante par induction de l'activité ascorbate peroxydase, ainsi que la synthèse de métallothionéines (Sanita et Gabbrielli, 1999).

Les racines des plantes ont aussi la capacité de modifier les conditions environnementales comme le pH ou l'humidité du sol. Certains contaminants peuvent être sensibles à ces variations et la présence de plantes peut ainsi permettre une diminution de la biodisponibilité du polluant (Oliveira *et al.*, 2001).

Les plantes libèrent aussi un certain nombre d'enzymes dans le sol et eaux, qui dégradent les contaminants organiques (Salt *et al.*, 1998 ; Wenzel *et al.*, 1999). Les enzymes du sol dérivées de sources végétales comprennent les laccases, déhalogénases, nitroréductases, nitrilases et peroxydases (Schnoor *et al.*, 1995 ; Carreira et Wolfe, 1996 ; Boyajian et Carreira, 1997).

Enfin, certains composés peuvent être absorbés par la plante mais ne pas être transférés vers les parties aériennes. Ils peuvent donc être incorporés dans les parois racinaires après une métabolisation. Le polluant sera immobilisé dans la paroi par des liaisons covalentes irréversibles. Certains micro-organismes sont capables de dégrader les parois végétales et ils seraient donc capables de dégrader le polluant (Broda *et al.*, 1994 ; Aust, 1995).

III- Stratégies d'augmenter les performances la phytoremédiation

III-1- Amélioration de l'absorption et de la translocation

La combinaison de plusieurs mécanismes peut permettre d'optimiser la phyto-dépollution (Sun *et al.*, 2004).

Le principe de la phytoextraction induite se base sur l'utilisation de plantes à forte biomasse et à croissance rapide et l'induction de l'accumulation des métaux lourds chez ces plantes par ajout d'un agent chélateur (Jarvis et Leung, 2002), qui est un traitement électrocinétique du sol et qui permet une meilleure mobilisation des cations métalliques, l'ajout de chélateurs dans le sol (type EDTA) permet une meilleure absorption racinaire, et l'amélioration des plantes hyper-accumulatrices induit une meilleure extraction des métaux chélatés (Mazoyer et François, 1998), les chélateurs comme l'EDTA aident à la mobilisation et à l'accumulation subséquente des contaminants de sol tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), et le zinc (Zn) dans *de brassica juncea* (moutarde indienne) et de *Helianthus annuus* (tournesol) (Blaylock *et al.*, 1997 ; Turgut *et al.*, 2004).

La capacité d'autres chélateurs tels que CDTA, DTPA, EGTA, EDDHA, et NTA d'augmenter l'accumulation en métaux a été également évaluée dans diverses espèces des plantes (Huang *et al.*, 1997 ; Lombi *et al.*, 2001).

L'efficacité d'accumulation du métal est directement liée à l'affinité du chélateur appliqué pour le métal. Ceci suggère qu'une phytoextraction efficace est subordonnée à l'utilisation d'un chélateur synthétique à forte affinité pour le métal d'intérêt ; par exemple, l'EDTA pour le plomb, l'EGTA pour le cadmium (Blaylock *et al.*, 1997), et peut-être le citrate pour l'uranium (Salt *et al.*, 1998).

Dans le cas de *Pinus radiata*, plante n'accumulant que 60-80 mg.kg⁻¹ de plomb naturellement, on peut observer des concentrations 5 à 6 fois supérieures de plomb dans les parties aériennes si les plantes sont traitées simultanément avec 500 µM de Pb et de 0,5 mM d'EDTA ou H-EDTA (Jarvis et Leung, 2002), l'ajout de chélateur n'influence pas seulement l'absorption racinaire mais aussi la translocation du contaminant des racines vers la partie aérienne (Lee *et al.*, 2002).

Toutefois, les risques induis par l'utilisation de chélateurs ne doivent pas être négligés. Les métaux lourds complexés avec le chélateur peuvent rester longtemps en solution et risquent d'être lessivés vers la nappe phréatique lors de pluies (Sun *et al.*, 2001 ; Romkens *et al.*, 2002 ; Jiang *et al.*, 2003). De plus, le chélateur peut se lier avec les éléments nutritifs (Ca, Fe et Mg) qui pourront dès lors être aussi sujet au lessivage et provoquer ainsi des carences minérales chez la plante (Whu *et al.*, 2004).

La seconde stratégie pour améliorer la phytoremédiation doit être basée sur (**Prasad, 2003**), l'utilisation des plantes chlorophylliennes et de leurs microbiotes associés pour éliminer, contenir ou rendre moins toxiques les contaminants environnementaux (**Bert et al., 2000**).

Dans certains cas, les micro-organismes telles les bactéries rhizosphériques et les champignons mycorhiziens (**Prasad, 2003**), peuvent, dans un premier temps, dégrader un composé récalcitrant pour permettre dans un deuxième temps l'absorption par la plante du ou des métabolites ainsi produits (**Sun et al., 2004**).

L'activité des micro-organismes est favorisée par la présence des plantes qui créent un environnement physicochimique approprié favorisant ainsi la dégradation microbienne des polluants organiques (**Corgie et al., 2004**). Les plantes sécrètent une substance de la racine qui peut être utilisée par les bactéries et favorise leur croissance et activité. Cette stimulation microbienne dans la rhizosphère de la plante modifie la bioaccumulation, oxydation/réduction biologique, et la biométhylation des métaux lourds (**Mulligan et al., 2001**), permettent d'extraire des métaux de milieux où ces derniers sont normalement insolubles (**Bourellet et Berthelin, 1998**).

Une grande diversité de microorganismes agit sur la biodégradation des hydrocarbures dans le sol (**Chaîneau et al., 1995**), Ils assimilent préférentiellement les n-alcanes et alcanes ramifiés, et peu les cycloalcanes. Les composés à haut poids moléculaire ne sont pas utilisés : ce sont les alcanes polycycliques et les cycloalkyles aliphatiques (**Sun et al., 2001**).

Au-delà de la rhizosphère, les hyphes de champignons mycorhiziens agissent comme les racines des plantes, et prolongent ainsi l'étendue de la rhizosphère en créant une nouvelle interface entre la plante et le sol : l'hyphosphère. Des résultats récents sur la phytoremédiation de polluants organiques sont discutés ici, et des hypothèses sur les mécanismes impliqués et les priorités pour les recherches futures dans ce domaine sont présentées (**Joner et Leyval, 2003**).

III-2- Création des plantes transgéniques à performances améliorées

Le choix des plantes était jusqu'à présent basé sur un processus de tolérance aux polluants et sur leur efficacité en matière de dépollution des sols (**Sun et al., 2004**). Plus récemment, une approche transgénique a été proposée pour optimiser la capacité des plantes qui présentent un intérêt en phyto-dépollution (**Peuke et Rennenberg, 2005**). Le premier choix se fait en fonction de la capacité de croissance et de production de biomasse mais aussi de l'adaptation au type du site à dépolluer (**Karavangeli et al., 2005 ; Wang et al., 2005 ; Kawahigashi et al., 2006**).

Certaines plantes possèdent naturellement des propriétés accumulatrices de métaux lourds, mais leur biomasse reste souvent limitée du fait de la toxicité des métaux lourds accumulés (**Song et al., 2003**). Par exemple, les espèces hyperaccumulatrices, comme *Thaispi Caerulescens*, sont des plantes en rosette de petite taille et difficiles à cultiver (**Raskin, 1997**), c'est pourquoi des techniques d'introduction de gènes responsables de l'accumulation et de la résistance métallique dans des plantes à forte production de biomasse ont été envisagées (**Salt et al., 1998**). Ces gènes peuvent être d'origine végétale, bactérienne ou encore animale (**Rugh et al., 1998**), cette stratégie vise à conférer, par génie génétique, des propriétés d'hyper-accumulation à des plantes à forte biomasse (tabac, moutarde, peuplier) (**Song et al., 2003**), afin d'améliorer l'efficacité de l'extraction par les plantes et notamment augmenter la tolérance et l'accumulation des métaux. Il s'agit aussi d'obtenir des racines plus développées et plus nombreuses, dans le but qu'elles puissent pénétrer plus profondément dans le sol, et ainsi atteindre des polluants en profondeur (**Dabouineau et al., 2005**), dans les zones anaérobies qui permet de détruire les contaminants organiques biodégradables (**Chaney et al., 1997**).

D'autres travaux ont porté sur la fusion de protoplastes, pour obtenir des hybrides de *T.caerulescens* et d'autres *Brassicacées*, le but étant d'allier le caractère hyperaccumulateur de *T.caerulescens* aux caractères de *Brassicacées* non hyperaccumulatrices, tels une forte productivité de biomasse et la facilité de récolte (**Mazoyer et François, 1998**).

Actuellement, ces approches restent limitées au stade expérimental car elles sont difficilement acceptées du grand public à cause de l'image négative des organismes génétiquement modifiés (OGM) (**Karavangeli et al., 2005 ; Wang et al., 2005 ; Kawahigashi et al., 2006**).

I-Introduction

Le genre *Atriplex* est le plus diversifié de la famille des *Chénopodiacées* (Le Houérou, 1992), il comprend environ 200 espèces réparties dans les régions tempérées, subtropicales et dans différentes régions arides et semi-arides du monde (Maalem, 2002), elles représentent une famille d'halophyte hyperaccumulatrice très importante et mérite une attention toute particulière (Bouchoukh, 2010). Cette famille de plantes halophiles est très répandue en Algérie.

L'espèce *Atriplex halimus* est présente, à l'état spontané, sur d'anciens sites miniers contaminés par divers métaux lourds (Lutts *et al.*, 2004). Dotée d'une biomasse aérienne et racinaire assez importante, elle constitue un outil efficace, relativement peu coûteux dans la lutte contre l'érosion et la désertification et dans la réhabilitation des terres dégradées (Abbad *et al.*, 2004), et riches en métaux lourds (Martinez *et al.*, 2011).

Pour une utilisation aisée en plein champ, nous avons mis au point un système de culture sous serre comme technique de base à la culture de plante d'*Atriplex halimus* qui a un polymorphisme morphologique important, dans le but d'évaluer la variabilité morphologique de ces populations

La culture d'*Atriplex halimus* a été entreprise pour analyser et étudier les effets des concentrations croissantes du Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur la survie et la croissance des plantes durant les premiers stades de développement, on a mis au point le dispositif expérimental dans la **figure 10** ci dessous. Les paramètres mesurés sont :

- Taux de germination ;
- Taux de levée ;
- Taux de survie ;
- Croissance des tiges.

II-Protocole expérimental

Nous avons pour un essai en blocs complet avec cinq (05) répétitions, chaque bloc est composé de cinquante (50) pots en plastique à fond perforé, contenant chacun trois (03) plantes et correspondant chacun à une provenance, ce qui donne : $50 \times 4 = 200$ pots pour tout le dispositif.

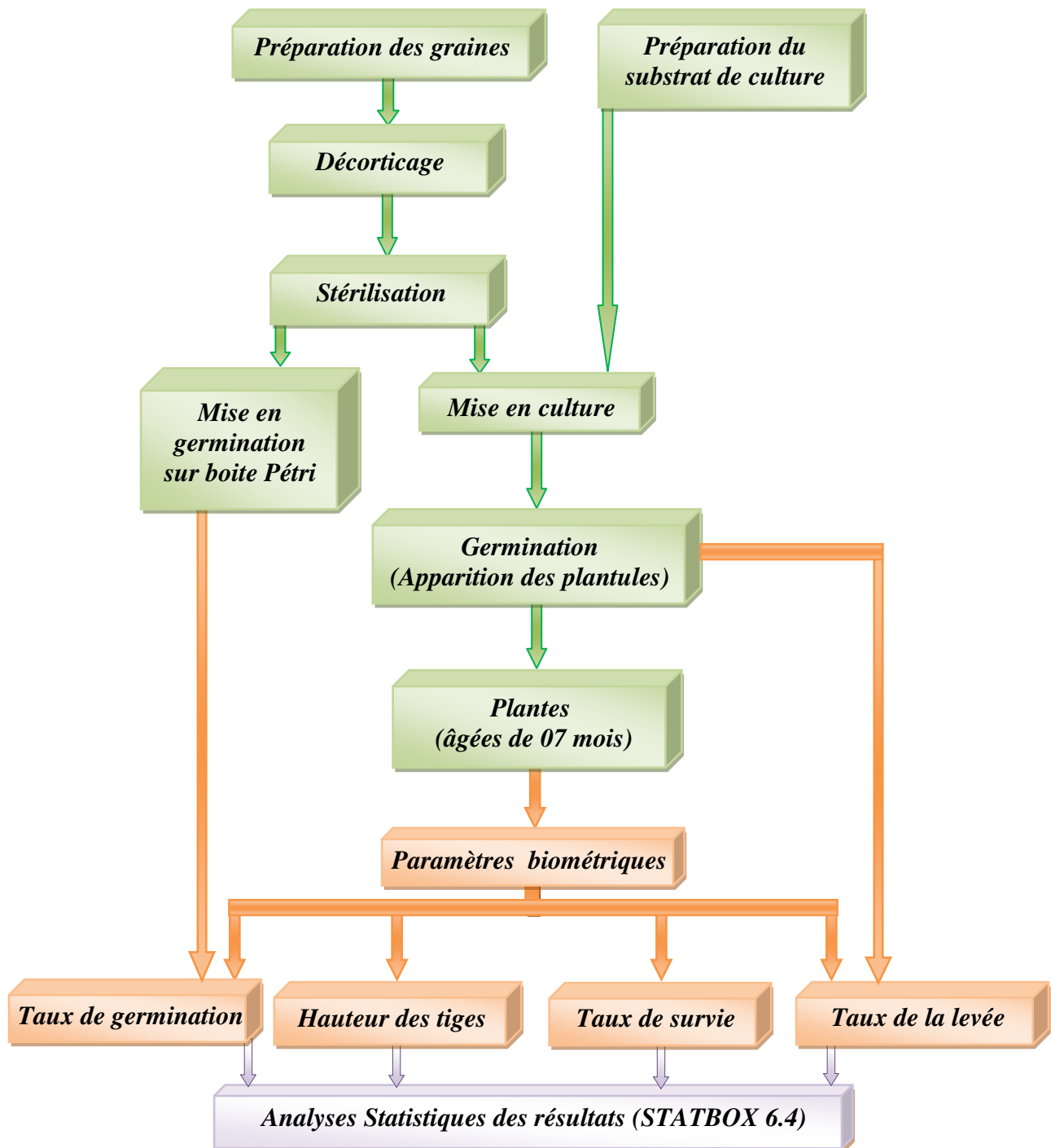


Figure 10. Organigramme montrant le protocole expérimental adopté de la culture d'*Atriplex halimus*.

III-Conduit de l'essai

III-1-Matériel sol

L'échantillon sélectionné pour cette étude est un sol provenant d'un site agricole situé près d'une activité industrielle, prélevés à une profondeur de 0-30 cm; il a été donc choisi de telle sorte qu'il se trouve sous l'influence des rejets des eaux usées de l'usine 'BCR', qui fabrique la boulonnerie et visserie (boulons, écrous, rondelles, plaquettes, rivets, goujons et tiges filetées) et est située au Nord-Ouest de la commune d'Oued Rhiou (Wilaya de Relizane).

La caractérisation physico-chimique de sol (**Tableau 7**) a permis de mettre en évidence l'équilibre de la fraction argileuse, sableuse et limoneuse. C'est un sol brun, loam-argileux et pauvre en matière organique qui présente une teneur de 2,59 %. La valeur moyenne du pH (7,73) situe le type de sol parmi les sols neutres à légèrement basiques et une faible capacité d'échange en cations. La concentration en métaux lourds (Cu, Pb et Cr) est estimée en ppm comme suit: Cu : 1,149, Pb : 3,36 et Cr : 1,09.

Tableau 7. Quelques caractéristiques physico-chimiques des substrats (Sol) avant la mise en culture d'*Atriplex halimus*.

Paramètres	Résultats
Texture	loam-argileux
Argile (%)	25,71
Limon fin (%)	3,99
Limon grossier (%)	31,26
Sable fin (%)	22,48
Sable grossier (%)	16,57
Calcaire total (%)	9,33
Carbone organique (%)	5,12
Matière organique (%)	2,59
Azote total (%)	0,09
pH-eau	7,73
Capacité d'échange cationique CEC (cmol/kg ⁻¹)	4
conductivité électrique élevée EC (ms/cm)	0,344
Cl (meq/l) Chlorure	14,925
CO ₃ ⁻² (meq/l) Carbonate	0
HCO ₃ ⁻¹ (meq/l) Bicarbonate	3
SO ₄ ⁻² (meq/l) Sulfate	29,78
Cuivre (ppm)	1,149
Plomb (ppm)	3,36
Chrome (ppm)	1,09

III-1-1-Préparation du substrat de culture

Le sol est séché à l'air libre, trié pour éliminer les débris végétaux et les cailloux, ensuite été homogénéisés puis tamisé à 2 mm. Il est ensuite homogénéisé, 600 g est pesé et placé dans chaque pot. Les pots utilisés pour les expérimentations sont en plastique (transparents) à fond perforé pour laisser l'eau s'écouler et ont un diamètre supérieur de 12 cm et un diamètre inférieur de 15 cm.

III-2-Matériel végétal

III-2-1-Echantillonnage et description de la provenance

L'échantillonnage (graines d'*Atriplex halimus*) a été effectué dans quatre (04) secteurs géographiques différents, ou quatre (04) provenances qui se situent dans le Nord-Ouest Algérien (**Figure 11** et **Tableau 8**). Qui ont fait l'objet de cette investigation:





- ✿ La première provient de la wilaya de Mostaganem (Kharouba), prélevée en bordure de la mer ;
- ✿ La deuxième provient de la wilaya Aïn Temouchent (Beni Saf), prélevée au niveau de la bifurcation de la route Nationale (N°22) ;
- ✿ La troisième provient de la wilaya Mascara (Sig), prélevée près d'une décharge publique ;
- ✿ La quatrième provient de la wilaya Relizane (Oued'Rhiou), prélevée sur un site pollué (Unité Industrielle) situé à l'aval d'une usine (BCR).

Les graines utilisées dans cette expérimentation ont été récoltées au début du mois de Décembre 2010, sauf celles de (Béni Saf) qui ont été récoltées au début de Novembre 2010.



Figure 11. Carte de situation des sites de récolte des graines d'*Atriplex halimus* (Ouest d'Algérie) (Anonyme, 2017).

Tableau 8. Coordonnées géographiques des sites de récolte.

Repère géographique	Kharouba 	Béni-Saf 	Sig 	Oued'Rhiou 
Latitude	35° 58'N	35° 20'N	35° 31'N	35° 57'N
Longitude	00° 06'E	1° 21' W	00° 11'O	00° 55'E

III-2-2-Préparation du matériel végétal (graines)

III-2-2-1-Décorticage des graines

Dès la récolte, les graines des quatre provenances ont été soigneusement dépoussiérées, puis séchées dans l'étuve pendant 24 heures à 45°C pour faciliter leur décorticage manuel. L'enlèvement des valves fructifères semble éliminer les inhibiteurs chimiques qui restreignent la germination (Osman et Ghassali, 1997).

III-2-2-2-Stérilisation des graines (Fatarna, 2007)

Les graines débarrassées de leurs valves fructifères ont subi le protocole de stérilisation suivant:

- 1) Trempage dans un bain d'éthanol à 95% pendant quelques secondes ;
- 2) Trempage dans un bain d'eau de Javel à 50% pendant 15 minutes;
- 3) Trois passages successifs dans des bains d'eau distillée stérile de 10 minutes chacun.

III-3-Mise en germination

Après avoir été stérilisées, les graines ont été directement mises à germer dans des boîtes Pétri stériles de 8,5cm de diamètre munies de papier filtre stérilisé à raison de 20 graines /boîte.

Ainsi pour chaque provenance, il est possible d'envisager (05) répétitions. Les boîtes (20) ont été transportées à l'étuve et arrangées selon une disposition complètement randomisée où elles ont été incubées à une température de 26°C±1 et à l'obscurité (Bajji *et al.*, 2002).

La germination des graines, (dont le critère est l'apparition d'une radicule d'une longueur supérieure à 1mm), a été révélée et comptabilisé chaque deux (02) jours et ce durant quatorze (14) jours. Les graines germées ont été éliminées des boîtes après chaque comptage (Abbad *et al.*, 2004).

III-4-Semis

Après avoir été stérilisées, les graines ont été directement semées le 02/12/2010 dans des pots à raison de (20 graines/pot).

III-5-Milieu de culture pour l'irrigation

L'application des nutriments et l'irrigation sont des facteurs importants déterminant la croissance et le rendement de la plante (Olympios, 1999). Le milieu utilisé est celui de Hoagland. L'irrigation se fait manuellement trois fois par semaine, deux fois à l'eau déminéralisée et une fois à la solution nutritive (Hoagland et Arnon, 1938) diluée au 1/1000^{ème}. Les constituants de milieu (HA) sont dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9. Concentrations des solutions mères constitutives du milieu de culture (Hoagland) (Hoagland et Arnon, 1938).

	Produit	Formule chimique	Concentration en g.l ⁻¹
Macroéléments	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 monopotassique	PO ₄ H ₂ K	54,40
	Hydrogenophosphate di-potassium	PO ₄ K ₂ H 3H ₂ O	34,23
Microéléments	Chlorure de manganèse	Cl ₂ Mn 4H ₂ O	1,80
	Sulfate de cuivre	CuSO 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

III-6-Installation de l'essai

L'essai a été installé dans une serre non contrôlée au niveau de la ferme située à Oued Rhiou. Les graines d'*Atriplex halimus* préalablement désinfectées, ont été mises dans des pots contenant du substrat 'sol' à raison de (20 graines/pot).

Dans le premier mois, l'irrigation se fait par l'eau distillée pour induire la germination, dès la cinquième semaine, nous avons poursuivi l'irrigation par le milieu Hoagland dilué au 1/1000^{ème}. La solution d'irrigation est mise dans des assiettes en plastique où sont disposés les pots. Ainsi l'alimentation hydrominérale des plantes est permise par le flux ascendant (par capillarité) de la solution nutritive. Au stade de six (06) feuilles le nombre de plantules est ramené à (01 plante/pot) (Figure 12).



Figure 12. Dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex halimus* L. de 60 jours

III-6-1-Protection de semis

Nous avons installé une sous serre en Toile blanche pour éviter toute menace de prédateurs (les insectes nuisibles, etc.), comme elle est illustrée dans la figure ci-dessous :



Figure 13. Protection de semis (Installation d'une sous serre).

IV-Paramètre étudié

IV-1-Paramètres biométriques

IV-1-1-Taux de germination

Après le semis, nous avons effectué le comptage des graines a germés dans chaque pot. Le paramètre de germination évalué pour chaque provenance est le taux de germination, qui correspond au pourcentage des graines d'*Atriplex halimus* germées après quatorze (14) jours. Selon **Côme (1970)**, le taux de germination pour chaque provenance est déterminé comme suit :

$$\text{Taux de germination en } \% = \frac{\text{Nombre des graines germées}}{\text{Nombre des graines semées}} \times 100$$

IV-1-2-Taux de levée

Le taux de levée correspond au pourcentage de plantules d'*Atriplex halimus* apparentes. Les observations sur la levée ont été effectuées pendant les trente (30) jours qui ont suivi le semis. Une graine a été considérée comme levée lorsque l'épicotyle était sorti du sol et que les cotylédons étaient devenus visibles (**Ng-Timothy et Tigchlaar, 1973**). Le taux de levée pour chaque provenance est déterminé comme suit :

$$\text{Taux de la levée en } \% = \frac{\text{Nombre des plantules levées}}{\text{Nombre des graines semées}} \times 100$$

IV-1-3-Taux de survie

Le taux de survie étant défini comme le rapport du nombre de plantes à chaque coupe au nombre de plantes initialement installées (**Mezni et al., 1999**). Il présente le nombre total des plantes d'*Atriplex halimus* restantes en vie par rapport au nombre total des plantules qui sont levées.

IV-1-4- Hauteur des tiges

Nous avons opté pour un échantillonnage (une seule plante/pot), soit un total de (200) plantes mesurées à chaque date, le choix des plantes est aléatoire au sein de chaque pot, et les différentes mesures des hauteurs des tiges ont été effectuées sur les mêmes plantes.

Les mesures des hauteurs des tiges ont été effectuées huit (08) jours après le semis à huit (08) dates différentes espacées de 30 jours.

A l'aide d'une règle graduée, on a mesuré la hauteur des plantes depuis le ras du sol jusqu'à l'apex.

I- Introduction

La contamination des sols par les métaux lourds (plomb, cuivre, chrome, etc.) est le plus souvent imputable à l'action de l'homme, qui a utilisé et continue à utiliser les métaux lourds parfois avec excès, souvent avec inconscience (**Miquel, 2001**). La contamination des sols par des métaux provenant d'installations de traitement des déchets ménagers n'affecte généralement pas les terrains sur des profondeurs très importantes et concerne surtout les couches superficielles (**Ablain, 2002**), d'où la nécessité d'utiliser une nouvelle approche, dont les priorités sont le maintien (ou le rétablissement) de la fertilité du sol et la réduction du coût économique de la remédiation. Cette approche consiste à utiliser le pouvoir des plantes pour puiser les métaux lourds contenus dans le sol et les accumuler dans leurs feuilles, leurs tiges et leurs racines.

Les métaux lourds les plus répandus, en terme d'occurrence sur les terrains contaminés sont le plomb (Pb) et le chrome (Cr) (**Remon, 2006**) ; ces éléments en sus du risque de phytotoxicité, il existe le fait que des produits végétaux sont consommés directement ou après transformation, par l'Homme et/ou par l'animal. Dans ce cas les produits végétaux sont un vecteur de substances potentiellement polluantes (**Kdem, 2005**).

La toxicité du chrome vis à vis des plantes comme de tout organisme vivant varie selon sa forme chimique (**Vazquez et al., 1987**) ; le Cr(III) est en général moins toxique pour les plantes que le Cr(VI) du fait de sa faible solubilité. Cependant à de fortes concentrations, le Cr(III) peut causer de sérieux dommages dans les tissus (**Shahandeh et Hossner, 2000**). Ainsi que différents dérèglements physiologiques et moléculaires sont à l'origine d'une contamination par le plomb (**Ernst, 1998 ; Seregin et Ivanov, 2001**). L'évaluation de la toxicité causée par ces éléments traces métalliques sur les plantes constitue un outil très important pour la recherche dans le domaine de la phytoremediation. Plusieurs paramètres physiologiques peuvent être utilisés pour évaluer le stress induit par des éléments traces métalliques tels que la germination, la croissance et la production en biomasse, la teneur en pigments chlorophylliennes et les activités des enzymes antioxydants (**Kavuličova et al., 2012**).

La recherche de gains de sensibilité pour le dosage des métaux coûte cher en argent et en temps. Une alternative consiste à utiliser les bio-indicateurs (incluant les bio-accumulateurs). Le choix se porte sur des organismes qui sont facile d'accès et abondants. Les plantes d'*A. halimus* répondent à ces critères.

Dans son environnement naturel *A. halimus* est soumis à divers stress, autres que ceux salin et hydrique. Parmi ces contraintes, la compétition entre génotypes et la présence des métaux lourds dans le sol sont évoquées (**Dutuit, 1999**). Généralement la présence des métaux lourds dans la plante est liée leurs présence dans le sol (**Kozłowski et al., 2001**). Pour comprendre pleinement les risques que

représentent ces micro-polluants vis-à-vis des organismes vivants, il faut commencer par étudier les possibilités de transfert du sol au vivant.

Le présent travail a pour objectif de déterminer le comportement écophysiological de l'espèce d'*Atriplex halimus* L. sous l'impact d'un stress métallique induit par différentes doses des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)), ajoutées à la solution nutritive afin d'évaluer le seuil de tolérance de cette espèce au stress métallique, en analysant des paramètres biométriques, physiologiques et biochimiques.

II-Protocole expérimental

Le dispositif expérimental adopté est en bloc randomisé avec cinq (05) répétitions, chaque bloc est composé de : plantes témoins (d0) reçoivent la solution nutritive tous au long de l'expérimentation et 03 autres lots de plantes sont stressés à 03 concentrations croissantes (d1, d2 et d3) de 03 métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI), correspondant chacun à une des 04 provenances étudiées Le dispositif est représenté dans la **figure 14**.

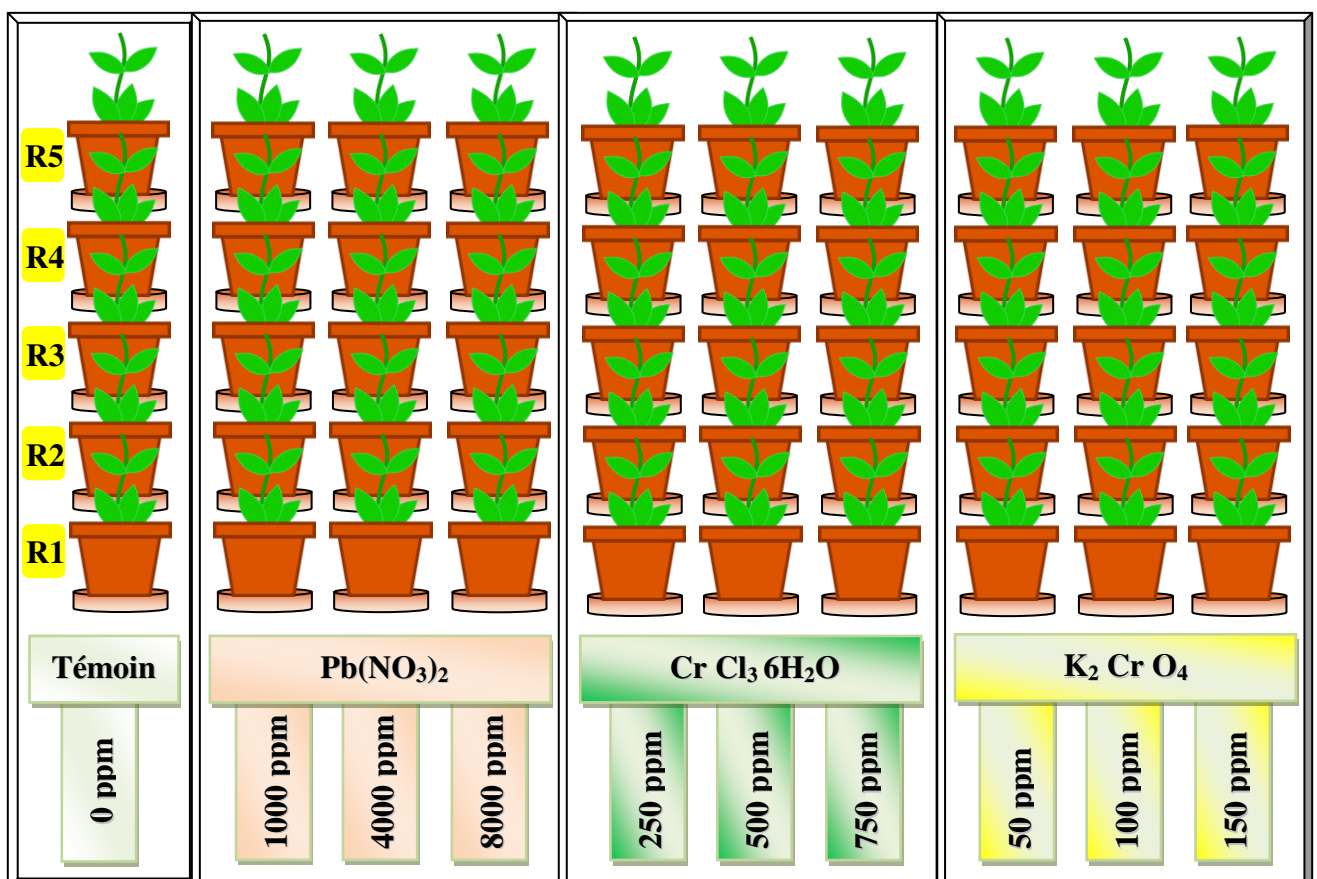


Figure 14. Dispositif expérimental de l'essai conduit sous serre.

II-1- Conduit de l'essai

Après 32 semaines de la date de semis des plantes issues par la culture sous serre, les solutions de métaux lourds ont été appliquées sur les plantes aux concentrations prédéfinies. Ces solutions ont été toujours préparées à un pH compris entre (5,6 et 5,8).

Les plantes traitées sont arrosées une seule fois aux différentes solutions métalliques ensuite elles reçoivent la solution nutritive tous les trois jours jusqu'à la fin de l'expérimentation:

- Un 1^{er} lot de plantes est stressé à 1000, 4000 et 8000 ppm de nitrate de plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) ;
- Un 2^{ème} lot de plantes est stressé à 250, 500 et 750 ppm de chlorure de chrome ($\text{Cr Cl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ;
- Un 3^{ème} lot de plantes est stressé à 50, 100 et 150 ppm de chromate de potassium ($\text{K}_2 \text{CrO}_4$).

Après le recours à l'étude des différents paramètres ont eu lieu selon le dispositif (**Figure 15**). Durant toute la période de l'expérimentation, une observation visuelle (décoloration, jaunissement, pigmentation, nécroses, flétrissement, etc.) et une mesure de croissance de la partie aérienne des plantes (nombre de feuilles et longueur tige) sont réalisées chaque semaine.

II-1-1- Application du stress métallique

Pour tester les effets des 03 différentes concentrations pour chaque métal : (1000, 4000 et 8000 ppm) de Pb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), (250, 500 et 750 ppm) de Cr(III) ($\text{Cr Cl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et (50, 100 et 150 ppm) Cr(VI) ($\text{K}_2 \text{CrO}_4$) sur les quatre (04) provenances (Kharouba, Béni Saf, Sig et Oued'Rhiou) (**Tableau 10**).

Tableau 10. Composition des solutions métalliques.

Solutions Métalliques		Concentrations (en ppm)		
Métal lourd	Formule chimique			
Pb	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	1000	4000	8000
Cr(III)	$(\text{Cr Cl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$	250	500	750
Cr(VI)	$(\text{K}_2 \text{CrO}_4)$	50	100	150

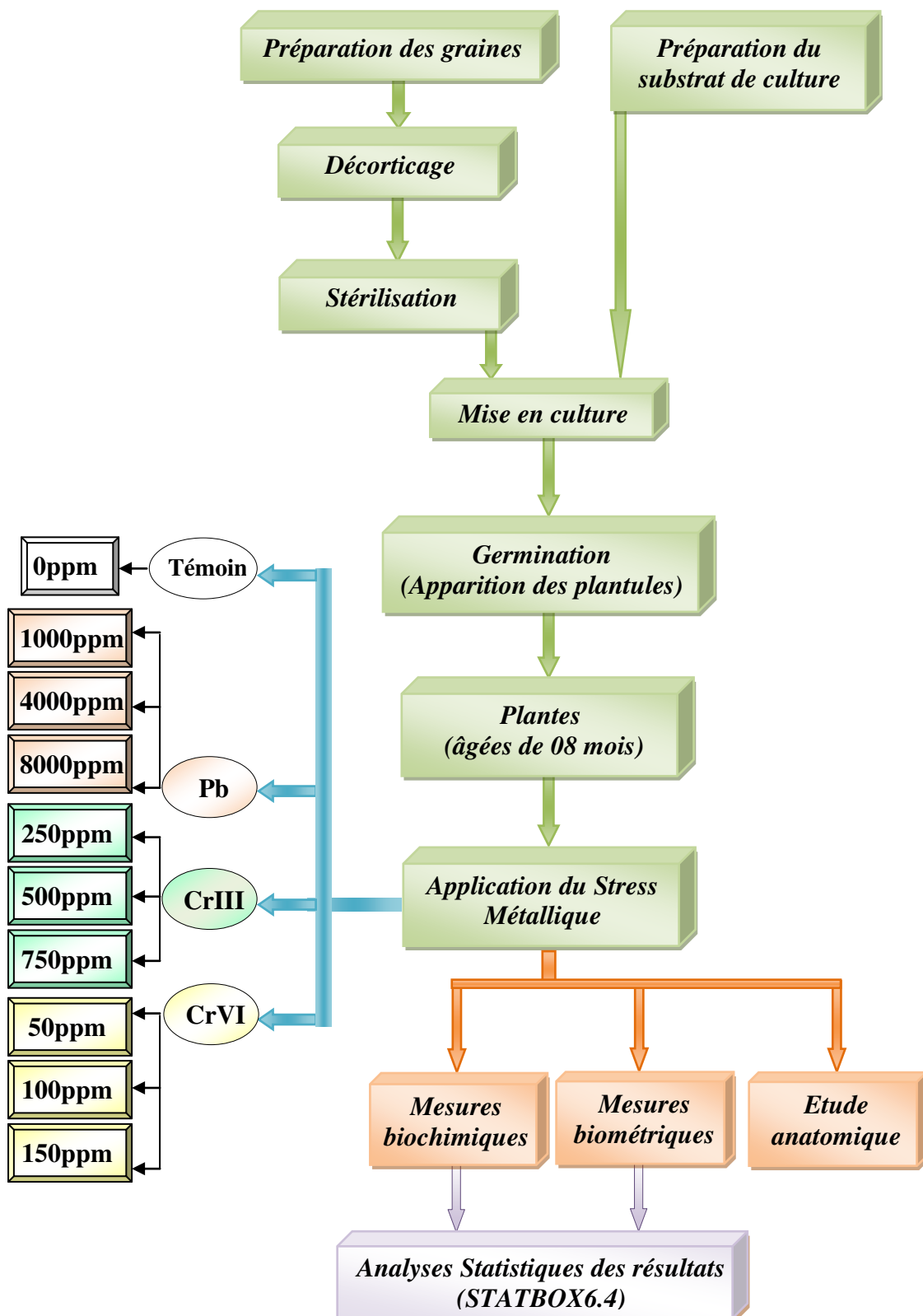


Figure 15. Organigramme montrant le protocole expérimental adopté pour l'impact des métaux lourds sur d'*Atriplex halimus*.

II-1-2- Prélèvement, préparation et conservation des échantillons pour analyses

Les plantes qui ont été récoltées un (01) mois après la contamination, ont été rincées à l'eau du robinet puis à l'eau distillée pour éviter toute contamination en métaux lourds due à un contact entre (les feuilles, les tiges ou les racines) et le substrat, après avoir été débarrasser de toutes particules étrangères à la nature de la plante. Ensuite elles ont été fractionnées manuellement en parties aériennes (feuilles et tiges) et souterraines (racines) (**Figure 16**).

Après le séchage des différentes parties des plantes, nous déterminons le taux de matière sèche par rapport à la matière fraîche d'*Atriplex halimus*. Ensuite ces échantillons vont subir de nouveau un deuxième séchage, qui se fait dans une étuve à 55°C pendant 24h pour faciliter leur broyage.

L'homogénéisation, étape indispensable à l'obtention d'un échantillon d'analyse, est réalisée par broyage à l'aide d'un broyeur en porcelaine (mortier), puis on conserve la poudre dans des tubes étiquetés avec le code de l'échantillon, sa dénomination et sa date de récolte, fermés hermétiquement rangés dans une armoire à l'abri de la lumière, pour éviter toute détérioration de l'échantillon.

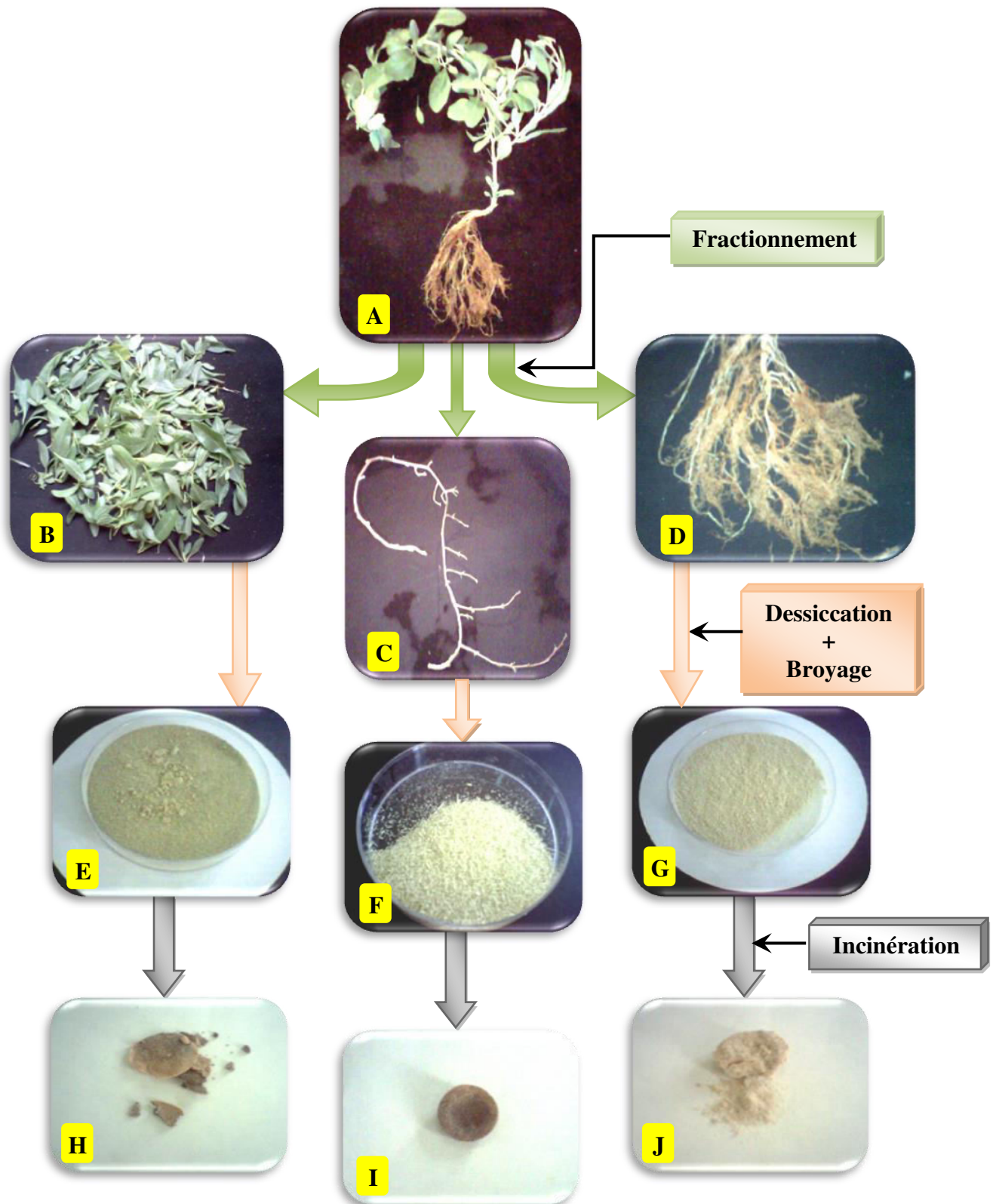


Figure 16. Organigramme montrant les différentes méthodes expérimentales de traitements des plantes d'*Atriplex halimus* utilisées.

A : Plantes après déterrement ; **(B**: Feuilles, **C**: Tiges et **D**: Racines "Fractionnées") ; **(E**: Feuilles, **F**: Tiges et **G**: Racines, "Séchées puis Broyées") ; **(H** : Feuilles, **I** : Tiges et **J** : Racines, "Incinérées").

III- Paramètres étudiés

Afin de déterminer l'effet des différents traitements de métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur l'espèce étudiée (*Atriplex halimus* L.), des paramètres biométriques et biochimiques ont été mesurés.

III-1- Taux de survie

Le taux de survie est calculé par rapport au nombre total des plantes issues par la culture sous serre juste avant la contamination par les trois (03) différentes concentrations des métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI). Il présente le nombre total des plantes restantes en vie par rapport au nombre total des plantes qui ont été en vie juste avant la contamination.

III-2- Paramètres biométriques

III-2-1- Nombre des feuilles et Croissance en longueur

A la fin de l'expérimentation, la croissance en longueur de la partie aérienne et racinaire et le nombre de feuilles ont été évalués, de la manière suivante :

Après lavage par jet d'eau distillée pour éliminer toutes particules contaminantes, les plantes ont été soigneusement essuyées sur du papier filtre. La partie aérienne est séparée du système racinaire au niveau du collet.

La longueur de tige et de racine principale est mesurée en centimètres (cm) à l'aide d'une règle graduée. Les valeurs données sont les moyennes obtenues de cinq répétitions/traitement.

La hauteur de partie aérienne de chaque plante a été mesurée chaque semaine après l'application des traitements au plomb, au Cr(III) et au Cr(VI).

III-2-2- Détermination de la matière sèche, de la matière organique et des cendres (Sauvant, 1988)

Cette détermination a pour but d'apprécier la teneur en eau résiduelle dans la plante étudiée *Atriplex halimus* de façon à préciser les conditions de conservation, mais aussi d'apporter la base de calcul des autres éléments dont la teneur est exprimée soit en g/g ou g/Kg MS.

III-2-2-1- Détermination de la matière sèche

1) Principe

On procède à la dessiccation de l'échantillon dans l'étuve à 70 à 80°C pendant 24h.

2) Matériel

- ⊕ Balance à 1mg de précision ;
- ⊕ Creusets en porcelaine ;
- ⊕ Un dessiccateur ;
- ⊕ Etuve réglée à 80°C ;
- ⊕ Spatule.

3) Mode opératoire

Pour déterminer le taux de la matière sèche 1g de l'échantillon est pesé (P_0) dans un creuset en porcelaine préalablement taré (P_1), ensuite il est placé dans une étuve réglée à 80°C pendant 24h, après cette étape les creusets sont transportés soigneusement en évitant toute source d'humidité vers le dessiccateur, puis nous notons le poids P_2 , la masse perdue présente l'humidité, ce qui reste c'est la matière sèche résiduelle.

4) Formule et calcul

Le taux d'humidité est calculé par différence entre le poids frais et le poids sec.

$$\% \text{ (MS)} = \frac{P_2 - P_1}{P_0} \times 100 \qquad \% \text{ H}_2\text{O} = 100 - \% \text{ MS}$$

- ❖ P_0 : le poids initial de l'échantillon.
- ❖ P_1 : le poids du creuset.
- ❖ P_2 : le poids du creuset et du résidu.

III-2-2-2- Détermination des cendres ou la matière minérale totale

1) Principe

La minéralisation ou l'incinération de l'échantillon sec s'effectue dans un four à moufle à 550°C pendant huit (08) heures.

2) Matériel

- ⊕ Balance à 1mg de précision ;
- ⊕ Creusets en porcelaine ;
- ⊕ Un dessiccateur ;
- ⊕ Four à moufle ;
- ⊕ Spatule.

3) Mode opératoire

Après la détermination de sa teneur en matière sèche, l'échantillon est mis dans un four à moufle à une température de 550°C pendant 8h. Les cendres obtenues sont refroidies pendant une demi-heure avant de le mettre dans le dessiccateur pour avoir un poids constant, puis l'échantillon est pesé pour avoir un nouveau poids (P₃) qui détermine le taux de cendres.

4) Formule et calcul

La teneur en cendres est calculée selon la formule suivante :

$$\% \text{ Cendres (MM)} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \times 100$$

- ❖ P₁ : le poids du creuset.
- ❖ P₂ : le poids du creuset de l'échantillon.
- ❖ P₃ : le poids du creuset et du résidu après calcination.

III-2-2-3- Détermination de la matière organique

La matière organique (MO) est déterminée par différence :

$$\% \text{ MO} = 100 - \% \text{ MM}$$

III-2-3- Teneur en eau relative

Le contenu relatif en eau est mesuré à partir des masses fraîches (FW), turgescente (TW) et sèche (DW) d'un matériel végétal (feuilles). Il est donné par l'équation de **Barrs et Weatheley (1968)**:

$$\text{RWC (\%)} = [(FW-DW) / (TW-DW)] \times 100.$$

FW = Poids frais ;

TW = Poids à saturation ;

DW = Poids sec.

La masse fraîche est mesurée immédiatement après le prélèvement des feuilles. La masse turgescente est obtenue après 24heures de contact de la feuille avec du papier filtre humide, en atmosphère confinée à 4°C et à l'obscurité. La masse sèche est déterminée après passage des échantillons dans l'étuve à 60 °C pendant 48 heures (poids constant).

III-3- Paramètres physico-chimiques des substrats étudiés**III-3-1- Mesure du pH (Moreno *et al.*, 1996)**

10g de sol auxquels nous avons ajouté 50ml d'eau distillée sont agités à l'aide d'un agitateur magnétique. Après 30 minutes de décantation, le pH du surnageant est mesuré à l'aide d'un pH-mètre.

III-3-2- Analyses des métaux lourds dans les différents substrats (Saidi, 2005)

A chaque traitement prospecté, des échantillons de sol issus a partir de la culture d'*Atriplex halimus* ont été prélevés, séchés à l'air puis tamisés (< 2 mm) et ensuite broyés (<180 µm). Le sol finement moulu est ensuite minéralisé dans un mélange HCl et HNO₃ concentré (3/1).

Les concentrations en Plomb et en Chrome sont analysées par un Spectrophotomètre à Absorption Atomique à une longueur d'onde de 217nm sur des extraits préalablement filtrés (filtre Watmann sans cendre grade 392).

III-4- Dosage des métaux lourds dans les plantes (Vogel-Milkus *et al.*, 2005)

La matière sèche produite par pot a été broyée dans un mortier en porcelaine sec à surface lisse préalablement nettoyé, et homogénéisée pour les analyses. 30 mg de chaque échantillon sont minéralisés par 3,5 ml de mélange (HNO₃/HClO₄) (7V/1V) et incubée à l'obscurité pendant 24 heures puis diluée dans 5ml de HNO₃ à 0,2 %, ensuite transférer le tout dans un tube de polypropylène et enfin refermer le tube et agiter fortement afin de rendre le contenu homogène.

Les mesures des concentrations en Plomb et en Chrome sont réalisées par un passage au Spectrophotomètre à Absorption Atomique à une longueur d'onde de 217nm sur des extraits préalablement filtrés (filtre Watmann sans cendre grade 392).

III-4-1- Calculs du facteur de translocation (FT)

La capacité d'une plante à accumuler des polluants à partir de son environnement peut s'évaluer au travers du facteur de translocation (FT), qui traduit la capacité d'une espèce végétale à transférer un métal lourd de ses racines vers ses parties aériennes (tige, feuilles, etc.) (Chen *et al.*, 2011), ce facteur est défini comme suit:

$$\text{Facteur de translocation (FT)} = \frac{\text{Concentration du métal dans les parties aériennes (mg.kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentration du métal dans les racines (mg.kg}^{-1}\text{)}}$$

III-5- Paramètres biochimiques

III-5-1- Dosage de la chlorophylle

L'extraction de la chlorophylle (a) et (b) est réalisée selon la méthode de **Francis (1970)**, qui consiste en une macération 0,1g de feuilles dans 10ml d'un mélange de l'acétone et de l'éthanol (75% et 25%) de volume et de (80% et 20%) de concentration ; les feuilles sont coupées en petits morceaux et mises dans les boîtes noires (pour éviter l'oxydations de la chlorophylle par la lumière), après 48h, on procède à la lecture des densités optiques des solutions avec un Spectrophotomètre UV, à deux longueurs d'ondes : (645 et 663 nm). La détermination des teneurs est réalisée selon les formules suivantes :

$$\oplus \text{ Chl a } (\mu\text{g/g MF}) = 12,7 \times \text{DO}_{(663)} - 2,59 \times \text{DO}_{(645)} \times V/(1000 \times W) ;$$

$$\oplus \text{ Chl b } (\mu\text{g/g MF}) = 22,9 \times \text{DO}_{(645)} - 4,68 \times \text{DO}_{(663)} \times V/(1000 \times W) ;$$

$$\oplus \text{ Chl (a+b) } (\mu\text{g/g MF}) = \text{Chl a} + \text{Chl b}.$$

V : Volume de la solution extraite ;

W: Poids de matière fraîche de l'échantillon.

III-5-2- Dosage des sucres solubles

Les sucres simples (glucose, fructose et saccharose) sont extrais par un solvant capable de les solubiliser et de bloquer les activités enzymatiques susceptibles de les dégrader (**Shields et Burnett, 1960**).

Le principe de la réaction est basé sur la condensation des produits de dégradation des oses neutres par l'acide sulfurique. Ce dernier très concentré transforme à chaud les oses en dérivés furfurals donnant une coloration bleu vert avec l'anthrone. L'extraction des sucres réducteurs a été réalisée suivant les techniques décrites par **Gomez (2003)**.

Une pesée de 100 mg des feuilles d'*Atriplex halimus* prélevées est introduite dans un tube à essai contenant 5,25 ml d'éthanol à 80%, pendant 20 heures ; 2 ml sont prélevés de l'extrait préalablement dilué 10 fois avec l'éthanol 80% (réactif A). 4 ml du réactif, composé de 2 g d'anthrone pur additionné à 01 litre d'acide sulfurique (réactif B), sont ajoutés au réactif A. Le réactif B est préparé 04 heures à l'avance avant la réalisation de l'essai.

L'ensemble est délicatement mélangé et maintenu dans la glace fondante. Après agitation les tubes sont placés dans un bain-marie à 92°C pendant 08 mn et ensuite laisser le tout est refroidit pendant 30 mn à l'obscurité. L'absorbance est lue au Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 585 nm et la concentration des sucres solubles est exprimée en mg.g⁻¹ de MF.

III-5-3- Dosage de la proline

La proline est dosée selon la technique utilisée par **Troll et Lindesly (1955)**, simplifiée et mise au point par **Dreier et Goring (1974)** et modifiée par **Monneveux et Nemmar (1986)**. Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique. La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de proline dans l'échantillon. L'extraction de la proline consiste à :

- Prélever 100 mg de matière fraîche foliaire et racinaire pour chaque répétition et les mettre dans des tubes à essai ;
- Ajouter 2 ml de Méthanol à 40 % ;
- Porter les tubes couverts (pour éviter la volatilisation de l'alcool) à l'ébullition au bain-marie à 85 °C pendant 60 min ;
- Prélever, après refroidissement, 1 ml de l'extrait de chaque tube et mettre dans de nouveaux tubes auxquels on ajoute 1 ml d'acide acétique ;
- Ajouter, dans chaque tube, 1 ml de mélange contenant 120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique, 80 ml d'acide orthophosphorique (H_3PO_4 , densité 1,7) et 25 mg de ninhydrine ;
- Porter le mélange à ébullition durant 30 min. La couleur de la solution vire vers le rouge ;
- Extraire le chromatophore, après refroidissement des solutions, avec 5 ml de toluène; deux phases se séparent après agitation au Vortex ;
- Prélever la phase supérieure contenant le chromatophore à laquelle on ajoute 5 mg du sulfate de sodium oxydé ($Na_2 SO_4$) à l'aide d'une spatule pour éliminer l'eau qu'elle contient ;
- Lire la densité optique des échantillons à l'aide d'un Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 528 nm et la concentration de la proline est exprimée en $\mu g.g^{-1}$ de MF.

III-5-4- Dosage des composés phénoliques

III-5-4-1- Extraction des composés phénoliques

III-5-4-1-1- Préparation des extraits bruts (composés phénoliques)

Une quantité de 1 g de poudre de chaque partie de la plante d'*Atriplex halimus* est macérée dans 20 ml du méthanol absolue pendant 48 heures à température ambiante. Après filtration, les solutions méthanoliques des parties concernées (feuilles et tiges) sont évaporées à sec sous pression réduite dans un évaporateur rotatif type Büchi Rotavapor R-200 à 60°C. Les résidus secs pesés sont repris par 3 ml du méthanol et conservé à +4°C dans l'obscurité (Benhammou *et al.*, 2008).

III-5-4-2- Dosage des phénols totaux (Gallet et Libreton, 1995)

La teneur en phénols totaux des extraits des plantes a été déterminée par la méthode de Singleton et Ross (1965), utilisant le réactif de Folin–Ciocalteu. Un volume de 200 µl pour chaque extrait est introduit dans des tubes à essais, le mélange (1 ml de Folin Ciocalteu dilué 10 fois et 0,8 ml de carbonate de sodium Na₂CO₃ à 7,5 %) est additionné. L'ensemble des tubes est soumis à une agitation au vortex et conservés à l'obscurité et à température ambiante durant 30 min.

L'absorbance est mesurée à 765 nm en utilisant le spectrophotomètre UV. Une courbe d'étalonnage est réalisée par l'acide gallique à différentes concentrations et pratiquée dans les mêmes conditions opératoires que les échantillons. Les teneurs en phénols totaux dans les extraits sont exprimées en milligramme (mg) équivalent d'acide gallique par gramme (g) du poids de la matière sèche (mg EAG/ g MS).

III-5-4-3- Dosage des tannins condensés

Les quantités des tannins condensés sont estimées en utilisant la méthode à vanilline en milieu acide (Julkunen-Titto, 1985).

Un volume de 50 µl de l'extrait brut, de la solution méthanolique, est ajouté à 1500 µl de la solution vanilline/méthanol (4 %, m/v) et puis mélangé à l'aide d'un vortex. Ensuite, 750 µl de l'acide chlorhydrique concentré (HCl) est additionné et laissé réagir à la température ambiante et à l'obscurité pendant 20 min. L'absorbance à 550 nm est mesurée contre un blanc. La concentration des tannins est estimée en milligramme (mg) équivalents de catéchine par gramme (g) du poids de la matière sèche (EC)/g).

III-5-4-4- Dosage des flavonoïdes

La quantification des flavonoïdes a été effectuée par une méthode colorimétrique adaptée par **Zhishen et al. (1999)**. Une quantité de 500 µl de solution méthanolique à différentes concentrations ou de l'extrait méthanolique dilués est ajoutée à 1500 µl de l'eau distillée. Au temps zéro, 150 µl de nitrite de sodium (NaNO₂) à 5 % est ajouté au mélange. Après 5 min à température ambiante à l'obscurité, Ce mélange est ensuite additionné de 150 µl de trichlorure d'aluminium (AlCl₃) à 10 % (m/v). Après l'incubation de 6 min à la température ambiante, 500 µl d'hydroxyde de sodium (NaOH) 1M est additionné. Immédiatement, le mélange est complètement agité au vortex. L'absorbance de la solution de couleur rosâtre est mesurée à 510 nm contre le blanc.

Une courbe d'étalonnage qui servira à la quantification des flavonoïdes est réalisée par le catéchine à différentes concentrations (0-200 µg/ml) et pratiquée dans les mêmes conditions opératoires que les échantillons. La teneur en flavonoïdes des extraits des plantes d'*Atriplex halimus* est exprimée en milligramme (mg) équivalents de catéchine par gramme (g) du poids de la matière sèche (EC)/g).

III-6- Etude anatomique

Une approche de la structure anatomique de l'espèce étudiée s'avère intéressante. D'après **Smail Saadoun (2005)**, *Atriplex halimus* L. étant une halophyte, son adaptation anatomique est corrélée à une adaptation physiologique.

L'étude anatomique des tissus constituant l'organisme d'*Atriplex halimus*, a permis de préciser l'effet des stress métalliques sur la disposition des tissus conducteurs et des tissus fondamentaux chez cette espèce.

III-6-1- Microscopie électronique à balayage (MEB) couplée avec l'EDX

Nous avons utilisé le microscope électronique à balayage, au niveau du laboratoire de Microscopie à l'Université de Tlemcen, pour tenter de localiser les métaux lourds dans les feuilles, tiges et les racines d'*Atriplex halimus* soumis à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI).

En effet, le MEB à pression variable permet d'observer l'anatomie de tout type d'échantillon sans aucune préparation préalable c'est-à-dire sans y déposer une couche conductrice (qui est une étape essentielle de préparation des échantillons dans le cas des MEB classiques à vide très poussé) ce qui permet d'examiner une vaste gamme d'échantillons.

Une analyse par Spectrométrie de Dispersion en Energie des rayons X (EDX) a été effectuée sur l'ensemble des échantillons étudiés (racines, tiges et feuilles) traitées aux Pb, Cr(III) et au Cr(VI), qui permet un examen quantitatif des éléments chimiques. Elle a été utilisée pour vérifier les teneurs réelles en métaux lourds déposés sur chacun des catalyseurs.

III-6-1-1- Principe général d'un Microscope électronique à balayage (MEB)

Le principe général de fonctionnement d'un MEB consiste à balayer successivement, ligne par ligne, la surface de l'échantillon avec un faisceau d'électrons puis à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau électronique incident (Beaunier *et al.*, 1990).

Cette analyse permet l'observation de la morphologie de surface (répartition et reliefs) avec une profondeur de champ beaucoup plus importante qu'en microscopie optique.

III-6-1-2- Réalisation des coupes anatomiques au Microscope électronique à balayage

Des échantillons de feuilles, de racines et de tiges des plantes considérées ont été examinés à l'aide d'un microscope électronique à balayage de marque HITACHI TM 1000 à filaments de tungstène (Figure 17).

L'étude anatomique consiste à réaliser des coupes transversales de feuilles, tiges et de racines. Les échantillons de différents organes frais d'*Atriplex halimus* ont été coupés au scalpel (0,1 cm). Ils ont ensuite été fixés sur un dispositif métallique (Figure 18). L'observation des échantillons s'est faite sous mode environnemental avec une accélération de voltage de 20 kV et en manœuvrant à une distance de l'ordre de 15 mm.



Figure 17. Microscope électronique à balayage.

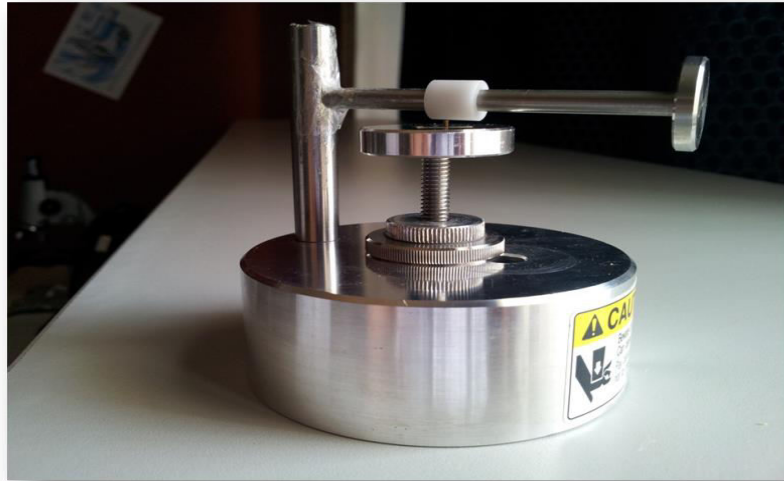


Figure 18. Dispositif métallique de fixation des échantillons examinés par microscopie électronique à balayage.

IV- Analyse statistique

Tous les résultats obtenus dans les deux Chapitres ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) par le test de **NEWMAN- KEULS** au seuil de 5% réalisée sur le logiciel **STAT-BOX** Version "4.6". Le logiciel **EXCEL** a été utilisé en vue de calcul de la moyenne et de l'écart-type pour l'établissement des graphes.

I-Paramètres biométriques

I-1- Taux de germination

La germination est un stade critique dans le cycle de vie et du développement de plusieurs plantes désertiques. Elle assure la reproduction et, par conséquent, contrôle la dynamique des populations (**Radosovich et al., 1997**). Le comptage des graines germées pour les quatre (04) provenances a débuté à partir du deuxième jour après la mise en germination, au bout de quatorze (14) jours.

Tableau 11. Taux de germination des graines d'*Atriplex halimus*, des quatre provenances \pm Ecart-Type.

Provenance	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
Taux de germination (en %)	98,25 \pm 1,71	97,75 \pm 2,63	95,25 \pm 2,50	98,00 \pm 0,82

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 01, Annexe 01**), montrent que le facteur "Provenance" n'influe pas de manière significative sur le taux de la germination avec une probabilité de $P=0,192$.

A partir du **tableau 11** : on peut constater que le taux de germination des graines le plus élevé est enregistré par la provenance « Kharouba » avec un taux de 98,25%, suivit des provenances « Oued Rhiou et Béni Saf » avec les taux respectivement : 98% et 97,75% chacune, et 95,25% pour la provenance « Sig », qui a un taux le plus faible. L'inaptitude à la germination de certaines graines peut être d'origine tégumentaire, embryonnaire ou due à des substances chimiques associées aux graines, ou dormance complexe (**Bensaid, 1985**).

Les chercheurs du **Cemagref (1983)** et **Hassnaoui (1992)**, signalent que quand le taux de germination est supérieur à 85%, on considère que la germination est satisfaisante.

Toutes les provenances testées présentent un taux de germination satisfaisant. Ces résultats sont en accord avec des données publiées précédemment par **Márquez-García et al. (2013)**, avec des graines de la même espèce. Selon **Lasnier-Lachaise (1973)**, l'énergie germinative est la rapidité de germination, elle n'est pas forcément en rapport avec la faculté germinative. En fait, des travaux ont rapporté depuis longtemps que la germination des halophytes est d'autant plus complète et rapide que le milieu où sont immergées est plus dilué (**Chapman, 1954**).

La germination des graines est le premier stade de vie des plantes et elle est l'un des processus physiologiques les plus sensibles qui peut être influencé par des facteurs environnementaux, biotiques et/ou abiotiques (**Moosavi et al., 2012**). Par conséquent, l'étude du stade de la germination constitue un outil considérable pour comprendre les mécanismes toxiques des contaminants environnementaux sur les plantes (**Cheng et Wong, 2002 ; Liu et al., 2012**).

I-2- Taux de la levée

La levée constitue un premier diagnostic d'une culture, une mauvaise levée peut avoir plusieurs causes liées à la conduite culturale (semis trop profond, ou trop superficiel), climatique (gel hivernal), capacité germinative des graines, etc.

Le comptage des plantules germées pour les quatre (04) provenances a débuté à partir du deuxième jour après le semis, au bout de deux mois, après la levée de la plupart des plantules.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 02, Annexe 02**), montrent que le facteur "Provenance" n'influe pas de manière significative sur le taux de la levée avec une probabilité de $P=0,474$.

Tableau 12. Taux de levée des graines d'*Atriplex halimus*, des quatre provenances \pm Ecart-Type.

Provenance	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
Taux de levée (en %)	57,00 \pm 8,29	55,25 \pm 9,67	48,25 \pm 7,80	51,00 \pm 7,79

A partir du **tableau 12**, on peut constater que le taux de levée des graines le plus élevé est enregistré par la provenance « Kharouba » avec un taux de 57%, suivit des provenances « Béni Saf, Oued'Rhiou et Sig » avec les taux respectivement : 55,25%, 51,00% et 48,25%.

Le taux de la levée des graines peut nous donner une approche sur le taux de réussite de la culture et la capacité de résistance des graines d'*Atriplex halimus* des différentes provenances aux conditions externes défavorables, d'après les résultats illustrés dans le **tableau 12**, on peut noter que le taux de la levée est variable en fonction du facteur "Provenance", cela peut être due probablement à l'état physiologique des graines, ou même à l'espèce en cause, puisque l'*Atriplex halimus* présente un polymorphisme très remarquable (**Ben Ahmed et al., 1996**).

I-3- Taux de survie

Après sept mois de la date de semis on a effectués un comptage des plantes restantes encore en vie ; afin de déterminer le taux de réussite pour les quatre différentes provenances.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 03, Annexe 03**), montrent que le facteur "Provenance" n'influe pas de manière significative sur le taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus* ($P=0,948$).

Tableau 13. Taux moyen de survie des plantes d'*Atriplex halimus*. Les résultats sont présentés sous forme de moyenne.

Provenance	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
Taux de réussite (en %)	100	100	100	100

Comme l'indique le **tableau 13**, le taux de survie est de 100% pour toutes les provenances. Les conditions de culture expérimentales peuvent avoir des effets sur les taux de survie fort obtenus.

Selon **Froment (1972)**, cette espèce peut s'adapter à des milieux divers, mais elle préfère les sols limoneux. La survie des plantes dans un milieu donné dépend en grande partie de leur réaction au stade germination (**Choukr-Allah et al., 1997**), qui se fait mieux aux températures comprises entre 13 et 20°C ; cette caractéristique permet aux plantules de se développer pendant les périodes fraîches et humides, comme une stratégie d'adaptation aux conditions arides ou semi-arides (**Piotto et al., 2003**).

I-4- Hauteurs des tiges

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 04, Annexe 04**), montrent que les deux facteurs "Provenance" et "Durée" influent de manière hautement significative ($P \leq 0,001$) sur la longueur des tiges d'*Atriplex halimus*. La corrélation de ces deux facteurs "Provenance-Durée" permet à son tour, des effets hautement significatifs ($P=0$).

En comparant les moyennes du facteur "Provenance" (**Tableau 05, Annexe 04**), le test de **NEWMAN- KEULS** au seuil de 5% fait ressortir deux groupes homogènes : Un groupe A qui représente la valeur de la hauteur moyenne la plus élevée par « Sig, Béni Saf et Oued Rhiou », ensuite vient un deuxième groupe B représenté par «Kharouba » qui exprime des longueurs plus faibles.

L'interaction des deux facteurs "Provenance-Durée" donne lieu à la constitution de dix groupes homogènes (Voir **Tableau 06, Annexe 04**).

La croissance désigne les changements quantitatifs irréversibles des plantes, qui se produisent au cours du temps (**Mazliak, 1982 ; Zarnovican, 1983**), et ce qui traduit par une augmentation des dimensions sans changement appréciable dans les propriétés qualitatives (**Heller, 1990**), cette croissance est assurée par un méristème apical, et caractérisée par une alternance et de repos (**Thiebault et al., 1990**).

Lors de son développement, la tige s'allonge et s'épaissit, la croissance en longueur est alors assurée par un double processus de production et d'élongation cellulaire (**Chaar et Colin, 1999**). **Zarnovican (1983)**, rajoute que la croissance apicale est un reflet de la qualité d'une station ou de sa fertilité.

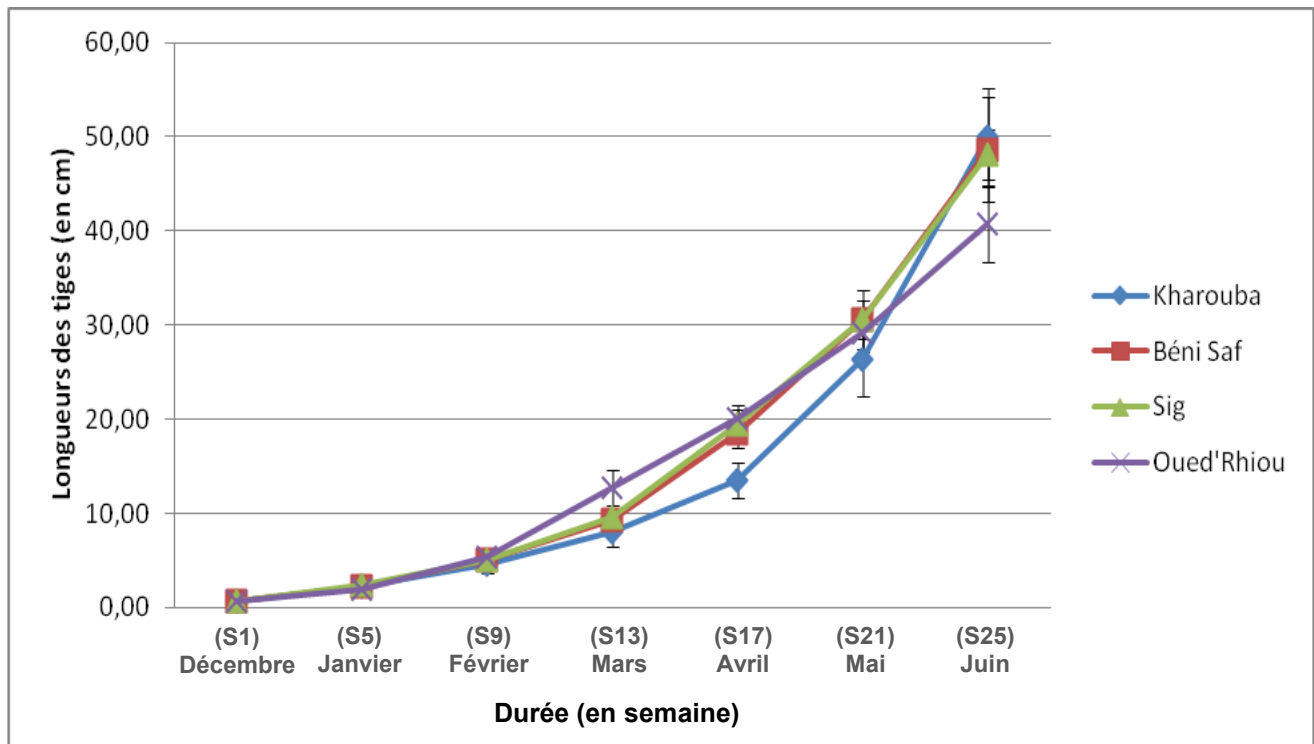


Figure 19. Croissance des plantes d'*Atriplex halimus*, exprimée en longueur moyenne des tiges (en cm). Les barres représentent les écarts types.

La courbe de la croissance mensuelle en hauteur des tiges d'*Atriplex halimus* (**Figure 19**), montre que les croissances présentent une allure sensiblement identique avec des différences moins importantes entre les quatre provenances, la croissance en hauteur moyenne subit un ralentissement dès la fin du mois d'Avril jusqu'au début du mois de Mai (**Tableau 07, Annexe 05**). Selon **Pizet (1988) et Belabass (1994)**, ce phénomène s'explique par les fortes températures qui provoquent le développement des ramifications latérales qui occasionnent le ralentissement de la croissance apicale, elle augmente rapidement dès la fin du mois de Mai jusqu'à la fin de Juin. Ce phénomène de croissance est la plus part du temps, marqué par une alternance de phase d'activité, et de l'absence d'allongement, on parle alors de croissance rythmique (**Derefeye et al., 1989 ; Alatou, 1990**).

I- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* L.

Dans le cadre de cette thèse, une expérimentation en pots a été menée sous une serre non contrôlée avec une plante halophyte (*Atriplex halimus* L.), des quatre provenances (Kharouba, Béni Saf, Sig et Oued'Rhiou), dans un sol contaminé par l'ajout des trois solutions métalliques à trois différentes concentrations : le Pb à 1000, 4000 et 8000 ppm, le Cr(III) à 250, 500 et 750 ppm et le Cr(VI) à 50, 100 et 150 ppm. La survie et la croissance de la plante ont été suivies au cours du temps et en fonction des différentes situations expérimentales.

I-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur le taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus* L.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 08, Annexe 06**), montrent que les facteurs "Provenance, métal et concentration" n'influent pas de manière significative sur le taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)).

Les plantes, âgées de 32 semaines, des quatre provenances testées ont pu rester en vie convenablement (**Planches 01 jusqu'à 04, Annexe 52**), (**Planches 05 jusqu'à 08, Annexe 53**) et (**Planches 09 jusqu'à 12, Annexe 54**). Les taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus* L. cultivées sur sept substrats à niveaux de contaminations variées ne dépendent pas de l'intensité du niveau de toxicité. Le traitement en Pb, Cr(III) et Cr(VI) à trois différentes concentrations révèle un taux de survie égale à celui des témoins (**Tableau 14**). Ceci indique que l'*Atriplex halimus* résiste sans symptôme visible d'intoxication aux trois taux de contamination par le plomb, Cr(III) et le Cr(VI). **Peralta-Videa et al. (2004)**, ont clairement montré que l'âge des plantes au moment du traitement peut influencer sur la croissance. Dans leurs expériences, des plants de luzerne (*Medicago sativa*) ont été arrosés avec 500 mg.l⁻¹ de cadmium (à raison de 100 ml pour 1 kg de sol soit une concentration réelle de 50 mg/kg) et la croissance a été évaluée deux semaines plus tard. Les auteurs ont mis en évidence un effet létal sur des plantes âgées de 4 jours au moment du traitement alors que la moitié des plantes de 16 jours sont viables et que 90 % des plantes de 20 jours peuvent se développer sans effet détectable.

Le fort taux de survie observé, après un mois, pour les plantes poussant dans un sol contaminé par du plomb et le chrome sous ses deux formes (trivalente et hexavalente), l'absence de dommages visibles sur les feuilles et l'augmentation significative de la croissance, l'*Atriplex halimus* atteint une biomasse plus élevée que les témoins chez la plus part des provenances testées, confirme la tolérance au plomb, Cr(III) et au Cr(VI) de cette espèce.

Tableau 14. Taux moyen de survie des plantes d'*Atriplex halimus* (en %), traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
Pb	1000	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
	4000	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
	8000	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
Cr(III)	250	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
	500	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
	750	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
Cr(VI)	50	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
	100	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A
	150	100 ^A	100 ^A	100 ^A	100 ^A

Les *Atriplex* présentent une bonne tolérance aux conditions défavorables du milieu (**Zid et Boukheris, 1977**). Des études récentes ont permis de souligner le caractère prometteur de l'*Atriplex halimus* qui, soumise à une importante dose de cadmium ou de zinc, est capable d'accumuler des quantités importantes de ces éléments sans présenter d'inhibition de croissance ou d'augmentation de la mortalité (**Lutts et al., 2004**). D'autres études d'*Atriplex halimus* cultivées dans des pots de sols contaminés (**Manousaki et Kalogerakis, 2009**), dans la culture hydroponique (**Lutts et al., 2004 ; Lefèvre et al., 2009**) ou dans des boîtes de Pétri (**Márquez-García et al., 2013 ; Mesnoua et Lotmani, 2015**), montrent que cette espèce est capable de tolérer de fortes concentrations de Cd, Cu, Mn, Ni, Pb et Zn. Cette particularité s'avère d'un grand intérêt car elle permet la survie des espèces dont les habitats naturels présentent de grandes fluctuations (**Mayer et Poljakoff-Mayber, 1982**).

Certaines plantes survivent sur les sols pollués (plantes tolérantes) (**Tilstone et Macnair, 1997 ; Hall, 2002**). Les mécanismes de détoxification peuvent être d'origine extra et/ou intracellulaire et varient suivant l'espèce ou l'écotype (**Hall, 2002 ; Yang et al., 2005 ; Wu et al., 2010**). Les stratégies extracellulaires consistent généralement à éviter l'accumulation des ETM à l'intérieur de la cellule par obstruction de leur passage au niveau de la membrane, par efflux actif ou par association symbiotique avec des organismes capables d'accumuler les ETM à la place des végétaux. D'autre part, une fois à l'intérieur de la cellule, les ETM en excès ainsi que les éléments qui ne sont pas utilisés pour les besoins métaboliques, sont stockés dans la vacuole ou les plastes, par exemple, pour empêcher leur toxicité. Ceci est possible grâce à la l'action de protéines et peptides spécifiques, ainsi que diverses molécules organiques (**Briat et Lebrun, 1999**).

Plusieurs espèces appartenant au genre *Atriplex* sont bien adaptées à des conditions environnementales extrêmes (Martinez *et al.*, 2003). *Atriplex halimus* L. est l'une des plus abondantes halophytes pérennes présentes dans les steppes salines algériennes (Ortiz-Dorda *et al.*, 2005). La capacité de cette espèce à stabiliser physiquement les sols et sa haute tolérance aux éléments traces métalliques doivent être exploitées pour la phytoremédiation des sites contaminés par les métaux dans les zones arides et semi arides (Walker et Lutts, 2014).

L'étude des mécanismes physiologiques assurant la survie des halophytes dans des conditions d'excès de métaux lourds est devenue une urgence (Jordan *et al.*, 2002 ; Shevyakova *et al.*, 2003).

I-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les caractéristiques biométriques des plantes d'*Atriplex halimus* L.

Les métaux lourds ont un effet sur la croissance et le développement des végétaux. Dans notre étude, nous nous sommes intéressé en premier lieu à l'effet des différentes concentrations de Pb (1000, 4000 et 8000 ppm), de Cr(III) (250, 500 et 750 ppm) et de Cr(VI) (50, 100 et 150 ppm), sur la croissance et le développement d'*Atriplex halimus*. Pour y parvenir, à la fin de l'expérimentation, nous avons mesuré des paramètres biométriques tels que la longueur des racines et des tiges et le nombre des feuilles ainsi que la biomasse (sèche, minérale et organique) de la partie aérienne et souterraine de toutes les plantes d'*Atriplex halimus* des quatre provenances (Kharouba, Béni Saf, Sig et Oued'Rhiou), en fonction des différentes situations expérimentales.

I-2-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la longueur des racines d'*Atriplex halimus* L.

Les résultats de l'analyse de variance (Tableau 09, Annexe 07), montrent que les trois facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" influent de manière très significative, avec une probabilité ($P \leq 0,01$), sur la longueur des racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)).

Quant aux effets d'interactions, un effet non significatif est observé par l'interaction "Provenance-Métal" ($P = 0,713$), ainsi que l'interaction "Provenance-Concentration" ($P = 0,057$).

A l'inverse, l'interaction "Métal-Concentration" influe de manière significative sur la longueur des racines d'*Atriplex halimus* avec ($P \leq 0,05$). La comparaison des moyennes de l'interaction de ces facteurs (Tableau 10, Annexe 07), fait ressortir six groupes homogènes : Groupe A (Cr(VI)-150 ppm), groupe AB (Cr(VI)-100 ppm), groupe ABC (Cr(VI)-100 ppm), (Pb-8000 ppm) et (Cr(III)-250 ppm), groupe BCD (Cr(III)-500 ppm), (Cr(III)-750 ppm), (Cr(VI)-100 ppm) et les plantes témoins, groupe CD (Pb-4000 ppm) et le traitement (Pb-1000 ppm) constitue le 6^{ème} groupe D qui représente les racines avec des longueurs les plus faibles.

L'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" n'a pas une influence significative ($P=0,281$) sur ce paramètre.

Dans notre travail les solutions toxiques sont des solutions à trois fortes concentrations différentes de Pb, Cr(III) et de Cr(VI), par contre la solution de contrôle est une solution nutritive «Témoin». Les résultats moyens obtenus (**Tableau 15**), montrent que dans les conditions normales, les plantes élaborent des racines avec des longueurs allant de 10,00 cm enregistrée par la provenance «Kharouba» à 12,02 cm mesurée sur la provenance «Béni Saf».

Tableau 15. Longueurs moyennes (en cm) des racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	10,00 ^{BCD} \pm 1,97	12,02 ^{BCD} \pm 1,26	10,98 ^{BCD} \pm 0,97	11,08 ^{BCD} \pm 0,95
Pb	1000	8,94 ^D \pm 0,88	9,90 ^D \pm 1,51	10,82 ^D \pm 3,18	11,34 ^D \pm 1,17
	4000	10,76 ^{CD} \pm 1,58	11,28 ^{CD} \pm 1,98	9,94 ^{CD} \pm 1,67	11,02 ^{CD} \pm 1,50
	8000	10,84 ^{ABC} \pm 2,86	13,74 ^{ABC} \pm 2,01	11,86 ^{ABC} \pm 2,50	12,76 ^{ABC} \pm 2,83
Cr(III)	250	10,88 ^{ABC} \pm 3,25	12,06 ^{ABC} \pm 1,40	11,50 ^{ABC} \pm 1,67	14,38 ^{ABC} \pm 1,80
	500	9,58 ^{BCD} \pm 2,32	12,76 ^{BCD} \pm 3,42	11,52 ^{BCD} \pm 2,15	13,48 ^{BCD} \pm 1,86
	750	13,22 ^{BCD} \pm 2,83	10,70 ^{BCD} \pm 2,15	10,70 ^{BCD} \pm 1,97	12,14 ^{BCD} \pm 1,13
Cr(VI)	50	11,00 ^{ABC} \pm 1,97	12,42 ^{ABC} \pm 1,57	12,28 ^{ABC} \pm 1,38	13,68 ^{ABC} \pm 1,73
	100	13,16 ^{AB} \pm 2,25	11,70 ^{AB} \pm 0,99	11,40 ^{AB} \pm 1,56	14,78 ^{AB} \pm 1,91
	150	14,12 ^A \pm 1,89	14,26 ^A \pm 2,11	12,32 ^A \pm 1,52	14,20 ^A \pm 1,52

Le plomb à 8000 ppm, Cr(III) à 250 ppm et le Cr(VI) à 150 ppm, apportés chez les provenances, n'ont pas perturbé l'élongation des racines et ont donné des valeurs avoisinantes et supérieures à celles notées chez les témoins. Les longueurs des racines subissent une évolution globale chez les quatre provenances testées en présence des métaux, avec des effets plus prononcés sur la provenance «Oued'Rhiou» à la concentration 100 ppm du Cr(VI) (**Tableau 15**). La validité de cet index fut discutée par **Macnair (1983)**, qui suggérait que les racines subissaient des effets non proportionnels en solution toxique et en solution non toxique, causant des erreurs statistiques dans les rapports d'élongation

Nos résultats font ressortir que, la croissance racinaire en longueur semble indifférente à la contrainte métallique et ne présente pas de différence significative vis-à-vis du niveau du stress métallique, bien que les racines constituent le premier site de contact entre la plante et la forte

concentration en métaux du milieu externe. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certaines espèces hyperaccumulatrices qui sont beaucoup plus tolérantes comme *Thlaspi caerulescens* dont la biomasse racinaire n'est pas modifiée en présence de cadmium (Ebbs *et al.*, 2002).

Jusqu'aux années 80, la tolérance était mesurée par un index défini par le rapport de l'élongation des racines en solution toxique sur l'élongation des racines en solution de contrôle non toxique (Jowett, 1958 ; Wilkins, 1978) ; avec cette méthode, la plupart des études testant les réponses d'individus montraient que la tolérance était dominante sur la non tolérance, que quelques gènes majeurs étaient impliqués et que leur expression était modulée par des gènes modificateurs (Urquhart, 1971 ; Gartside et McNeilly, 1974 ; Lefèbvre, 1974). La réponse des plantes correspondait donc à un système génétique quantitatif. Schat et Ten Bookum (1992), utilisèrent un test séquentiel en solution nutritive, basé sur l'application de concentrations croissantes en métal sur un lot donné d'individus. La croissance des racines était évaluée qualitativement (présence ou absence) à chaque niveau de concentration. Ainsi, ils parvinrent à la conclusion que la tolérance au chrome chez *Silene vulgaris* était aussi gouvernée par un seul gène majeur et plusieurs gènes modificateurs.

Il est difficile de comparer nos résultats avec les des autres travaux dans la mesure où les auteurs ont utilisé des plantules plus jeunes au début du traitement (donc potentiellement plus sensibles). En revanche, les travaux de Sharma *et al.* (2004), ont montré une diminution de la longueur de la racine principale lorsque les plantules d'une semaine étaient soumises à 25 µM de cadmium. Les travaux de Wojcik et Tukiendorf (2004), sur des plantes plus âgées (7 semaines avant exposition pendant une semaine sur 100 µM de cadmium) font état d'une diminution de l'élongation racinaire. Cette réduction de la longueur de la racine principale a été observée chez d'autres espèces : des plantes de pois (Lima *et al.*, 2006) et des plantes d'orge (Sharma *et al.*, 2004). Zhou et Qiu (2005), ont également observé une diminution de la longueur des racines chez les plantes phytoaccumulatrices *Sedum alfredii*. Ces expériences, comparées à celles que nous avons réalisées avec les plantes d'*Atriplex halimus* L., suggèrent que cette dernière serait plus tolérante à l'exposition au plomb et au chrome sous ses deux formes (trivalente et hexavalente) donc susceptible d'accumuler de plus fortes quantités de ces métaux.

I-2-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la croissance des tiges d'*Atriplex halimus* L.

I-2-2-1- Longueur des tiges

L'analyse de variance (**Tableau 11, Annexe 08**), montrent que les trois facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" influent de manière très significative ($P \leq 0,01$) sur la longueur des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)).

Quant aux effets d'interactions, un effet non significatif est observé par l'interaction "Provenance-Métal" ($P = 0,156$), ainsi que l'interaction " Provenance-Concentration" ($P = 0,183$).

A l'inverse, l'interaction " Métal-Concentration" influe de manière significative sur la longueur des tiges d'*Atriplex halimus* avec ($P \leq 0,05$). La comparaison des moyennes de l'interaction de ces facteurs (**Tableau 12, Annexe 08**), fait ressortir six groupes homogènes : Groupe A (Cr(VI)-150 ppm), groupe AB (Cr(VI)-50 ppm), groupe ABC (Cr(VI)-100 ppm), groupe BCD (Cr(III)-250 ppm), (Cr(III)-500 ppm), (Pb-4000 ppm) et (Pb-8000 ppm), groupe CD (Pb-1000 ppm) et le reste des traitements constitue le 6^{ème} groupe D avec des valeurs les plus faibles.

L'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" n'a pas une influence significative ($P = 0,228$) sur ce paramètre.

En comparant les moyennes de l'interaction " Métal-Concentration", le test (**Tableau 12, Annexe 08**), permet de mettre l'accent sur quelques interactions intéressantes et de se prononcer sur la tolérance des quatre provenances à des doses déterminées de métaux lourds.

Le plomb apporté à 8000 ppm chez la provenance «Kharouba» et le Cr(VI) ajouté à des concentrations atteignant 150 ppm chez la provenance «Béni Saf» n'ont pas perturbé l'élongation des tiges, et ont donné des valeurs supérieures à celles notées chez les témoins.

La lecture des résultats moyens (**Tableau 16**), montre que la provenance «Béni Saf» a des longueurs de tiges plus élevées dans le traitement au Cr(VI) à 150 ppm, que celles des autres provenances dans les conditions expérimentales de culture avec une moyenne de 73,8 cm.

Tableau 16. Longueurs moyennes (en cm) des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	55,86 ^D \pm 5,52	60,84 ^D \pm 9,91	60,14 ^D \pm 7,48	45,10 ^D \pm 5,09
Pb	1000	51,22 ^{CD} \pm 7,64	63,68 ^{CD} \pm 5,41	58,12 ^{CD} \pm 14,43	55,84 ^{CD} \pm 6,63
	4000	61,92 ^{BCD} \pm 8,49	63,98 ^{BCD} \pm 5,52	54,8 ^{BCD} \pm 8,74	53,76 ^{BCD} \pm 4,93
	8000	64,14 ^{BCD} \pm 1,97	52,42 ^{BCD} \pm 12,49	59,24 ^{BCD} \pm 14,72	55,46 ^{BCD} \pm 6,00
Cr(III)	250	63,26 ^{BCD} \pm 9,25	64,74 ^{BCD} \pm 7,50	61,96 ^{BCD} \pm 6,46	49,28 ^{BCD} \pm 5,53
	500	62,88 ^{BCD} \pm 2,19	56,76 ^{BCD} \pm 13,23	60,04 ^{BCD} \pm 7,56	56,84 ^{BCD} \pm 17,13
	750	51,32 ^D \pm 12,44	56,68 ^D \pm 15,21	56,18 ^D \pm 7,99	54,62 ^D \pm 2,60
Cr(VI)	50	65,74 ^{AB} \pm 2,46	71,14 ^{AB} \pm 2,26	68,56 ^{AB} \pm 5,63	54,42 ^{AB} \pm 1,88
	100	67,58 ^{ABC} \pm 4,33	67,34 ^{ABC} \pm 3,57	68,10 ^{ABC} \pm 5,78	54,16 ^{ABC} \pm 1,54
	150	68,12 ^A \pm 9,36	73,8 ^A \pm 5,44	70,66 ^A \pm 4,08	55,30 ^A \pm 1,37

L'évaluation de la toxicité causée par les éléments traces métalliques sur les plantes constitue un outil très important pour la recherche dans le domaine de la phytoremédiation. Plusieurs paramètres physiologiques peuvent être utilisés pour évaluer le stress induit par des éléments traces métalliques tels que la germination, la croissance et la production en biomasse (**Kavuličová et al., 2012**). Les variations de l'expression de la tolérance dépendent de la quantité du métal biodisponible dans le sol d'origine (**Baker et al., 1990**). Ces variations à l'échelle de l'individu, de l'organe (racines ou parties aériennes) ou de la cellule, se mesurent par des traits liés à la valeur sélective, donc relatifs à la croissance ou à la survie. Les résultats acquis ont confirmé la tolérance au plomb et au chrome est observée chez cette espèce.

I-2-2-2- Taux de croissance des tiges

Dans un premier temps, l'effet du plomb et du chrome a été étudié en mesurant l'élongation des tiges chez l'*Atriplex halimus*, cultivées en présence de différentes concentrations en Pb, Cr(III) et Cr(VI), sur une période d'un mois.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 13, Annexe 09**), permettent de conclure que les effets "Provenance", "Métal" et "Concentration" influent de manière très significative sur l'élongation des tiges chez l'*Atriplex halimus* en fonction du temps avec ($P \leq 0,01$).

Les effets d'interactions bifactorielles "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" n'ont aucun effet sur ce paramètre avec respectivement ($P = 0,693$, $P = 0,789$ et $P = 0,079$).

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance" (**Tableau 14, Annexe 09**), permet de déceler trois groupes homogènes : le groupe A constitué par la provenance «Béni Saf» ensuite vient un deuxième groupe AB représenté par «Oued'Rhiou» et enfin un dernier groupe B par «Kharouba et Sig».

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 15, Annexe 09**) :

Groupe A constitué par le Cr(VI) avec une moyenne de 13,624 cm, le second groupe B représenté par le Cr(III) avec une moyenne de 12,508 cm qui est plus élevée que celle du troisième groupe C représenté par le Pb avec une moyenne de 11,085 cm.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 16, Annexe 09**), fait ressortir deux groupes homogènes : le premier groupe A qui est le témoin ensuite vient un second groupe B avec une élongation faible représenté par les neuf différentes concentrations testées.

Il est logique de noter que l'élongation des tiges chez l'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux, induites est d'autant moins importantes que les concentrations sont élevées (**Figure 20**). On remarque également que la croissance des tiges est plus affectée par le plomb que par le chrome sous ses deux formes (Cr(III) et Cr(VI)) (**Tableau 17, Annexe 10**). Ces résultats renforcent les observations réalisées par différentes équipes de chercheurs qui ont démontré que les stress extrêmes conduisent au nanisme et à l'inhibition de la croissance (**Johnson et al., 1996**). Il a été noté que quand la concentration d'un élément en trace quelconque dans les tissus atteint le seuil de toxicité, les fonctions physiologiques de la plante sont affectées et la croissance du végétale est ralentie (**Bourellet et Berthelin, 1998**).

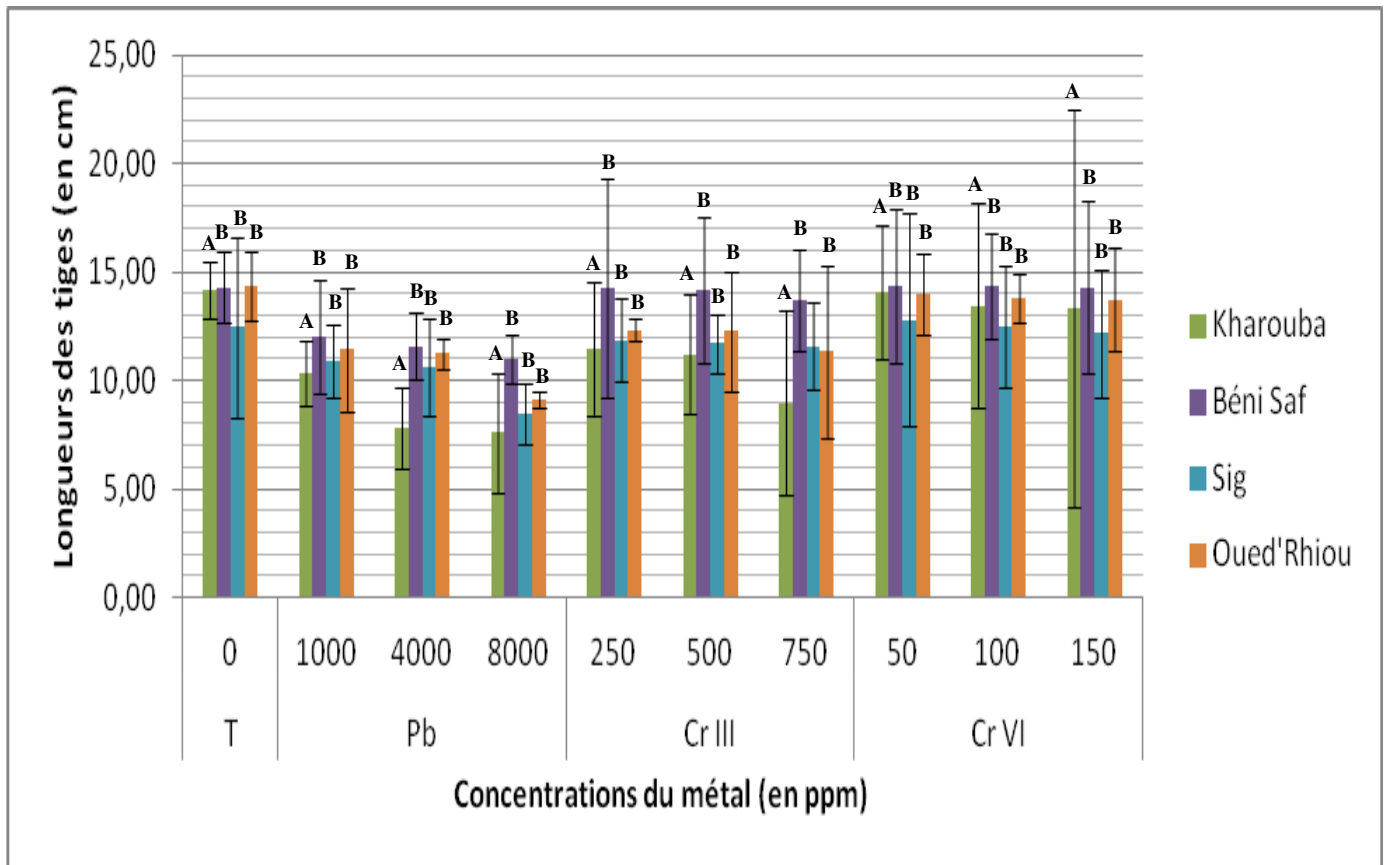


Figure 20. Taux moyen de croissance des tiges d'*Atriplex halimus*, en fonction des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) et leurs concentrations. Les barres représentent les écarts types et les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Nous avons constaté que la croissance des tiges chez les plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI) même à fortes concentrations, était comparable à celle des plantes témoins. De plus, dans un sol contaminé par ces métaux lourds, les plantes d'*Atriplex halimus* atteignent une biomasse plus élevée que celles des témoins.

Le plomb n'est jamais considéré comme un élément essentiel à la croissance des plantes, mais il peut les stimuler (Dou, 1988). Dans le cadre de ce travail, la réponse chez l'*Atriplex halimus* au stress oxydant induit par le plomb et le chrome sous ses deux formes d'oxydation a été estimée par l'analyse des paramètres biométriques. Les résultats obtenus, montrent une inhibition de la croissance, qui résulte d'une réduction d'élongation des tiges, après un mois d'exposition à différentes concentrations du plomb (0, 1000, 4000 et 8000 ppm), du Cr(III) (250, 500 et 750 ppm) et du Cr(VI) (50, 100 et 150 ppm) (Figure 20). Cette réduction de la croissance a également été relevée chez plusieurs espèces soumises à la présence du Pb comme par exemple certaines espèces de *Fabacées* (Huang et Cunningham, 1996 ; Piechalak *et al.*, 2002), *Plantago major* (Kosobrukhov *et al.*, 2004), *Elsholtzia argyi* (Islam *et al.*, 2007) et *Athyrium wardii* (Zou *et al.*, 2010). Les petits pois (Kopittke *et al.*, 2007), le radis (Gopal et Rizvi, 2008), le maïs (Ekmekçi *et al.*, 2009), l'ail (Liu *et*

al., 2009), *Arabidopsis thaliana* (Phang *et al.*, 2011), et *Glomus etunicatum* et *Calopogonium mucunoides* (Souza *et al.*, 2012) ; ou par d'autres métaux lourds comme l'aluminium dans la pomme de terre et le concombre (Tabaldi *et al.*, 2007 ; Pereira *et al.*, 2010), l'arsénite dans le riz (Choudhury *et al.*, 2010), le cadmium dans le radis et le blé (Anuradha et Rao, 2007 ; Liu *et al.*, 2007), le chrome dans le melon (Akinci et Akinci, 2010), le cuivre dans le radis (Sun *et al.*, 2010) et le mercure dans *Pfaffia glomerata* (Calgaroto *et al.*, 2010) ; cet effet étant fonction de la concentration et de la durée du traitement avec le plomb, le chrome ou d'autres métaux lourds.

I-2-3- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur le nombre des feuilles d'*Atriplex halimus* L.

Le nombre de feuilles par plante a été dénombré, après une période d'un mois depuis la date d'application des métaux. Les résultats sont présentés dans le **tableau 17**.

L'analyse de variance (**Tableau 18, Annexe 11**), montre que le facteur "Métal" influe de manière significative ($P \leq 0,05$), sur le nombre des feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)).

Quant aux facteurs "Provenance" et "Concentration" n'ont aucun effet sur ce paramètre avec respectivement ($P = 0,140$ et $P = 0,463$).

Les interactions bifactorielles : "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle : "Provenance-Métal-Concentration", n'influent pas de manière significative sur ce paramètre.

Le test de **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 % pour le facteur "Métal" définit trois groupes homogènes (**Tableau 19, Annexe 11**) : Un groupe homogène A pour les traitements au Cr(VI) et le second groupe homogène AB qui est représenté par les traitements au Cr(III) et enfin le groupe homogène B pour les traitements au plomb.

Tableau 17. Nombre moyen des feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	314 \pm 129	365 \pm 79	390 \pm 96	405 \pm 106
Pb	1000	271 ^B \pm 73	299 ^B \pm 68	364 ^B \pm 59	343 ^B \pm 57
	4000	386 ^B \pm 72	309 ^B \pm 93	372 ^B \pm 72	396 ^B \pm 136
	8000	332 ^B \pm 143	393 ^B \pm 133	358 ^B \pm 110	364 ^B \pm 95
Cr(III)	250	368 ^{AB} \pm 127	430 ^{AB} \pm 127	354 ^{AB} \pm 203	323 ^{AB} \pm 118
	500	293 ^{AB} \pm 90	404 ^{AB} \pm 107	379 ^{AB} \pm 110	380 ^{AB} \pm 78
	750	407 ^{AB} \pm 167	387 ^{AB} \pm 108	344 ^{AB} \pm 113	387 ^{AB} \pm 121
Cr(VI)	50	359 ^A \pm 164	391 ^A \pm 78	415 ^A \pm 97	388 ^A \pm 85
	100	461 ^A \pm 110	350 ^A \pm 84	427 ^A \pm 131	460 ^A \pm 117
	150	355 ^A \pm 132	417 ^A \pm 153	450 ^A \pm 121	454 ^A \pm 140

Chez les plantes, traitées par le Cr(III) et Cr(VI), le nombre des feuilles était aussi important que chez les plantes «Témoin», ceci est observé chez les quatre provenances. Par contre, en présence de plomb, ce nombre est très réduit. En effet, Nos résultats montrent que l'excès de plomb inhibe la croissance d'*Atriplex halimus* L. qui se manifeste par une diminution de la taille et une réduction du nombre de feuilles. Ces résultats sont corroborés par des études précédentes qui signalent que le plomb affecte la croissance et la morphogénèse des plantes et peut même causer l'inhibition de la division et de l'élongation cellulaire (Seregin et Ivanov, 2001 ; Malkowski *et al.*, 2002 ; Patra *et al.*, 2004 ; Kopittke *et al.*, 2007). De plus, nos résultats obtenus sont en accord avec ceux de Sereguine et Ivanov (1997), qui ont également observé une inhibition de la croissance des racines du maïs traité par le nitrate de plomb et Garg *et al.* (2004) ; Anuradha et Rao (2007) ; Gopal et Rizvi (2008) ; Biteur *et al.* (2011) ; Ait Hamadouche *et al.* (2012) ; Dan Wang *et al.* (2012), qui ont révélé une diminution des paramètres biométriques chez le radis stressé par les métaux lourds.

L'effet des métaux sur la croissance peut être lié à la perturbation de l'équilibre de certaines hormones de croissance (Azevedo *et al.*, 2005 ; Piotrowska *et al.*, 2010), à la perturbation de l'homéostasie des éléments minéraux essentiels (Breckle et Kahle, 1992 ; Irfan *et al.*, 2013), ainsi qu'à des perturbations de la machinerie photosynthétique (Li *et al.*, 2012).

Le premier effet des métaux lourds observable chez les végétaux est une inhibition de la croissance. Celle-ci s'accompagne très souvent de nombreux autres indices de dysfonctionnement ; D'après **Alaou-Sossé et Badot (2004)**, l'excès du métal inhibe l'élongation cellulaire, affecte la croissance de la surface foliaire et peut aussi aboutir à l'altération de la membrane cellulaire, et la suppression des activités enzymatiques. Le dysfonctionnement entraîne par exemple la chlorose foliaire, d'importantes lésions nécrotiques, un jaunissement progressif, un repliement ou dessèchement du feuillage etc. (**Devi et Prasad, 1999 ; Dietz et al., 1999 ; Cheng, 2003**).

Le nombre de feuilles est un paramètre qui peut exprimer la croissance des tiges, c'est aussi un bon indice d'une bonne alimentation en eau et en sels minéraux et une bonne production en biomasse par la plante (**Fishesser et Dupuitate, 1996**). En plus, le nombre de feuilles est en relation de la longueur des tiges. Cependant, l'effet du Pb ralentit la croissance des tiges en réduisant le nombre des feuilles et la longueur des entre-nœuds. La réduction de croissance semble associée à une forte accumulation des métaux lourds dans la plante (**Ben Ahmed et al., 1996**).

Par contre, dans un sol contaminé par le Cr(III) et le Cr(VI), l'*Atriplex halimus* présente une meilleure croissance que dans le sol d'origine et, en fin d'expérimentation, atteint une biomasse plus élevée que les témoins. Ses capacités phytoremédiatrices sont comparables à celles de plantes réputées pour leur forte capacité d'accumulation telles que *Brassicae juncea* (**Meyers et al., 2008**) et *Lathyrus sativus* (**Brunet et al., 2008**).

La résistance d'une plante à un stress indique le maintien de la croissance et de son métabolisme fonctionnel, à la différence des espèces animales qui échappent à ces conditions. Pour cela, la plante doit supporter le choc chimique ou physique engendré par l'environnement en modifiant ses caractéristiques de croissance et de développement. Ces modifications se font souvent au dépend d'un déficit nutritionnel et énergétique par suite de la compétition entre les processus de résistance et ceux indispensables au maintien du métabolisme de base (**Yeo, 1983**).

En effet, Le fort taux de survie observé, après un mois, pour les plantes poussant dans un sol contaminé par du plomb, du Cr(III) et du Cr(VI), l'absence de dommages visibles sur les feuilles et l'augmentation significative de la croissance confirme la tolérance au plomb et au chrome trivalent et hexavalent chez l'*Atriplex halimus* L.

I-2-4- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la biomasse d'*Atriplex halimus* L.

L'effet de nitrate de plomb, chlorure de chrome Cr(III) et chromate de potassium Cr(VI) sur la biomasse, des parties aériennes (feuilles et tiges) et racinaires des plantes d'*Atriplex halimus*, est évalué dans cette partie.

I-2-4-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en matière sèche (MS)

En fin d'expérimentation, les parties aériennes et racinaires de la plante sont récoltées séparément, séchées et pesées, afin d'évaluer l'effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en matière sèche, dans les différents organes des plantes d'*Atriplex halimus* des quatre provenances testées (Voir **Tableaux 18, 19 et 20**).

I-2-4-1-1- Dans les racines

Les résultats de teneurs moyennes en matière sèche dans les racines, exprimées en pourcentage de matière fraîche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 18**.

De manière globale, les racines d'*Atriplex halimus* qui sont, traitées par les différentes concentrations de Pb, Cr(III) et Cr(VI), présentent un taux de matière sèche plus élevé que celui des plantes témoins, la teneur en matière sèche la plus élevée est de 55,56 % chez la provenance «Sig» traitée par le Cr(VI) à 150 ppm alors que chez la provenance «Kharouba», elle n'est que de 47,162%.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 20, Annexe 12**), permettent de conclure que facteur "Métal" influe de manière significative ($P \leq 0,05$) sur les teneurs en matière sèche dans les racines d'*Atriplex halimus*. Pas d'effet significatif pour le facteur "Provenance" ($P = 0,140$) et "Concentration" ($P = 0,463$).

Les interactions bifactorielles "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" et l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" n'ont pas d'effet significatif avec les probabilités respectives : $P = 0,817$, $P = 0,857$, $P = 0,750$ et $P = 0,946$.

Selon le test de **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 % (**Tableau 21, Annexe 12**), pour le facteur métal, trois groupes homogènes sont à relever : Groupe A constitué par le Cr(VI), groupe AB par Cr(III) et groupe B par le plomb.

Tableau 18. Teneur moyenne en matière sèche (MS en % de MF) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	40,514 \pm 5,834	47,859 \pm 3,105	49,759 \pm 3,129	34,192 \pm 5,240
Pb	1000	45,824 ^B \pm 9,491	35,030 ^B \pm 4,008	45,598 ^B \pm 8,346	49,213 ^B \pm 4,175
	4000	35,692 ^B \pm 4,499	51,629 ^B \pm 4,798	38,173 ^B \pm 3,449	54,087 ^B \pm 4,495
	8000	50,388 ^B \pm 5,023	42,050 ^B \pm 5,886	53,651 ^B \pm 6,329	46,662 ^B \pm 6,335
Cr(III)	250	44,116 ^{AB} \pm 4,335	42,403 ^{AB} \pm 4,940	44,689 ^{AB} \pm 6,525	41,948 ^{AB} \pm 8,004
	500	49,541 ^{AB} \pm 4,715	47,170 ^{AB} \pm 6,492	48,858 ^{AB} \pm 3,371	45,737 ^{AB} \pm 5,366
	750	40,534 ^{AB} \pm 4,549	50,514 ^{AB} \pm 3,046	52,029 ^{AB} \pm 4,643	49,341 ^{AB} \pm 3,788
Cr(VI)	50	52,038 ^A \pm 6,778	41,630 ^A \pm 4,983	45,106 ^A \pm 5,949	41,218 ^A \pm 3,327
	100	42,886 ^A \pm 7,526	53,054 ^A \pm 3,405	49,159 ^A \pm 3,199	46,706 ^A \pm 4,801
	150	47,162 ^A \pm 5,843	48,030 ^A \pm 5,173	55,563 ^A \pm 3,350	52,705 ^A \pm 4,100

Les racines, traitées par le chrome sous ses deux formes (Cr(III) et Cr(VI)) aux fortes concentrations montrent des valeurs de teneurs en matière sèche plus élevées que pour celles des témoins et qui sont, traitées par le plomb. Ceci signifie que les racines, traitées par le chrome sont plus denses, du fait d'une composition histologique différente (vraisemblablement plus de tissus conducteurs et de soutien par rapport au parenchyme) (**Garnier et al., 1995**).

En effet, une inhibition de croissance, qu'il s'agisse d'une élongation racinaire, d'une élongation foliaire ou d'une diminution des masses de matière fraîche ou sèche, est le paramètre le plus directement visible, marquant la toxicité d'un milieu (**Macnair, 1993**). Or, nous avons observé, en mesurant la teneur en matière sèche dans les racines, un effet toxique précoce de plomb chez *Atriplex halimus*. Lorsqu'une plante ne dispose pas, à portée de ses racines, d'une quantité suffisante de métal assimilable, sa matière sèche en devient moins pourvue donc sa croissance est sévèrement réduite et des symptômes de déficiences peuvent se manifester (**Coic et Coppenet, 1989**).

I-2-4-1-2-Dans les tiges

Les résultats de teneurs moyennes en matière sèche dans les tiges, exprimées en pourcentage par rapport à la matière fraîche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 19**.

De manière globale, les plantes d'*Atriplex halimus* qui sont, traitées par le Cr(VI) à la concentration 150 ppm ont des teneurs plus élevées que le témoin, ou celles, traitées par le Cr(III) et le plomb. La teneur en matière sèche la plus élevée est de 47,207 % chez la provenance «Sig», traitée par le Cr(VI) à 150 ppm, contre la teneur la plus faible enregistrée chez la même provenance traitée par le Pb à 1000 ppm de 30,848 %.

L'analyse de variance (**Tableau 22, Annexe 13**), montre que les facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" influent de manière hautement significative ($P \leq 0,001$), sur les teneurs en matière sèche dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)). Seul le facteur "Provenance" a un effet significatif faible ($P \leq 0,05$).

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait ressortir deux groupes homogènes (**Tableau 23, Annexe 13**) :

Groupe A constitué par le Cr(VI) (teneurs en matière sèche plus élevées) et le second groupe B représenté par le Cr(III) et le plomb.

Tableau 19. Teneur moyenne en matière sèche (MS en % de MF) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal [] (ppm)		Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	37,690 ^{ABCDEF} $\pm 4,620$	41,068 ^{ABCDEF} $\pm 2,987$	45,074 ^{ABC} $\pm 3,687$	33,627 ^{EF} $\pm 4,430$
Pb	1000	34,704 ^{DEFG} $\pm 4,035$	35,091 ^{CDEFG} $\pm 3,130$	30,848 ⁵ $\pm 5,320$	36,003 ^{CDEFG} $\pm 4,135$
	4000	44,267 ^{ABCD} $\pm 4,316$	37,430 ^{ABCDEF} $\pm 1,496$	35,387 ^{CDEFG} $\pm 4,147$	46,432 ^{AB} $\pm 3,681$
	8000	32,592 ^{FG} $\pm 3,338$	43,896 ^{ABCD} $\pm 3,005$	38,214 ² $\pm 2,268$	39,303 ^{ABCDEF} $\pm 3,292$
Cr(III)	250	36,781 ^{BCDEFG} $\pm 4,541$	35,877 ^{CDEFG} $\pm 3,187$	36,545 ^{BCDEFG} $\pm 4,048$	34,759 ^{DEFG} $\pm 5,266$
	500	34,363 ^{DEFG} $\pm 2,763$	41,862 ^{ABCDEF} $\pm 3,896$	35,136 ^{CDEFG} $\pm 4,185$	37,685 ^{ABCDEF} $\pm 3,730$
	750	42,089 ^{ABCDEF} $\pm 7,330$	33,713 ^{EF} $\pm 2,971$	37,053 ^{BCDFG} $\pm 4,926$	42,758 ^{ABCDEF} $\pm 4,701$
Cr(VI)	50	43,490 ^{ABCDE} $\pm 4,222$	31,180 ^G $\pm 2,088$	44,320 ^{ABCD} $\pm 4,635$	35,742 ^{CDEFG} $\pm 4,496$
	100	36,009 ^{CDEFG} $\pm 4,687$	34,230 ^{DEFG} $\pm 3,435$	43,321 ^{ABCDE} $\pm 5,596$	42,353 ^{ABCDEF} $\pm 5,371$
	150	45,125 ^{ABC} $\pm 5,352$	44,272 ^{ABCD} $\pm 3,681$	47,207 ^A $\pm 3,434$	44,448 ^{ABCD} $\pm 4,342$

L'augmentation de la dose des métaux provoque une augmentation de la teneur en matière sèche dans les tiges d'*Atriplex halimus* chez la plus part des provenances testées.

La combinaison des deux facteurs "Provenance-Métal" (**Tableau 24, Annexe 13**), fait apparaître deux groupes homogènes :

Le groupe A représenté par «Sig-Cr(VI)», le groupe AB constitué par le reste des traitements et représente les teneurs en MS les plus faibles.

Les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par le Cr(VI) aux fortes concentrations montrent des valeurs de teneurs en matière sèche plus élevées que pour celles des témoins et qui sont, traitées par le Cr(III) et le plomb. L'*Atriplex halimus* paraît comme une espèce bien adaptée au milieu car elle assure un rendement en fourrage relativement stable tout au long de l'année et dont les composantes MS et MAT sont relativement homogènes. D'autre part, cette espèce est plus adaptée aux différentes contraintes de la zone steppique (gelée printanières, stress hydrique et stress salin) (**Dutuit, 1999**).

I-2-4-1-3- Dans les feuilles

Les résultats de teneurs moyennes en matière sèche dans les feuilles, exprimées en pourcentage par rapport à la matière fraîche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 20**.

L'analyse de variance des teneurs en matière sèche dans les feuilles d'*Atriplex halimus* (**Tableau 25, Annexe 14**), permet de montrer que ce paramètre est sous l'étroite dépendance de l'effet "Concentration" ($P \leq 0,05$). Quand aux facteurs "Provenance" et "Métal" n'influent pas de manière significative avec une probabilité respectivement : ($P = 0,414$ et $P = 0,503$) sur ce paramètre.

La corrélation de ces facteurs ne permet pas à des effets significatifs, telles les interactions "Provenance-Métal" ($P = 0,962$), "Provenance-Concentration" ($P = 0,078$), "Métal-Concentration" ($P = 0,454$) et l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" ($P = 0,99$).

La comparaison des moyennes par le test de **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 %, permet de constituer un seul groupe homogène selon le facteur "Concentration" (**Tableau 26, Annexe 14**).

On note tout d'abord que dans les conditions normales, les taux moyens de la teneur en matière sèche dans les feuilles d'*Atriplex halimus* enregistrés chez les provenances «Sig et Oued'Rhiou» sont légèrement plus élevés que chez «Kharouba et Béni Saf» (**Tableau 20**). De plus, toutes les provenances testées présentent un taux très important de matière sèche et qui varie entre 17,911 % de MF à 21,666 % de MF, dans les conditions normales (Témoin). En effet, les feuilles d'*Atriplex halimus* produisent des quantités importantes de matière sèche durant la période de Juin à Octobre avec un pic en Août (**El Schatnawi et Mohawesh, 2000**), ce qui explique les teneurs élevées en MS des plantes d'*Atriplex halimus* récoltées en mois d'Août.

Tableau 20. Teneur moyenne en matière sèche (MS en % de MF) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	18,333 ^A \pm 3,867	20,999 ^A \pm 3,417	21,666 ^A \pm 3,031	17,911 ^A \pm 2,857
Pb	1000	20,155 ^A \pm 4,192	19,370 ^A \pm 3,278	17,330 ^A \pm 3,209	20,402 ^A \pm 3,642
	4000	17,422 ^A \pm 2,975	18,229 ^A \pm 5,250	19,156 ^A \pm 3,682	18,968 ^A \pm 4,110
	8000	22,131 ^A \pm 4,875	21,046 ^A \pm 3,147	21,217 ^A \pm 3,341	22,439 ^A \pm 4,331
Cr(III)	250	17,841 ^A \pm 3,026	17,808 ^A \pm 2,669	19,637 ^A \pm 2,070	18,325 ^A \pm 3,922
	500	19,680 ^A \pm 3,058	17,658 ^A \pm 2,127	21,438 ^A \pm 2,221	18,607 ^A \pm 1,766
	750	19,849 ^A \pm 3,022	18,974 ^A \pm 2,118	17,952 ^A \pm 2,734	20,323 ^A \pm 2,403
Cr(VI)	50	18,925 ^A \pm 2,898	18,596 ^A \pm 4,797	20,005 ^A \pm 4,075	18,378 ^A \pm 2,162
	100	18,693 ^A \pm 3,528	19,209 ^A \pm 3,358	19,234 ^A \pm 3,416	20,257 ^A \pm 2,725
	150	20,107 ^A \pm 3,538	19,409 ^A \pm 1,249	20,551 ^A \pm 3,610	21,160 ^A \pm 2,821

D'autre part, lorsque les plantes des différentes provenances sont soumises aux métaux, on note un rendement en MS dans les feuilles d'*Atriplex halimus* plus élevé chez la provenance «Oued'Rhiou» que chez les quatre autres provenances et particulièrement au niveau du traitement au plomb à la concentration (8000 ppm). Par ailleurs, on remarque qu'en présence de Pb, Cr(III) et Cr(VI) la teneur en matière sèche augmente dans les feuilles d'*Atriplex halimus* par rapport au témoin chez la plus part des provenances testées ; plus les concentrations des métaux augmentent plus la teneur en MS dans les feuilles augmente.

La détermination des teneurs en matière sèche au niveau des parties aériennes et des racines, ainsi que la croissance d'*Atriplex halimus* montrent que la biomasse croît au fur et à mesure que la concentration des métaux lourds augmente dans le milieu. Ces résultats peuvent être comparés à ceux d'**Epelde et al. (2008)**, pour la plante hyperaccumulatrice *Thlaspi caerulescens* qui, lorsqu'elle est exposée à des pollutions au Cd et au Zn montre une biomasse et des valeurs de ses pigments photosynthétiques supérieures à celles observées chez les témoins.

Nos résultats montrent que l'*Atriplex halimus* résiste au stress métallique en tolérant une concentration élevée des métaux lourds dans le milieu. Ces résultats peuvent être comparés avec les travaux d'**Aude (2009)**, qui ont également montré que des cultivars de Skado et de Lena cultivés en hydroponie avec des concentrations croissantes de Cd avaient enregistré des quantités importantes de biomasse. D'autre étude réalisée par **Malkowski et al. (2002)**, ont montré un accroissement de la

biomasse dans les zones racinaires contenant les plus grandes quantités de plomb, comme l'apex et la zone d'élongation. Cette augmentation de biomasse peut être attribuée à la synthèse de nouveaux composants pariétaux. Au niveau morphologique, une exposition à une faible concentration de plomb conduit au développement de racines plus courtes mais plus compactes (**Wierzbicka, 1998**). Par contre d'autres études ont montré que les métaux lourds à de très faibles concentrations inhibe la croissance des plantes (**Mishra et Choudhurt, 1998 ; Wierzbicka et Obidzinska, 1998 ; Tomulescu et al., 2004**).

Par ailleurs, des études faites par **Kosobrukhov et al. (2004) ; Xiong et al. (2006) ; Zheljazkov et al. (2006)**, ont montré que l'inhibition de la croissance n'est pas forcément corrélée à une diminution de biomasse. Ceci pourrait s'expliquer d'après **Seregin et Ivanov (2001) ; Sharma et Dubey (2005) ; Cecchi (2008)**, par l'altération de nombreux processus physiologiques comme la régulation du statut hydrique, la nutrition minérale, la respiration ou la photosynthèse et l'interaction des métaux avec les différents composants cellulaires et les macromolécules (protéines, ADN, etc.). La biomasse en matière sèche peut être comme le reflet des réserves accumulées préalablement et résultent de l'activité photosynthétique (**Mazliak, 1982**).

Les plantes d'*Atriplex halimus* ont démontré une très bonne efficacité de tolérance aux polluants métalliques (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) aussi bien pour des concentrations métalliques élevées que pour des concentrations plus faibles. De plus en présence d'une charge polluante plus élevée aucun effet toxique n'a été observé sur la croissance des plantes. En effet quel que soit le métal considéré, aucune différence significative sur la production de biomasse végétale n'a été observée entre les trois conditions métalliques testées. Ce résultat souligne la capacité de cette espèce à tolérer des concentrations métalliques élevées de plomb et de chrome sous ses deux formes d'oxydation (Cr(III) et Cr(VI)).

I-2-4-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en matière minérale (MM)

Dans cette partie, nous avons essayé de mettre en évidence les modifications de la teneur en matière minérale des parties aériennes (tiges et feuilles) et racinaires des plantes d'*Atriplex halimus* sous l'effet du stress métallique par le Pb, le Cr(III) et le Cr(VI) à trois différentes concentrations.

I-2-4-2-1- Dans les racines

Les résultats de teneurs en matière minérale dans les racines, exprimées en pourcentage par rapport à la matière sèche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 21**.

De manière globale, les plantes d'*Atriplex halimus* qui sont, traitées par le Cr(III) (750 ppm), le Cr(VI) (100 et 150 ppm) et le Pb (4000 et 8000 ppm) ont des teneurs plus élevées que le témoin. La teneur en matière minérale la plus élevée est de 48,418 % de MS chez la provenance de «Sig», traitées par le plomb à 4000 ppm, contre la teneur la plus faible enregistrée chez la provenance de «Kharouba» avec un taux de 33,998 % de MS à 1000 ppm de plomb.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 27, Annexe 15**), permettent de conclure que les effets "Provenance" ($P= 0,465$) et "Métal" ($P= 0,495$) n'influent pas de manière significative sur les teneurs en matière minérale MM dans les racines d'*Atriplex halimus*. Seul le facteur "Concentration" qui influe de manière hautement significative ($P\leq 0,001$).

La corrélation de ces facteurs montre à son tour des effets significatifs pour les interactions "Provenance-Métal" et "Métal-Concentration" ($P\leq 0,01$) et des effets très significatifs pour l'interaction "Provenance-Concentration" ($P= 0$).

L'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" a un effet hautement significatif sur ce paramètre ($P= 0$).

Les teneurs moyennes en matière minérale enregistrées dans les racines des témoins (**Tableau 21**), sont plus élevées que chez les provenances traitées au Cr(VI) à la concentration 50 ppm chez les quatre provenances.

Le stress des plantes d'*Atriplex halimus* aux métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) induit une augmentation des teneurs en matière minérale chez l'ensemble des provenances testées. Cette augmentation est surtout prononcée chez «Sig et Oued'Rhiou», traitées au plomb à la concentration 4000 ppm.

Tableau 21. Teneur moyenne en matière minérale (MM en % de MS) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	42,184 ^{ABCDEF} \pm 3,175	43,108 ^{ABCDEF} \pm 3,460	37,863 ^{DEFG} \pm 2,156	40,629 ^{ABCDEF} \pm 2,986
Pb	1000	33,998 ^I \pm 2,986	39,350 ^{BCDEF} \pm 4,335	43,435 ^{ABCDEF} \pm 3,376	43,233 ^{ABCDEF} \pm 4,091
	4000	39,532 ^{HI} \pm 2,371	38,195 ^{CDEF} \pm 2,563	48,418 ^A \pm 2,309	46,643 ^{AB} \pm 4,149
	8000	46,266 ^{ABC} \pm 2,783	41,392 ^{ABCDEF} \pm 2,036	42,093 ^{ABCDEF} \pm 3,299	39,490 ^{BCDEF} \pm 2,265
Cr(III)	250	42,065 ^{ABCDEF} \pm 2,142	45,108 ^{ABCDE} \pm 3,193	34,170 ^I \pm 4,167	42,336 ^{ABCDEF} \pm 4,576
	500	46,283 ^{ABC} \pm 4,937	35,133 ^G \pm 3,184	45,344 ^{ABCDE} \pm 2,664	34,652 ^{HI} \pm 3,886
	750	41,082 ^{ABCDEF} \pm 2,464	48,015 ^A \pm 1,313	37,516 ^{EF} \pm 5,400	45,236 ^{ABCDE} \pm 3,428
Cr(VI)	50	42,095 ^{ABCDEF} \pm 3,025	37,372 ^{EF} \pm 2,751	37,621 ^{EF} \pm 4,133	39,148 ^{ABCDEF} \pm 1,803
	100	44,137 ^{ABCDEF} \pm 4,031	45,223 ^G \pm 3,544	44,074 ^{ABCDEF} \pm 4,471	44,444 ^{ABCDEF} \pm 5,069
	150	36,673 ^{FG} \pm 4,908	43,646 ^{ABCDEF} \pm 3,085	46,550 ^{AB} \pm 2,393	46,079 ^{ABCD} \pm 1,463

Il est intéressant de noter que plus la concentration des métaux augmente plus on enregistre de teneurs en MM dans les racines chez la plus part des provenances testées (Voir **Tableau 21**).

Des travaux montrent que l'*Atriplex halimus* accumule durant la période été-automne des quantités importantes en MM ; les pourcentages les plus élevés de fer sont relevés durant le mois d'Octobre et diminuent durant le mois d'Avril. Le potassium présente des valeurs très élevées durant les mois de Juin et Juillet (**Abbad et al., 2004**), ce qui explique la teneur importante en matière minérale chez la plus part des provenances testées.

I-2-4-2-2- Dans les tiges

Les résultats de teneurs en matière minérale dans les tiges, exprimées en pourcentage par rapport à la matière sèche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 22**.

L'étude statistique des résultats de l'analyse de variance (**Tableau 28, Annexe 16**), révèle que les facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" influent de manière hautement significative ($P \leq 0,001$), sur la teneur en matière minérale dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)). Quant aux effets d'interactions, un niveau hautement significatif a été enregistré par l'interaction "Provenance-Concentration", ainsi que l'interaction "Métal-Concentration" ($P \leq 0,001$). Seul l'interaction "Provenance-Métal" qui n'a pas une influence significative ($P = 0,576$).

L'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influe de manière hautement significative sur ce paramètre ($P = 0$).

Le test de **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 % pour le facteur "Provenance" définit deux groupes homogènes (**Tableau 29, Annexe 16**) : Un groupe homogène A constitué par «Kharouba» et le second groupe homogène B qui est représenté par «Béni Saf, Sig et Oued'Rhiou».

Le facteur "Métal" définit également deux groupes homogènes (**Tableau 30, Annexe 16**) : Un groupe A pour les traitements au plomb et le groupe B pour les traitements au Cr(III) et Cr(VI).

Le facteur "Concentration" définit quatre groupes homogènes (**Tableau 31, Annexe 16**) : Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI), le deuxième groupe B par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI), le 3^{ème} groupe C par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) et le 4^{ème} groupe D par le Témoin qui représente les teneurs les plus faibles en MM.

L'interaction des facteurs "Provenance-Concentration" présente neuf groupes homogènes (Voir **Tableau 32, Annexe 16**).

Tableau 22. Teneur moyenne en matière minérale (MM en % de MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	18,393 ^{BCD} ±3,895	16,180 ^{DEF} ±2,272	15,197 ^{DEF} ±1,151	13,137 ^{EF} ±0,969
Pb	1000	22,178 ^{AB} ±1,344	21,573 ^{ABC} ±1,472	25,179 ^A ±3,122	21,728 ^{ABC} ±2,588
	4000	26,151 ^A ±3,734	16,117 ^{DEF} ±1,563	12,461 ^F ±2,111	16,112 ^{DEF} ±1,529
	8000	17,517 ^{DE} ±1,714	24,862 ^A ±3,144	21,689 ^{ABC} ±1,564	24,083 ^A ±2,023
Cr(III)	250	14,846 ^{DEF} ±3,653	13,692 ^{DEF} ±2,712	13,635 ^{DEF} ±0,917	17,288 ^{DEF} ±1,914
	500	15,913 ^{DEF} ±1,201	14,175 ^{DEF} ±1,608	16,023 ^{DEF} ±1,909	22,550 ^{AB} ±1,874
	750	23,016 ^A ±1,980	24,207 ^A ±1,437	23,119 ^A ±1,056	13,970 ^{DEF} ±1,356
Cr(VI)	50	14,191 ^{DEF} ±1,006	17,425 ^{DEF} ±1,242	17,800 ^{CDE} ±2,865	14,278 ^{DEF} ±1,076
	100	24,324 ^A ±2,584	22,092 ^{AB} ±0,610	24,177 ^A ±0,722	17,469 ^{DE} ±2,153
	150	16,259 ^{DEF} ±1,324	13,451 ^{DEF} ±0,895	13,456 ^{DEF} ±1,307	23,160 ^A ±2,025

On note tout d'abord que toutes les provenances testées présentent un taux très important de matière minérale. La composition chimique des arbustes d'*Atriplex* varie considérablement au cours de l'année. Les teneurs en matières minérales sont maximales durant la saison estivale (**Nefzaoui et Chermiti, 1991**), la période pendant laquelle nous avons récolté les plantes d'*Atriplex halimus*.

Les résultats moyens dégagés dans le **tableau 22**, indiquent que chez les plantes, traitées par le Pb, la teneur en matière minérale dans les tiges était aussi importante que chez les plantes témoins et celles traitées au Cr(III) au Cr(VI), ceci est observé chez les quatre provenances. De plus, en présence de Cr(III), et notamment pour la concentration 250 ppm, ce nombre est très réduit. En outre, La provenance «Kharouba» traitée à la concentration 4000 ppm de Pb enregistre une teneur en matière minérale (26,151 %) plus élevée que celle des autres provenances dans les conditions normales «Témoin» ou celles traitées avec différentes concentration des métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI). Selon **Kozlowski et al. (2003)**, non seulement les concentrations des métaux lourds, mais c'est principalement leur forme qui affecte leur biodisponibilité et leurs toxicité, les formes les plus toxiques sont les formes ioniques dont les concentrations excessives mènent à des dérèglements du métabolisme cellulaire.

I-2-4-2-3- Dans les feuilles

Les résultats de teneurs en matière minérale dans les feuilles, exprimées en pourcentage par rapport à la matière sèche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 23**.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 33, Annexe 17**), montrent que les deux facteurs "Provenance" et "Concentration" influent de manière hautement significative ($P \leq 0,001$) sur la teneur en matière minérale dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, seul le facteur "Métal" a une faible influence significative ($P \leq 0,05$).

Les effets d'interactions bifactorielles "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" n'ont aucun effet sur ce paramètre avec respectivement ($P = 0,113$, $P = 0,576$ et $P = 0,052$). L'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" n'influe pas de manière significative ($P = 0,890$) sur ce paramètre.

En comparant les moyennes du facteur "Provenance", le test **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 % (**Tableau 34, Annexe 17**), fait ressortir trois groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Kharouba et Oued'Rhiou», le groupe AB par «Béni Saf» et le dernier groupe homogène C constitué par «Sig», qui représente des teneurs en MM dans les feuilles les plus faibles.

La comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour ce paramètre (**Tableau 35, Annexe 17**), fait apparaître trois groupes homogènes : Le premier groupe A représenté par le facteur Cr(III), le second groupe AB représenté par le plomb et le 3^{ème} groupe B par le Cr(VI).

En ce qui concerne le facteur "Concentration" quatre groupes homogènes apparaissent (**Tableau 36, Annexe 17**) : Le groupe A représenté par la concentration 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI), le groupe B (4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI)), le groupe C (1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI)) et ensuite vient le dernier groupe D chez le témoin représenté par des teneurs en MM les plus faibles.

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la matière minérale dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Tableau 23**) ci dessous.

Tableau 23. Teneur moyenne en matière minérale (MM en % de MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	17,746 ^D \pm 2,282	14,734 ^D \pm 1,858	15,827 ^D \pm 2,452	15,715 ^D \pm 1,631
Pb	1000	19,451 ^C \pm 3,779	16,295 ^C \pm 2,214	14,842 ^C \pm 2,839	16,112 ^C \pm 6,354
	4000	22,820 ^B \pm 2,659	19,236 ^B \pm 4,610	19,505 ^B \pm 4,959	21,818 ^B \pm 3,968
	8000	22,568 ^A \pm 1,335	22,894 ^A \pm 1,370	20,758 ^A \pm 2,293	22,075 ^A \pm 1,869
Cr(III)	250	19,934 ^C \pm 3,633	20,834 ^C \pm 3,564	20,781 ^C \pm 5,824	20,893 ^C \pm 7,791
	500	19,747 ^B \pm 1,533	20,690 ^B \pm 0,754	20,925 ^B \pm 2,967	21,790 ^B \pm 1,501
	750	21,783 ^A \pm 1,921	22,089 ^A \pm 1,896	21,935 ^A \pm 2,266	23,111 ^A \pm 2,543
Cr(VI)	50	18,981 ^C \pm 7,580	17,641 ^C \pm 2,280	15,501 ^C \pm 2,248	17,958 ^C \pm 3,738
	100	21,607 ^B \pm 2,327	21,936 ^B \pm 2,147	14,183 ^B \pm 4,037	19,298 ^B \pm 2,995
	150	22,439 ^A \pm 2,296	21,918 ^A \pm 3,157	19,532 ^A \pm 1,622	22,702 ^A \pm 3,726

Les teneurs moyennes en matière minérale mesurées dans les feuilles des plantes traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement plus élevées chez les provenances «Kharouba et Oued'Rhiou» que celles signalées chez les provenances «Béni Saf et Sig».

Par ailleurs, En présence du Pb et Cr(III), les quatre provenances présentent des teneurs en matière minérale plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(VI) (**Tableau 23**).

Nos résultats enregistrent pour cette espèce une accumulation de matière minérale dans les différents organes (feuilles, tiges et racines) sous les traitements métalliques par le Pb, Cr(III) et Cr(VI) ; les mêmes remarques sont observées par **Brunet et al. (2008)**, qui ont constaté que les racines de *Lathyrus sativus* exposées au plomb ont montré une augmentation de la teneur en Pb avec une augmentation des niveaux de Na⁺. **Lutts et al. (2001)**, dans leurs études sur l'implication du sodium dans les réponses aux divers stress abiotiques, ont remarqué également une accumulation du sodium dans les différents organes de la plante, ainsi que dans les cultures cellulaires correspondantes. Ces auteurs suggèrent que l'accumulation peut être une partie d'une stratégie physiologique de résistance aux stress abiotiques. Il a été démontré que l'*Atriplex halimus* est capable

d'accumuler des quantités élevées de Na dans les trichomes qui couvre la surface des feuilles, mais peuvent aussi accumuler des autres éléments présents en excès (**Freitas et Breckle, 1993**). En effet, l'*Atriplex halimus* est une plante qui absorbe de grandes quantités d'éléments minéraux et en particulier le Na, comme il a été observé une augmentation de l'accumulation de Na dans *Saltbush* méditerranéen soumis à la sécheresse (**Martinez et al., 2003**). L'*Atriplex halimus* se caractérise par la tolérance à la toxicité des métaux ce qui fait d'elle une vraie arme écologique devant la pollution (**Ortiz-Dorda et al., 2005**).

Par ailleurs, après l'application de la solution métallique, l'accumulation de la matière minérale augmente pour toutes les concentrations chez les parties aériennes et les racines d'*Atriplex halimus*. Nos résultats sont confirmés par **Azza Mazher et al. (2007)**, chez *Leuceana leucocephala*. **Kibria et al. (2009)**, rapportent les mêmes observations chez les feuilles et les racines d'*Amaranthus oleracea* L. et les racines d'*Amaranthus gangeticus* L., ces résultats sont signalés aussi chez la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) (**Maneva et al., 2013**).

Les plantes cultivées dans des milieux contaminés par les métaux lourds sont sujets à des modifications dans leur composition chimique non seulement pour le contenu des métaux lourds, mais aussi pour un autre macroélément comme le potassium (**Das et al., 1998**). L'accumulation de potassium est très bénéfique à la plante puisque ce cation est le premier candidat à contrecarrer le potentiel négatif du milieu (**Sairam et Tyagi, 2004**) et la tolérance aux contraintes biotiques ou abiotiques est attribuée à la capacité des plantes à maintenir une forte proportion en ce cation (**Misra et Dwivedi, 2004**).

La nutrition minérale de la plante concerne l'ensemble des mécanismes impliqués dans le prélèvement, le transport, le stockage et l'utilisation des ions minéraux nécessaires au métabolisme et à la croissance de la plante (**Morot-Gaudry, 2013**). Plusieurs études démontrent que l'absorption des nutriments par les plantes est significativement affectée par la présence des métaux lourds dans le milieu extérieur (**Chatterjee et al., 2004 ; Sharma et Dubey, 2005 ; Gopal et Rizvi, 2008**), ce qui induit une compétition avec les ions minéraux au niveau des transporteurs cellulaires (**Marschner, 1995**), altérant la perméabilité membranaire (**Gussarsson, 1994**), et induisant une carence en éléments nutritifs dans les plantes (**Marschner, 1995**), en particulier ceux qui ont la même valence comme le Fe et le Mn (**Dong et al., 2006**). D'autres chercheurs suggèrent aussi que les métaux lourds perturbent les structures membranaires et pariétales, modifient le statut hydrique, perturbent l'absorption et/ou la translocation des éléments minéraux essentiels (calcium, manganèse, zinc, fer, etc.) ou encore réduisent la photosynthèse (**Seregin et Ivanov, 2001 ; Sharma et Dubey, 2005**).

I-2-4-3- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en matière organique (MO)

Dans cette partie, nous avons essayé de mettre en évidence les modifications de la teneur en matière organique des parties aériennes (tiges et feuilles) et racinaires des plantes d'*Atriplex halimus* sous l'effet du stress métallique par le Pb, le Cr(III) et le Cr(VI) à trois différentes concentrations.

I-2-4-3-1- Dans les racines

Les résultats de teneurs en matière organique dans les racines, exprimées en pourcentage par rapport à la matière sèche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 24**.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 37, Annexe 18**), montrent que le facteur "Métal" n'influe pas de manière significative ($P= 0,054$) sur la teneur en matière organique dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)). Ce paramètre est sous l'action des deux facteurs : "Provenance" et "Concentration" qui influent de manière très significative ($P\leq 0,01$).

L'action conjuguée de ces deux facteurs "Provenance-Concentration" et l'effet d'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" entraînent des effets hautement significatifs ($P= 0$). Par ailleurs, les effets d'interactions bifactorielles "Provenance-Métal" et "Métal-Concentration" n'ont aucun effet sur ce paramètre avec respectivement ($P= 0,110$ et $P= 0,265$).

En comparant les moyennes du facteur "Provenance", le test **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 % (**Tableau 38, Annexe 18**), fait ressortir deux groupes homogènes : Le groupe A par «Oued'Rhiou, Béni Saf et Kharouba» et le second groupe homogène B constitué par «Sig», qui représente des teneurs en MO dans les racines les plus faibles.

En ce qui concerne le facteur "Concentration" deux groupes homogènes apparaissent (**Tableau 39, Annexe 18**) : Le groupe A représenté par le témoin à la concentration 1000 et 4000 ppm de Pb, 250 et 500 ppm de Cr(III) et à 50 et 100 ppm de Cr(VI), ensuite vient le second groupe B représenté par : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI).

En comparant les moyennes des facteurs "Provenance-Métal-Concentration", le test de **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 % permet de constituer treize groupes homogènes (**Tableau 40, Annexe 18**).

Tableau 24. Teneur moyenne en matière organique (MO en % de MS) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal [](ppm)		Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	57,816 ^{BCDEFG} \pm 3,175	61,805 ^{ABCDE} \pm 2,563	51,582 ^G \pm 2,309	65,348 ^{AB} \pm 3,886
Pb	1000	66,002 ^A \pm 2,986	51,985 ^G \pm 1,313	65,830 ^A \pm 4,167	59,371 ^{ABCDEFG} \pm 2,986
	4000	53,735 ^{EFG} \pm 2,783	64,867 ^{AB} \pm 3,184	62,137 ^{ABCD} \pm 2,156	56,767 ^{CDEFG} \pm 4,091
	8000	60,468 ^{ABCDEF} \pm 2,371	58,608 ^{ABCDEFG} \pm 2,036	56,565 ^{CDEFG} \pm 3,376	53,357 ^{FG} \pm 4,149
Cr(III)	250	58,918 ^{ABCDEFG} \pm 2,464	56,892 ^{CDEFG} \pm 3,460	57,907 ^{BCDEFG} \pm 3,299	57,664 ^{BCDEFG} \pm 4,576
	500	57,935 ^{BCDEFG} \pm 2,142	54,892 ^{DEFG} \pm 3,193	62,484 ^{ABCD} \pm 5,400	54,764 ^{DEFG} \pm 3,428
	750	53,717 ^{EFG} \pm 4,937	60,650 ^{ABCDEF} \pm 4,335	54,656 ^{DEFG} \pm 2,664	60,511 ^{ABCDEF} \pm 2,265
Cr(VI)	50	63,328 ^{ABC} \pm 4,908	54,777 ^{DEFG} \pm 3,544	53,450 ^{FG} \pm 2,393	60,852 ^{ABCDEF} \pm 1,803
	100	55,863 ^{CDEFG} \pm 4,031	62,628 ^{ABCD} \pm 2,751	62,379 ^{ABCD} \pm 4,133	53,921 ^{EFG} \pm 1,463
	150	57,905 ^{BCDEFG} \pm 3,025	56,354 ^{CDEFG} \pm 3,085	55,926 ^{CDEFG} \pm 4,471	55,556 ^{CDEFG} \pm 5,069

Les teneurs moyennes en matière organique mesurées dans les racines des plantes d'*Atriplex halimus*, sont nettement plus élevées chez les plantes «Témoins» que celles signalées chez les autres traitées aux métaux : Pb, Cr(III) et Cr(VI). Quant aux teneurs en matière organique obtenues après stress aux métaux, les racines présentent des comportements contrastés. En fait, la provenance «Kharouba» présente une augmentation des teneurs en matière organique dans la quasi-totalité des traitements. Cette augmentation est plus nette en présence du Pb et Cr(VI). Par ailleurs, La soumission à l'action du plomb induit une diminution des teneurs en matière organique dans les racines. Cette diminution est surtout prononcée chez les provenances «Sig et Oued'Rhiou» (**Tableau 24**).

I-2-4-3-2- Dans les tiges

Les résultats de teneurs en matière organique dans les tiges, exprimées en pourcentage par rapport à la matière sèche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 25**.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 41, Annexe 19**), permettent de conclure que tout les effets "Provenance", "Métal" et "Concentration" et leurs interactions, n'influent pas de manière significative sur la teneur en matière organique dans les tiges d'*Atriplex halimus*.

Les teneurs moyennes en matière organique mesurées dans les tiges des plantes témoins (**Tableau 25**), sont nettement plus élevées chez la provenance «Sig» que celles signalées chez les quatre autres provenances.

Tableau 25. Teneur moyenne en matière organique (MO en % de MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	81,607 \pm 3,895	83,820 \pm 2,272	87,539 \pm 2,111	82,712 \pm 1,914
Pb	1000	77,822 \pm 1,344	86,308 \pm 2,712	84,803 \pm 1,151	83,888 \pm 1,529
	4000	85,154 \pm 3,653	78,427 \pm 1,472	78,311 \pm 1,564	75,917 \pm 2,023
	8000	73,849 \pm 3,734	75,138 \pm 3,144	74,821 \pm 3,122	78,272 \pm 2,588
Cr(III)	250	82,483 \pm 1,714	75,793 \pm 1,437	76,881 \pm 1,056	86,030 \pm 1,356
	500	76,984 \pm 1,980	85,825 \pm 1,608	86,365 \pm 0,917	86,863 \pm 0,969
	750	84,087 \pm 1,201	83,883 \pm 1,563	83,977 \pm 1,909	77,450 \pm 1,874
Cr(VI)	50	85,809 \pm 1,006	86,549 \pm 0,895	86,544 \pm 1,307	85,722 \pm 1,076
	100	83,741 \pm 1,324	77,908 \pm 0,610	75,823 \pm 0,722	82,531 \pm 2,153
	150	75,676 \pm 2,584	82,575 \pm 1,242	82,200 \pm 2,865	76,840 \pm 2,025

Le stress des plantes d'*Atriplex halimus* aux métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) induit une diminution des teneurs en matière organique chez l'ensemble des provenances. Cette diminution est surtout prononcée chez «Béni Saf et Sig», traitées au Pb et «Kharouba» traitée au Cr(VI).

Il est intéressant de noter que plus la concentration des métaux augmente moins on enregistre de teneurs en «MO» dans les tiges.

Par ailleurs, La soumission à l'action des métaux à Pb (4000 et 8000 ppm) et Cr(VI) (100 et 150 ppm) induit une diminution des teneurs en matière organique dans les tiges d'*Atriplex halimus*. Cette diminution est surtout prononcée à la concentration 8000 ppm de Plomb (**Tableau 25**).

De manière globale, les plantes témoins ont des teneurs en matière organique dans leurs tiges plus élevées que celles, traitées par les moyennes et fortes concentrations des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)).

I-2-4-3-3- Dans les feuilles

Les résultats de teneurs en matière organique dans les feuilles, exprimées en pourcentage par rapport à la matière sèche chez l'espèce d'*Atriplex halimus*, sont présentés dans le **tableau 26**.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 42, Annexe 20**), montrent que le facteur "Provenance" influe de manière significative sur des teneurs en matière organique dans les feuilles d'*Atriplex halimus* ($P \leq 0,05$) et le facteur "Concentration" influe fortement sur ce paramètre ($P = 0$). Par ailleurs, aucune différence significative n'apparaît sur le facteur "Métal" ($P = 0,03$).

L'élaboration de la teneur en MO dans les feuilles d'*Atriplex halimus* semble être faite hors des effets d'interaction des facteurs étudiés.

En comparant les moyennes du facteur "Provenance", le test de **NEWMAN-KEULS** au seuil de 0,05 (**Tableau 43, Annexe 20**), ressort trois groupes homogènes :

Le groupe A par «Sig», le second groupe homogène B constitué par «Béni Saf» et le dernier groupe par «Oued'Rhiou et Kharouba», qui exprime des teneurs en matière organique dans les feuilles les plus faibles qui semble plus affectée par la présence des métaux lourds.

La comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour ce paramètre (**Tableau 44, Annexe 20**), fait apparaître trois groupes homogènes : Le premier groupe A représenté par le facteur Cr(VI), qui en leur présence les plantes des quatre provenances testées ont des teneurs plus élevées en MO, le second groupe AB représenté par le plomb et le 3^{ème} groupe B correspondant au Cr(III) sous l'effet duquel on observe une réduction de la matière organique dans leurs feuilles.

En ce qui concerne le facteur "Concentration" quatre groupes homogènes apparaissent (**Tableau 45, Annexe 20**) : Le groupe A représenté par le témoin, le groupe B (1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI)), le groupe C (4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI)) et ensuite vient le dernier groupe D, représenté par la concentration 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI), avec des teneurs les plus faibles.

L'application des métaux provoque une diminution de la teneur en matière organique dans les feuilles d'*Atriplex halimus* (**Tableau 26**). De manière globale, les plantes témoin ont des teneurs en matière organique plus élevées que celles des plantes, traitées par les concentrations (250, 500 et 750 ppm) de Cr(III), (4000 et 8000 ppm) de Pb et (100 et 150 ppm) de Cr(VI).

Tableau 26. Teneur moyenne en matière organique (MO en % MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds : (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	82,254 ^A \pm 2,282	85,266 ^A \pm 1,858	84,173 ^A \pm 2,452	84,285 \pm 1,631
Pb	1000	80,549 ^B \pm 3,779	83,705 ^B \pm 2,214	85,158 ^B \pm 2,839	83,888 ^B \pm 6,354
	4000	77,180 ^C \pm 2,659	80,764 ^C \pm 4,610	80,495 ^C \pm 4,959	78,182 ^C \pm 3,968
	8000	77,432 ^D \pm 1,335	77,106 ^D \pm 1,370	79,242 ^D \pm 2,293	77,925 ^D \pm 1,869
Cr(III)	250	80,066 ^B \pm 3,633	79,166 ^B \pm 3,564	79,219 ^B \pm 5,824	79,107 ^B \pm 7,791
	500	80,253 ^C \pm 1,533	79,310 ^C \pm 0,754	79,075 ^C \pm 2,967	78,210 ^C \pm 1,501
	750	78,217 ^D \pm 1,921	77,911 ^D \pm 1,896	78,065 ^D \pm 2,266	76,889 ^D \pm 2,543
Cr(VI)	50	81,019 ^B \pm 7,580	82,359 ^B \pm 2,280	84,499 ^B \pm 2,248	82,042 ^B \pm 3,738
	100	78,393 ^C \pm 2,327	78,064 ^C \pm 2,147	85,817 ^C \pm 4,037	80,702 ^C \pm 2,995
	150	77,561 ^D \pm 2,296	78,082 ^D \pm 3,157	80,468 ^D \pm 1,622	77,298 ^D \pm 3,726

Chez l'*Atriplex halimus* L., la biomasse aérienne n'est pas assez affectée par la présence des métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) dans le milieu de culture. Cependant, La littérature fait mention d'une réduction moins importante de la biomasse des parties aériennes par rapport aux parties racinaires en réponse à une exposition aux métaux lourds. Ainsi, différents cultivars de blé (des espèces *Triticum aestivum* et *T. turgidum*) exposés au cadmium présentent une diminution de la masse des parties aériennes d'environ 30 % alors que la masse des parties racinaires est réduite de 45% (Stolt *et al.*, 2003). Cependant, l'altération plus forte du système racinaire n'est pas toujours mise en évidence. Les travaux précédemment cités de Ruegsegger et Brunold (1992), sur le maïs et de Zhao *et al.* (2006), sur *Arabidopsis halleri* mettent en évidence que les biomasses des parties aériennes et racinaires sont réduites en présence de cadmium. Le plus surprenant chez *A. halleri*, est que même avec cette forte réduction de croissance (de l'ordre de 70 %), les plantes contiennent des quantités très importantes de cadmium, comme il sera mentionné ultérieurement dans la partie consacrée à la phytoaccumulation. Dans les publications relatives à l'effet des métaux lourds sur la biomasse, les conditions expérimentales sont très diverses, ce qui rend difficile la formulation d'une conclusion. En effet, la diminution de biomasse peut dépendre à la fois de l'espèce étudiée, de l'âge des plantes au début du traitement, de la durée du traitement et/ou de la concentration en ces métaux.

La réduction de biomasse peut s'expliquer par une altération de l'activité photosynthétique. En effet, plusieurs auteurs font état d'une diminution de la teneur en chlorophylle et de l'activité du photosystème II en réponse au cadmium : **Chugh et Sawhney (1999)**, chez le pois, **Pagliano et al. (2006)**, chez le riz, **Mobin et Khan (2007)**, chez la moutarde ou encore **Ekmekci et al. (2008)**, chez le maïs. D'après ces auteurs, le cadmium perturbe le transfert des électrons et induit la formation d'ERO, ce qui a pour conséquence une altération de l'activité photosynthétique et de l'intégrité membranaire.

En conclusion, notre travail a mis en évidence l'impact des métaux lourds (plomb et chrome 'trivalent et hexavalent') sur la croissance et le développement d'*Atriplex halimus* L. L'effet de différentes concentrations de Pb (1000, 4000 et 8000 ppm), de Cr(III) (250, 500 et 750 ppm) et de Cr(VI) (50, 100 et 150ppm) sur quelques paramètres de croissance et de développement a été étudié. Les résultats obtenus montrent que le stress métallique n'a pas causé des perturbations significatives de la longueur des tiges et des racines, du nombre de feuilles et de la biomasse (MS et MM). Pour la matière organique, le stress métallique a induit une réduction du MO d'*Atriplex halimus*. En comparant les résultats obtenus, il apparaît que les paramètres mesurés peuvent être sujets à des rapports entre eux et de ce fait constituer des outils de compréhension globale sur la manière dont *Atriplex halimus* L. réagit au stress métallique grâce à différents mécanismes.

I-2-5- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en eau relative (RWC) d'*Atriplex halimus* L.

Pour apprécier l'état hydrique des plantes d'*Atriplex halimus* expérimentées sous stress métallique par différentes concentrations en Pb, Cr(III) et Cr(VI), nous avons mesuré la teneur relative en eau (RWC) (après 30 jours de l'application de la solution métallique), qui exprime la quantité d'eau présentée en pourcentage de la quantité mesurée à saturation et permet une évaluation physiologique de l'état hydrique du végétale.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 46, Annexe 21**), montrent que les trois facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" n'influent pas de manière significative avec une probabilité respectivement : (P= 0,807, P= 0,926 et P= 0,908) sur la teneur en eau relative chez l'*Atriplex halimus* L., traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)). La corrélation de ces facteurs ne permet pas à des effets significatifs, telles les interactions "Provenance-Métal" (P= 0,314), "Provenance-Concentration" (P= 0,606), "Métal-Concentration" (P= 0,322) et l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" (P= 0,485).

Chez les plantes cultivées dans les sols, non stressés par les métaux, le contenu relatif en eau atteint sa valeur optimale de 81,698 % chez les plantes d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la provenance «Kharouba», puis une légère diminution de la teneur relative en eau est enregistrée avec les traitements de 1000 ppm de plomb, 250 ppm de Cr(III) et de 50 ppm de Cr(VI). Il faut noter également que la teneur la plus faible est enregistrée chez les plantes traitées à la dose 8000 ppm du plomb, 750 ppm de Cr(III) et de 150 ppm de Cr(VI), soit une valeur minimale de 74,625 % chez les plantes d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la provenance «Kharouba» traitées au plomb à la concentration 8000 ppm (**Tableau 47, Annexe 22**).

L'analyse de la teneur relative en eau (RWC), nous permet de décrire d'une manière globale le statut hydrique et d'évaluer l'aptitude des plantes à réaliser une bonne osmorégulation et maintenir une turgescence cellulaire (**El Jaafari, 2000**), qui soit à même de garantir la continuité de l'activité métabolique. Par contre, le stress réduit le contenu relatif en eau des feuilles (**Albouchi et al., 2003**). Nos résultats montrent que le stress métallique, au plomb, Cr(III) et Cr(VI) à différentes concentrations, a provoqué une réduction de la teneur relative en eau d'une manière générale chez la plus part des provenances testées, mais l'effet de ce stress demeure significatif (**Figure 21**). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenu par (**Houshmand et al., 2005**). D'autres études ont permis aussi d'observer une diminution du taux de transpiration ainsi que du contenu en eau dans les plantes (**Iqbal et Mushtaq, 1987 ; Sharma et Dubey, 2005**). Même résultats ont été montré chez l'orge (*Hordium vulgare* L.) sous stress salin. Ceci pouvant être du à une fermeture des stomates induite par l'altération des flux de K^+ à travers la membrane et l'augmentation du contenu en acide absissique (ABA) (**Cheikh M'hamed et al., 2008**). **Aurélié (2009)**, a expliqué que le stress métallique provoqué par le zinc réduit de manière importante la teneur en eau des cals des tissus de la plante entière de la tomate, la réduction est d'autant plus marquée que la concentration en métal dans le milieu est élevée. Une corrélation positive est trouvée entre le comportement cellulaire et celui de la feuille. La turgescence cellulaire traduit surement encore mieux l'état physiologique des cellules ; les baisses importantes de turgescences peuvent être considérées comme des situations de détresse cellulaire non négligeables face aux ETM introduits dans le milieu de culture (**Aurélié, 2009**).

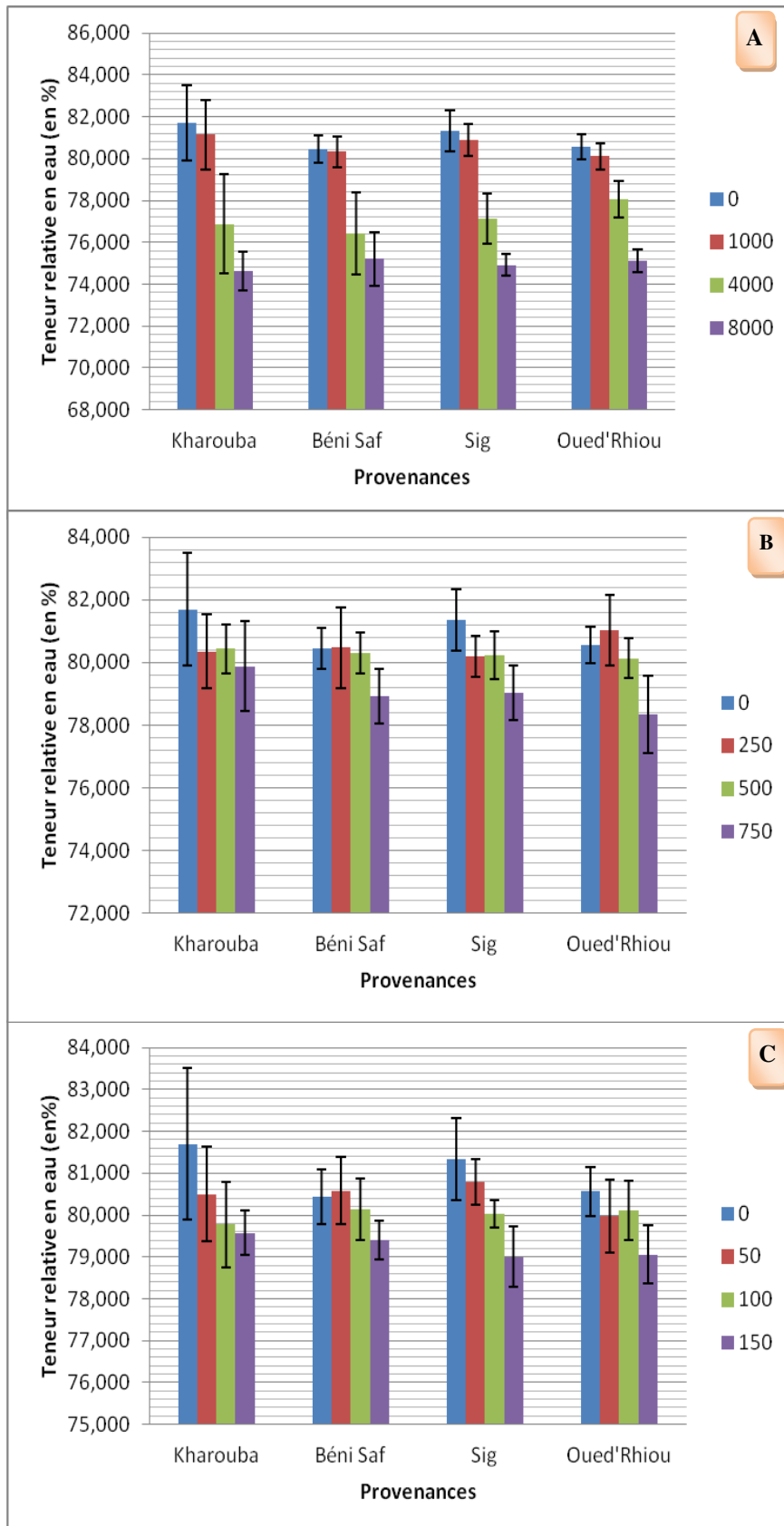


Figure 21. Effet des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en eau relative (en %) chez l'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types.

A : Effet du Plomb sur la teneur en eau relative chez l'*Atriplex halimus* L.

B : Effet du Cr(III) sur la teneur en eau relative chez l'*Atriplex halimus* L.

C : Effet du Cr(VI) sur la teneur en eau relative chez l'*Atriplex halimus* L.

II- Effet du stress par les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur les propriétés physico-chimiques des substrats (sol) obtenus dans les différents types d'expérimentation

Les échantillons sélectionnés pour cette étude sont les substrats des plantes d'*Atriplex halimus*, contaminés par l'ajout des trois solutions métalliques à trois différentes concentrations : le Pb à 1000, 4000 et 8000 ppm, le Cr(III) à 250, 500 et 750 ppm et le Cr(VI) à 50, 100 et 150 ppm. L'évolution du pH et la teneur en plomb et en chrome dans les substrats ont été mesurées en fonction des différentes situations expérimentales.

II-1- Evolution du pH dans les substrats (sol) en fonction des traitements au Pb, Cr(III) et au Cr(VI)

Nous avons voulu tester une hypothèse à savoir l'influence du pH sur l'accumulation de métaux lourds (Pb et Cr). En effet, nous avons un pH de 7,73 du substrat (Sol) dans le quel nous avons fait notre culture d'*Atriplex halimus* (Voir **Tableau 48, Annexe 23**).

La **figure 22**, illustre les valeurs moyennes du pH des substrats (sol) après 30 jours de traitement par différentes concentrations des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les plantes d'*Atriplex halimus* L.

Pour les plantes témoins le pH varie entre 7,562 pour la provenance «Oued'Rhiou» et 7,636 chez la provenance «Kharouba».

Il est à remarquer que l'application des concentrations croissantes des métaux lourds, appliqués dans la culture des plantes d'*Atriplex halimus*, induit un abaissement du pH par rapport au témoin.

Les pHs les plus bas se révèlent dans le traitement au Cr(III) pour la provenance «Sig» à la concentration 750 ppm (pH= 6,586).

Les résultats de l'analyse de variance sur le pH (**Tableau 49, Annexe 24**), montrent que les facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" présentent des différences hautement significatives (P= 0).

Les effets d'interactions bifactorielles "Provenance-Concentration" et "Provenance-Métal" n'ont aucun effet sur ce paramètre avec respectivement (P= 0,507 et P= 0,109), quand à l'interaction "Métal-Concentration" influe de manière hautement significative sur la variation des valeurs du pH (P= 0). L'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influe faiblement sur ce paramètre (P≤0,05).

Le test de **NEWMAN-KEULS au seuil de 5 %**, permet de constituer différentes classes en fonction des facteurs étudiés. La comparaison des moyennes du facteur "Provenance" (**Tableau 50, Annexe 24**), détermine trois groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Béni Saf et Kharouba» avec des valeurs respectivement : pH= 7,214 et pH= 7,193, ensuite vient le groupe B représenté par «Oued'Rhiou» avec un pH= 7,162 et enfin un dernier groupe C par «Sig» avec un pH= 7,129.

La comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour ce paramètre (**Tableau 51, Annexe 24**), fait apparaître trois groupes homogènes : Le premier groupe A représenté par le facteur Cr(III), le second groupe B représenté par le Cr(VI) et le 3^{ème} groupe B correspondant au facteur Pb, sous l'effet duquel on observe une réduction des valeurs du pH dans les substrats traités à différentes doses de ces métaux.

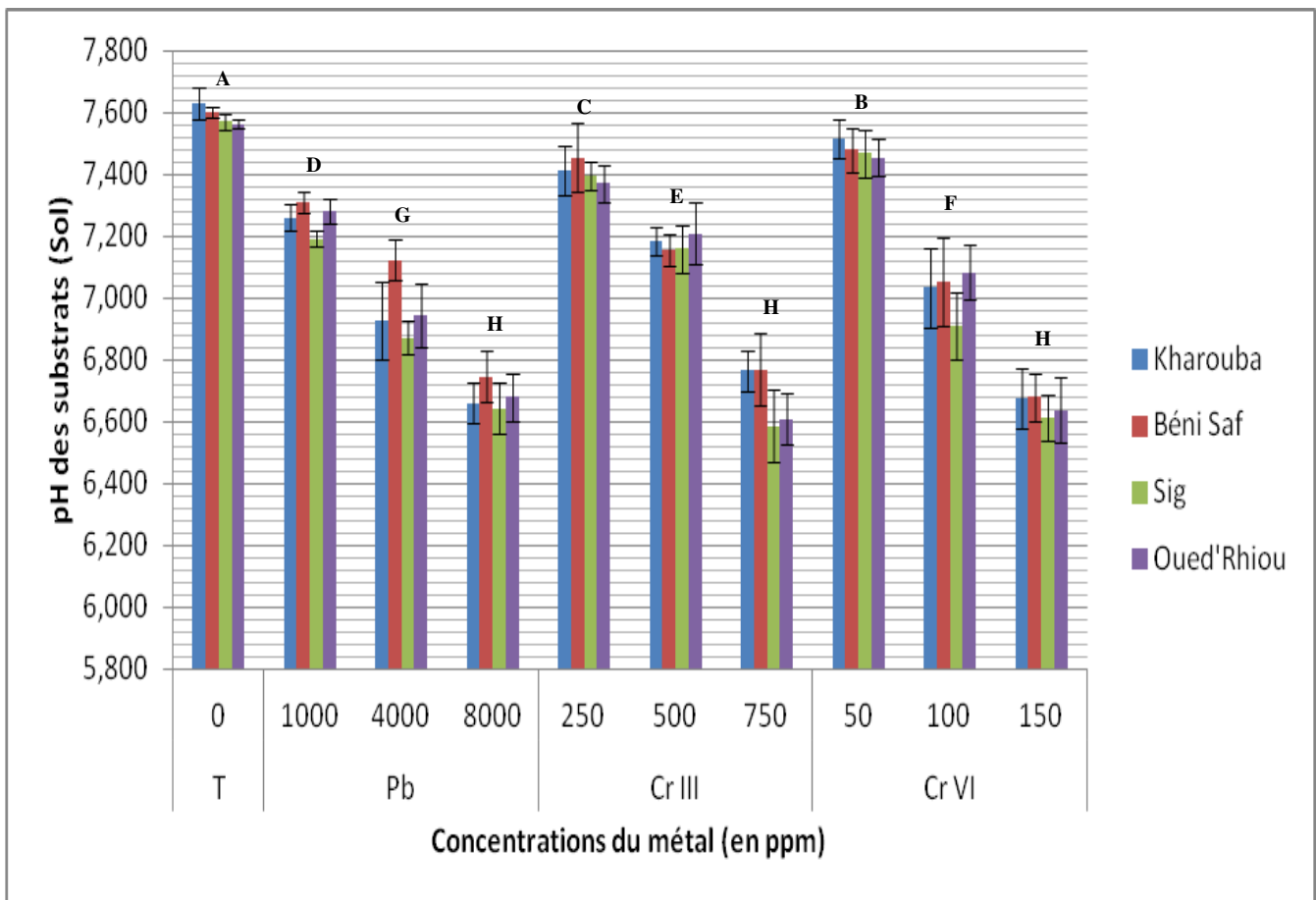


Figure 22. Valeurs moyennes du pH dans le substrat après 30 jours de traitement par différentes concentrations des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les plantes d'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types et les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

En ce qui concerne le facteur "Concentration" quatre groupes homogènes apparaissent (**Tableau 52, Annexe 24**) : Le groupe A représenté par le témoin, le groupe B (1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI)), le groupe C (4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI)) et ensuite vient le dernier groupe D représenté par la concentration : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI), qui représentent des valeurs du pH les plus faibles.

Toutefois, le pH mesuré au niveau des différents substrats, à la fin de l'expérience, est un pH légèrement basique dans les substrats traités avec des faibles et moyennes concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 et 500 ppm de Cr(III), 50 et 150 ppm de Cr(VI). Alors que, le pH est légèrement acide dans les substrats traités avec des fortes concentrations : 4000 et 8000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) (**Tableau 53, Annexe 25**).

Dans les sols pollués au plomb et au chrome sous ces deux formes (trivalente et hexavalente), l'*Atriplex halimus* se développe bien, et l'application de ces métaux induit un pH nettement moins élevé que ceux trouvés dans les sols non-pollués. Une observation similaire a été effectuée par les auteurs **Cheng et Wong (2002)** ; **Yu et Cheng (2003)**, qui signalent que dans un sol contaminé au Zn, entraîne une diminution du pH du sol (0,2 à 0,5 unités). En théorie, la diminution de pH d'un sol riche en métaux devrait augmenter leur biodisponibilité. Effectivement, **Sanders et al. (1986)**, ont montré que si le pH du sol diminue d'une unité, la concentration de métal libre augmente, et par conséquent améliore le processus de phytoextraction. Toutefois, la baisse de pH du sol pourrait affecter négativement la fonction biologique des sols des écosystèmes et à terme la santé de la plante.

La pollution par les métaux lourds engendre des modifications des propriétés biologiques et physico-chimiques des sols (**Rost et al., 2001**), tels que le pH qui constitue un facteur dont le rôle est crucial pour la mobilité des ions métalliques, car il influence le nombre de charges négatives pouvant être mises en solution (**McLaughlin et al., 2000**). L'équilibre entre les phases solides et en solution du métal dans le sol est maintenu par le pH du sol selon des voies différentes : une augmentation du pH du sol peut conduire à la précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes métalliques (**Paulose et al., 2006**), entraîner une augmentation de l'adsorption de cations ce qui augmente la charge négative (**Naidu et al., 1994**), qui peuvent limiter la solubilité et la biodisponibilité de toutes les espèces ioniques (**Deneux-Mustin et al., 2003**) et conduire à la formation des formes hydroxy des cations métalliques qui ont une plus grande affinité pour les sites d'absorption que les cations métalliques (**Naidu et al., 1994**).

Cependant, elle entraîne également la dissolution de matières organiques et la formation consécutive de complexes organo-métalliques plus solubles (**Chaignon, 2001**). Les variations de pH ont donc des conséquences complexes et parfois contraires sur la mobilité des métaux lourds, en particulier en présence de ligands organiques et inorganiques.

A pH légèrement acide des substrats traités par des fortes concentrations de Pb, de Cr(III) et de Cr(VI), la mobilité des métaux devrait être plus au moins grande, d'où on a observé, une augmentation de la teneur en Pb et en Cr dans les différents organes des plantes d'*Atriplex halimus*. Cependant, A pH basique des substrats traités par des faibles concentrations, la mobilité des métaux devrait être plus réduite. En effet, des faibles teneurs sont enregistrées au niveaux des différentes parties de la plante avec une faible translocation vers les parties aériennes.

Par ailleurs, la respiration racinaire augmente la pression partielle de CO₂ dans la rhizosphère contribuant une fois encore à son acidification (Nye, 1986 ; Hinsinger, 1998). La contribution de ce dernier phénomène à l'acidification rhizosphérique est particulièrement importante dans les sols calcaires ou dans des sols où la diffusion du CO₂ se fait mal (Nye, 1986), par contre, dans les sols acides, l'acide carbonique n'est pas dissocié et la contribution de la respiration racinaire à l'acidification de la rhizosphère est alors négligeable.

En résumé, les plantes peuvent modifier la chimie et la biodisponibilité des éléments traces dans le sol, dont le plomb, le Cr(III) et le Cr(VI), en modifiant le pH de la rhizosphère. En effet, le pH est impliqué dans de multiples réactions se déroulant dans le sol, telles que les réactions de dissolution/précipitation ou d'adsorption/désorption, ou encore de complexation. Tous ces mécanismes peuvent donc induire la libération de certains éléments traces initialement immobilisés dans les minéraux, les changements de pH provoquant la dissolution par exemple de carbonates, d'oxydes ou de phosphates (Cecchi, 2008).

En effet, Le pH du sol apparaît comme le facteur le plus important pour le contrôle de l'absorption de métal par la plante (Berrow et Burrige, 1991). Un pH acide tend à augmenter la solubilisation des métaux. Un pH basique tend à précipiter les éléments sous formes hydroxydes chélatées ou adsorbées. Ceci diminue la fraction librement accessible aux racines. Le pH optimal pour la croissance des plantes est situé entre 6 et 6,8 (Chappuis, 1991).

Bien que l'influence des conditions oxydoréductrices du sol semble très importante au regard de la mobilité des éléments métalliques, il n'en demeure pas moins que ce facteur apparaît souvent comme secondaire par rapport au pH. En effet, pour un sol donné le potentiel d'oxydoréduction varie en fonction inverse du pH, il augmente quand le pH diminue (Deneux-Mustin *et al.*, 2003), en conséquence de quoi l'influence des conditions oxydoréductrices apparaît souvent comme secondaire par rapport au pH. De plus, il est relativement difficile d'interpréter les valeurs obtenues. En raison du nombre important des couples redox et de la cinétique des réactions (Lespagnol, 2003), l'influence du potentiel redox est souvent difficile à comprendre.

II-2- Effet du stress par les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur la teneur en plomb et en chrome dans les substrats (sol) de la culture des plantes d'*Atriplex halimus* L.

En effet, les milieux de culture sur les quels poussent les plantes sont des substrats (sol) ayant des quantités croissantes de Pb, Cr(III) et Cr(VI). Les teneurs en métaux lourds dans les différents milieux de culture sont présentées dans le **tableau 27**.

Les teneurs en plomb enregistrées sont variables en fonction des concentrations appliquées. En fait, les teneurs en Pb dans les substrats sont proportionnelles aux concentrations du Pb appliquées, ce qui est logique.

D'après les résultats obtenus. On peut constater que les substrats de la provenance «Kharouba» se caractérisent par des teneurs en plomb qui varient entre 1,868 mg/kg pour les substrats (Témoin) et 4169,272 mg/kg pour le traitement à la concentration 8000 ppm. Pour «Béni Saf» les quantités en Pb varient entre 1,898 mg/kg pour les substrats (Témoin) et 4191,229 mg/kg à 8000 ppm. Quant à la provenance «Sig», les doses retrouvées varient entre 1,875 mg/kg pour les substrats (Témoin) et 3650,002 mg/kg à la concentration 8000 ppm, et enfin, les teneurs en plomb enregistrées dans le substrat de la provenance «Oued'Rhiou» varient entre 1,897 mg/kg pour 1000 ppm et 3922,449 mg/kg à la dose 8000 ppm (**Tableau 27**).

L'étude statistique des résultats obtenus (**Tableau 54, Annexe 26**), révèle que le facteur "Provenance" influe de manière très significative ($P \leq 0,01$) sur la teneur en Pb dans les substrats traités au Pb, et le facteur "Concentration" influe de manière hautement significative sur la quantité de plomb dans les substrats avec ($P = 0$). Quand aux effets d'interaction "Provenance-Concentration" n'ont pas une influence significative sur ce paramètre ($P = 0,146$).

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Provenance" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 55, Annexe 26**) :

Le groupe A représenté par «Béni Saf et Kharouba» avec des teneurs les plus élevées avec respectivement : 1636,251 mg/kg et 1583,014 mg/kg, le second groupe AB représenté par «Oued'Rhiou» avec 1469,925 mg/kg et le dernier groupe B représenté par «Sig» avec des teneurs les plus faibles de 1406,08 mg/kg.

Quatre groupes homogènes sont à relever en fonction des concentrations appliquées (**Tableau 56, Annexe 26**) :

Le groupe A où les teneurs sont maximales à la concentration de 8000 ppm (3983,238 mg/kg), le second groupe B représenté par une concentration de 4000 ppm avec la teneur (1559,52 mg/kg), vient ensuite le 3^{ème} C (1000 ppm) avec 550,629 mg/kg, et enfin un dernier groupe D qui est le témoin (1,884 mg/kg).

Tableau 27. Quantités moyennes de plomb et de chrome (en mg/kg MS) dans les substrats (sol) de la culture des plantes d'*Atriplex halimus* soumises au plomb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Métal extrait	Provenance			
Métal	[] (ppm)		Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	Pb	1,868 ^D ±0,617	1,898 ^D ±0,502	1,875 ^D ±0,473	1,897 ^D ±0,292
		Cr	0,529 ^D ±0,248	0,592 ^D ±0,101	0,524 ^D ±0,281	0,499 ^D ±0,201
Pb	1000	Pb	578,100 ^C ±50,771	588,343 ^C ±73,398	492,984 ^C ±62,316	543,089 ^C ±59,290
	4000		1582,818 ^B ±82,518	1763,534 ^B ±146,382	1479,460 ^B ±88,196	1412,267 ^B ±69,577
	8000		4169,272 ^A ±568,385	4191,229 ^A ±191,687	3650,002 ^A ±460,333	3922,449 ^A ±389,452
Cr(III)	250	Cr	186,569 ^C ±34,022	190,259 ^C ±37,898	179,464 ^C ±17,853	176,568 ^C ±13,847
	500		362,030 ^B ±34,007	290,122 ^B ±44,741	380,688 ^B ±55,857	402,612 ^B ±17,072
	750		488,806 ^A ±33,152	547,746 ^A ±71,987	471,118 ^A ±71,621	501,556 ^A ±46,136
Cr(VI)	50		29,643 ^C ±4,759	35,005 ^C ±5,777	30,539 ^C ±6,184	32,554 ^C ±5,558
	100		60,147 ^B ±7,129	34,291 ^C ±6,017	57,498 ^B ±9,132	61,757 ^B ±11,273
	150		59,131 ^B ±12,728	79,367 ^A ±13,655	81,578 ^A ±16,104	83,588 ^A ±9,395

En ce qui concerne la teneur en chrome dans les différents substrats traités à des concentrations croissantes chlorure de chrome Cr(III) (**Tableau 27**), on peut noter que la provenance «Kharouba» se caractérise par des teneurs en Cr qui varient entre 488,806 mg/kg à la concentration 750 ppm et 0,529 mg/kg dans les substrats témoins. Pour la provenance «Béni Saf» entre 547,746 mg/kg à 750 ppm et 0,592 mg/kg dans les substrats témoins, Quant à la provenance «Sig», les analyses de ce métal lourd montrent des concentrations qui varient entre 471,118 mg/kg à la concentration 750 ppm et 0,524 mg/kg dans les substrats témoins.

Les teneurs les plus élevées en Cr sont enregistrées dans le substrat de la provenance «Oued'Rhiou», se caractérise par des teneurs qui varient entre 501,556 mg/kg à 750 ppm de Cr(III) et 0,08 mg/kg dans les substrats (Témoin).

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 57, Annexe 27**), montrent que le facteur "Provenance" n'influe pas de manière significative (P= 0,676) sur la concentration en Cr dans les substrats traités au Cr(III). Par ailleurs, le facteur "Concentration" influe de manière hautement significative (P= 0).

Quant aux effets d'interaction, un niveau hautement significatif a été enregistré par l'interaction "Provenance-Concentration" (P≤0,001).

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Concentration" fait apparaître quatre groupes homogènes (**Tableau 58, Annexe 27**) :

Un premier groupe A où les teneurs sont maximales de 502,307 mg/kg à 750 ppm, le deuxième groupe B constitué par la concentration 500 ppm avec une teneur moyenne de 358,863 mg/kg, le troisième groupe C par la concentration 250 ppm (183,215 mg/kg), quant au dernier groupe D, représenté par le témoin, avec des teneurs les plus faibles en Cr de 0,536 mg/kg.

Les concentrations en chrome dans les différents substrats traités par le chromate de potassium Cr(VI) sont résumées dans le **tableau 27**.

Les teneurs en chrome enregistrées sont variables en fonction des concentrations appliquées. En fait, les teneurs en Cr dans les substrats sont proportionnelles aux concentrations de Cr(VI) appliquées, ce qui est logique.

Les substrats de la provenance «Kharouba» se caractérisent par des teneurs en Cr qui varient entre 0,529 mg/kg pour le Témoin et 60,147 mg/kg pour le traitement à la concentration 100 ppm. Ceux de «Béni Saf» entre 0,592 mg/kg pour les substrats (Témoin) et 79,367 mg/kg à 150 ppm. Pour la provenance «Sig», les doses retrouvées varient entre 0,524 mg/kg pour les substrats témoins et 81,578 mg/kg à la concentration 150 ppm de Cr(VI).

Les teneurs les plus élevées en Cr sont enregistrées dans le substrat de la provenance «Oued'Rhiou», les quantités en Cr varient entre 0,499 mg/kg pour les substrats témoins et 83,588 mg/kg à 150 ppm de Cr(VI).

L'étude statistique des résultats obtenus (**Tableau 59, Annexe 28**), révèle que le facteur "Provenance" influe de manière significative ($P \leq 0,05$) sur la teneur en Cr dans les substrats traités au Cr(VI), Quand aux effets du facteur "Concentration" et les effets d'interaction "Provenance-Concentration" ont une influence hautement significative sur ce paramètre ($P \leq 0,001$).

Le test de **NEWMAN-KEULS** au seuil de 0,05 (**Tableau 60, Annexe 28**), détermine trois groupes homogènes en fonction du facteur "Provenance":

Le groupe A représenté par «Oued'Rhiou» avec des teneurs les plus élevées que le second groupe AB représenté par «Sig» et le dernier groupe B représenté par «Kharouba et Béni Saf» avec des teneurs en Cr les plus faibles.

Quatre groupes homogènes sont à relever en fonction des concentrations appliquées (**Tableau 61, Annexe 28**) : Le groupe A où les teneurs sont maximales de 75,916 mg/kg à la concentration de 150 ppm, le second groupe B avec une teneur en Cr de 53,423 mg/kg représenté par la concentration (100 ppm), vient ensuite le 3^{ème} C à la concentration (50 ppm) avec la teneur (31,935 mg/kg), et enfin un dernier groupe D qui est le témoin qui représente des valeurs les plus faibles (0,536 mg/kg).

Le **tableau 27** montre les teneurs moyennes des métaux lourds détectés. La distribution des éléments se fait dans l'ordre décroissant, en fonction de l'intensité du métal, suivant:

$$[\text{Pb}] > [\text{Cr(III)}] > [\text{Cr(VI)}]$$

En résumé, Les teneurs en Pb et en Cr enregistrées sont variables en fonction des concentrations appliquées. En fait, les teneurs en ces métaux dans les substrats sont proportionnelles aux concentrations appliquées, ce qui est logique (**Tableau 27**).

En conclusion, nous avons donc un sol contaminé en plomb et en chrome. Dans les échantillons de sol, le chrome est fortement lié au substrat traité par le Cr(III), qui représente un taux de rétention qui varie entre 6,27 et 17,66 % par rapport aux concentrations du métal appliqué dans les substrats. Cependant, les substrats traités aux Cr(VI), le taux de rétention en chrome est très réduit et présente une valeur qui varie entre 1,04% à 3,23 %, le Cr(III) est donc peu mobile que le Cr(VI) dans le sol. Nos résultats sont en accord avec ceux de **Desjardin et al. (2002)**, qui a reporté que chrome trivalent est la forme la plus stable, et que la mobilité du chrome dans les sols dépend du pH et du potentiel d'oxydoréduction qui détermine la spéciation du métal et la capacité d'échange cationique (pour le Cr(III)) ou anionique (pour le Cr(VI)), En effet, le Cr(VI) a une part mobilisable plus importante que le Cr(III). Par conséquent, le Cr(VI) présente un risque immédiat plus grand que le Cr(III) lors d'une libération suite à des modifications des conditions physico-chimiques environnantes, car cette part mobilisable peut alors migrer vers les plantes. Par ailleurs, le plomb, est plus stable que les deux autres formes de chrome, et représente un taux de rétention le plus fort, qui varie entre 49,03 et 35,31 % par rapport aux concentrations du métal appliqué dans les substrats. Il est acquis que les métaux lourds présents dans le sol soient absorbés à des degrés divers suivant la nature et la forme des éléments, la nature du sol et l'espèce cultivée. La racine est le principal organe responsable de l'admission des éléments dans la plante (**Marschner, 1985**).

De nombreuses recherches, dans le domaine de l'écotoxicité des métaux lourds, s'accordent sur le fait que le risque résulte non pas des concentrations totales relevées dans les sols pollués, mais de leur fraction biodisponible (**Scheifler et al., 2003**). Les teneurs en métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) dans les différents substrats sont très variables, il y a des différences considérables des concentrations dans et entre les quatre provenances, traitées différemment.

Ces résultats peuvent être expliqués par les caractérisations physico-chimiques du sol (Voir **Tableau 48, Annexe 23**), qui ont permis de mettre en évidence l'équilibre de la fraction argileuse, sableuse et limoneuse. C'est un sol loam-argileux et pauvre en matière organique qui présente une teneur de 2,59% et une faible capacité d'échange en cations. Ces résultats renforcent les observations réalisées par différentes équipes de chercheurs qui ont démontré, par de nombreux travaux, l'affinité des ETM pour les matières organiques du sol (MOS) (**Morin et al., 1999 ; Lamy, 2002 ; Dumat et**

al., 2006). Cette affinité se traduit par des réactions d'absorption, qui sont contrôlées par des complexes de sphère interne ou externes ou bien par des mécanismes d'échanges ionique (Evans, 1989 ; Kinniburgh *et al.*, 1996). Zimdahl et Hasset (1977) ; Gerritse *et al.* (1982), ont montré également que les concentrations en plomb trouvées dans les sols étaient étroitement corrélées à la teneur en MOS, l'adsorption du plomb augmentant avec la teneur en MO, qui influence la mobilité et la biodisponibilité du plomb (Swaine, 1986). Par ailleurs, le chrome trivalent est quasiment immobile dans la plupart des milieux naturels, spécialement si ceux-ci contiennent de quantités importantes d'argiles. Cependant, dans des milieux oxydants pauvres en matières organiques et où les oxydes de manganèse sont présents en grande quantité, la forme hexavalente du chrome peut-être la plus stable, laquelle est soluble sur une large gamme de pH. Ce sont alors les phénomènes de sorption qui sont prépondérants. La sorption regroupe tous les phénomènes de rétention de soluté à la surface des solides impliquant par exemple des mécanismes d'échanges d'ions, de complexation de surface et de précipitation de surface. Le phénomène de sorption du chrome sans modification de sa valence existe, mais est généralement bien moins important que les phénomènes d'oxydo-réduction (Desjardin *et al.*, 2002).

De plus, les substrats avec des valeurs plus élevées en pH atteignent jusqu'à pH= 6,746, présentent des concentrations élevées en Pb par comparaison avec les moyennes des concentrations en Cr(VI) ou les valeurs du pH sont moins élevées. Ces concentrations basses sont dues au transfert du métal vers les plantes avec des fortes concentrations par rapport au Pb. Les mêmes résultats ont été trouvés par Martinez et Motto (2000), qui ont reporté que, dans différents types de sol, la concentration des métaux dans la phase aqueuse augmentait quand le pH diminuait. En effet, la solubilité d'un élément métallique diminue avec l'élévation du pH des sols (Coic et Coppenet, 1989). Une certaine acidité favorise l'assimilation des oligo-éléments, notamment chrome et plomb (Wolter, 1996). Les risques de mobilité sont plus grands dans les milieux acides, alors que la solubilité diminue avec l'élévation du pH. À pH 5, le plomb semble majoritairement adsorbé aux oxydes et aux matières organiques (Alloway, 1995), et une augmentation du pH a pour effet de rendre le plomb moins biodisponible.

En ce qui concerne, le sol non contaminé présente des teneurs en éléments majeurs Pb et Cu et une faible teneur en Cr (Tableau 48, Annexe 23). Leurs concentrations sont estimées en ppm comme suit: Cu : 1,149, Pb : 3,36. Cela permet de prévoir la présence des oxydes correspondant à ces éléments dans l'échantillon de sol. Les teneurs de ces éléments métalliques (Pb, Cu et Cr) se trouvent dans la gamme des valeurs couramment observées dans les sols non contaminés. La concentration des métaux dans le sol non contaminé, prélevé à partir d'un site agricole situé près d'une activité industrielle (usine BCR), varierait de l'état de traces. Pour le Pb, la teneur détectée est de 3,36 mg/kg,

elle est au-dessus du niveau critique. D'après **Baize (1997)**, la concentration moyenne du Pb dans la croûte terrestre serait de l'ordre de 13 à 16 mg/kg. Quant à, la concentration du Cu dans le sol est de 1,149 ppm, cette valeur est inférieure des teneurs moyennes en Cu d'un sol non contaminé, qui sont comprises entre 13 et 24 ppm (**Coullery, 1997**). Le cuivre est un métal largement répandu dans la nature sa concentration moyenne dans la croûte terrestre serait comprise entre 45 et 70 mg/kg (**Baize, 1997**) ; elle est de l'ordre de 50 ppm selon l'auteur **Sittig (1975)**. Ainsi, la concentration du Cr détectée est dans les normes et au-dessus du niveau critique dans le sol avec une teneur de 1,09 ppm. D'après **Rousseaux (1988)**, le maximum "normal" dans les sols est de 150 ppm ; la moyenne est de 100 ppm. D'après **Tremel-Schaub et Felix (2005)**, la phytodisponibilité du chrome est faible comparée aux autres éléments. Sous une forme adsorbée sur des hydroxydes métalliques, le chrome est peu disponible pour les végétaux. En conclusion, nous vérifions ainsi que, conformément aux raisons du choix du site de prélèvement, cet échantillon de sol n'a pas été contaminé par des apports anthropiques de l'usine BCR.

III- Effet du stress par les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur l'accumulation du plomb et du chrome par les plantes d'*Atriplex halimus* L.

Après quatre semaines de culture des plantes d'*Atriplex halimus*, des quatre provenances, sur les différentes concentrations du Pb (1000, 4000 et 8000 ppm), du Cr(III) (250, 500 et 750 ppm) et du Cr(VI) (50, 100 et 150 ppm). Les concentrations en plomb et en chrome ont été déterminées dans les racines et les parties aériennes de ces plantes, en fonction des différentes situations expérimentales.

III-1- Effet du stress par le Pb sur l'accumulation du Pb par les plantes d'*Atriplex halimus* L.

Les résultats de l'analyse de variance montrent que les facteurs "Provenance" et "Concentration" présentent un effet hautement significatif ($P=0$) sur les quantités du plomb dans les racines d'*Atriplex halimus* (**Tableau 62, Annexe 29**).

La corrélation de ces facteurs montre à son tour des effets hautement significatifs pour l'interaction "Provenance-Concentration" ($P \leq 0,001$).

Les teneurs enregistrées sont variables en fonction des concentrations appliquées. En fait, les teneurs en Pb dans les racines sont proportionnelles avec leurs concentrations appliquées. Selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 63, Annexe 29)**, quatre groupes homogènes apparaissent : Le groupe A représenté par la concentration 8000 ppm avec des teneurs maximales en Pb, dosées dans les racines d'*Atriplex halimus*, de 245,825 mg/kg, le second groupe B avec des teneurs intermédiaires de 160,659 mg/kg à 4000 ppm, un autre groupe C avec des doses inférieures

(39,623mg/kg) à la concentration 1000 ppm, et enfin le dernier groupe D représenté par le témoin, avec une teneur moyenne de 0,134 mg/kg.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", fait ressortir quatre groupes homogènes (**Tableau 64, Annexe 29**): Le groupe A représenté par «Sig» avec une teneur en Pb de 127,859 mg/kg, le second groupe AB par «Oued'Rhiou» avec une teneur de 118,222 mg/kg de Pb, le troisième groupe B représenté par la provenance «Kharouba» (110,55 mg/kg) et enfin le 4^{ème} groupe C par «Béni Saf», ou leurs teneurs en plomb sont les plus faibles de 89,61 mg/kg.

D'après les résultats obtenus dans le **tableau 28**, on peut constater que les teneurs les plus élevées en Pb sont enregistrées dans les racines de la provenance «Sig», dont les teneurs varient entre 279,426 mg/kg à 8000 ppm et 0,126 mg/kg chez les plantes témoins. À l'inverse des autres provenances, la provenance «Béni Saf», se caractérise par des faibles teneurs en Pb qui varient entre 195,625 mg/kg à 8000 ppm et 0,122 mg/kg chez les plantes témoins.

Quant aux résultats de l'analyse de variance (**Tableau 65, Annexe 30**), montrent que le facteur "Provenance" et "Concentration" ainsi que l'interaction "Provenance-Concentration" présentent un effet hautement significatif ($P= 0$) sur le paramètre de concentration en Pb dans les tiges d'*Atriplex halimus*.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 66, Annexe 30)**, indique que le facteur "Provenance" agit sur l'expression de la teneur en Pb dans les tiges d'*Atriplex halimus*, selon deux modalités et constitue deux groupes homogènes :

Un premier groupe A représenté par les provenances «Kharouba, Sig et Oued'Rhiou» avec une teneur en Pb respectivement : 1,419 mg/kg, 1,373 mg/kg et 1,263 mg/kg. Pour le second groupe B qui est constitué par la provenance «Béni Saf» représente une teneur moyenne de 0,755 mg/kg.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 67, Annexe 30**), fait ressortir trois groupes homogènes : Le premier groupe A constitué par les concentrations (8000 et 4000 ppm) avec une teneur en Pb, dans les tiges d'*Atriplex halimus*, respectivement : 1,975 mg/kg et 1,957 mg/kg, le second groupe B par la concentration 1000 ppm avec 0,875 mg/kg de Pb et enfin un dernier groupe C qui est le témoin avec des teneurs les plus faibles en Pb (0,003 mg/kg).

Les teneurs enregistrées sont variables en fonction des concentrations appliquées du plomb dans les différents substrats. La provenance «Kharouba» se caractérise par des teneurs qui varient entre 2,979 mg/kg à la concentration 8000 ppm et 0,004 mg/kg de Pb dans les tiges des plantes «Témoins», et entre 2,816 mg/kg de Pb à la concentration 4000 ppm et 0,003 mg/kg chez les plantes «Témoin» pour «Oued'Rhiou» (**Tableau 28**).

Quant à la provenance «Sig», les analyses de Pb montrent des concentrations qui varient entre 2,621 mg/kg à 8000 ppm et 0,004 mg/kg chez les témoins.

A l'inverse des autres provenances, la provenance de «Sig», se caractérise par des faibles teneurs en Pb, dans les tiges d'*Atriplex halimus*, qui varient entre 1,393 mg/kg à 4000 ppm et 0,002 mg/kg chez les témoins (**Tableau 28**). Bien que semblant excessives, des valeurs de cet ordre sont fréquemment reportées.

Par ailleurs, les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 68, Annexe 31**), montrent que le facteur "Concentration" et l'interaction "Provenance-Concentration" influent de manière hautement significative ($P=0$) sur les quantités en plomb dans les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Pb. Quand à l'effet du facteur "Provenance" présente un effet très significatif sur ce paramètre ($P\leq 0,01$).

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance" (**Tableau 69, Annexe 31**), fait ressortir deux groupes homogènes : Le premier groupe A constitué par les provenances «Sig, Kharouba et Oued'Rhiou» qui représentent des teneurs en Pb, dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, plus élevées que celles du second groupe B, constitué par «Béni Saf».

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 70, Annexe 31)**, indique que le facteur "Concentration" agit sur l'expression de la teneur en Pb dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, selon trois modalités et constitue trois groupes homogènes.

Le premier groupe A constitué par la concentration 8000 ppm qui représente des teneurs en Pb, dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, plus élevées que celles du second groupe B, qui est constitué par la concentration 4000 ppm, ensuite le troisième groupe C par la concentration 1000 ppm et le groupe homogène D représenté par le témoin avec des faibles teneurs en Pb dans les feuilles, pour cette espèce.

Les résultats moyens dégagés dans le **tableau 28**, montrent que la provenance «Oued'Rhiou» se caractérise par des teneurs qui varient entre 47,58 mg/kg à la concentration 8000 ppm et 0,023 mg/kg chez les témoins.

Quant à la provenance «Kharouba», les analyses de plomb dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, montrent des concentrations qui varient entre 50,288 mg/kg à 8000 ppm et 0,025 mg/kg chez les témoins.

Les teneurs les plus élevées en Pb sont enregistrées dans les feuilles des plantes de la provenance «Sig», et se caractérise par des teneurs qui varient entre 52,708 mg/kg à la dose 8000 ppm et 0,033 mg/kg chez les témoins.

A l'inverse des autres provenances, la provenance «Béni Saf», se caractérise par des faibles teneurs en plomb qui varient entre 41,581 mg/kg à 8000 ppm et 0,015 mg/kg chez les plantes «Témoins» (**Tableau 28**).

Après quatre semaines de culture des plantes d'*Atriplex halimus* sur les différentes concentrations du Pb, les résultats obtenus montrent une capacité d'accumulation élevée chez cette espèce. Donc l'accumulation du plomb est un caractère constitutif chez l'*Atriplex halimus*.

Tableau 28. Valeurs moyennes des teneurs en plomb (en mg/kg MS) dans les feuilles (F), tiges (T) et racines (R) d'*Atriplex halimus* L. traitées au plomb \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Organe	Provenance			
Métal	[] (ppm)		Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	R	0,139 ^F \pm 0,057	0,122 ^F \pm 0,041	0,126 ^F \pm 0,025	0,149 ^F \pm 0,055
		T	0,004 ^C \pm 0,002	0,002 ^C \pm 0,001	0,004 ^C \pm 0,002	0,003 ^C \pm 0,002
		F	0,025 ^D \pm 0,013	0,015 ^D \pm 0,013	0,033 ^D \pm 0,011	0,023 ^D \pm 0,017
Pb	1000	R	39,951 ^F \pm 4,992	37,753 ^F \pm 5,141	42,116 ^F \pm 8,423	38,671 ^F \pm 7,562
		T	0,929 ^B \pm 0,237	0,672 ^B \pm 0,216	1,015 ^B \pm 0,198	0,885 ^B \pm 0,115
		F	6,534 ^D \pm 1,125	16,987 ^C \pm 3,401	7,129 ^D \pm 1,558	6,402 ^D \pm 1,101
	4000	R	157,961 ^D \pm 23,204	124,939 ^E \pm 21,875	189,769 ^{CD} \pm 36,244	169,966 ^{CD} \pm 34,543
		T	1,765 ^A \pm 0,354	1,393 ^A \pm 0,213	1,854 ^A \pm 0,387	2,816 ^A \pm 0,443
		F	21,956 ^C \pm 5,326	4,613 ^D \pm 0,955	23,184 ^C \pm 1,573	22,091 ^C \pm 6,139
	8000	R	244,149 ^B \pm 26,777	195,625 ^C \pm 37,249	279,426 ^A \pm 34,838	264,100 ^{AB} \pm 17,270
		T	2,979 ^A \pm 0,259	0,952 ^A \pm 0,218	2,621 ^A \pm 0,250	1,350 ^A \pm 0,277
		F	50,288 ^A \pm 6,626	41,581 ^B \pm 7,199	52,708 ^A \pm 5,840	47,587 ^A \pm 7,560

Tout d'abord, *Atriplex halimus* accumule le plomb dans ses racines puis celui-ci est transféré vers les parties aériennes où il est également accumulé en grande quantité dans les feuilles. Pour les trois concentrations de plomb chez les quatre provenances testées, l'accumulation du Pb dans la partie racinaire des plantes est nettement importante comparativement à celle de la partie aérienne et atteint une valeur moyenne de 279,426 mg/kg dans les racines de la provenance «Sig». Quand aux parties aériennes des plantes, traitées par le plomb, une évolution comparable est observée, mais leurs teneurs en Pb restent beaucoup plus faibles : une teneur maximale de 52,708 mg/kg est mesurée dans les échantillons de la provenance «Sig» à la concentration 8000 ppm (**Tableau 28**).

D'une façon générale, les teneurs en plomb obtenues dans les biomasses sèches des organes sont supérieures aux valeurs obtenues avec les concentrations critiques au-dessus desquelles les effets de toxicité sont possibles (30-300 mg/kg pour le Pb) (**Kabata-Pendias, 1992 ; Benton, 1998 ; Larcher, 2003**). Des résultats similaires ont été observés avec **Adhikari et al. (2010)**. En effet, ces travaux ont montré que *Typha augustifolia* L. (*Typhaceae*) est capable d'accumuler les fortes concentrations de Pb dans les racines (1200 mg/kg) et dans les feuilles (275 mg/kg) tandis que *Ipomoea carnea* L. (*Convolvulaceae*) pouvait également accumuler 1500 et 475 mg/kg respectivement dans les racines et dans les feuilles. **Deng et al. (2004)**, ont également observé que le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium accumulés par *Juncus effusus* étaient essentiellement répartis au niveau des parties racinaires comparé aux parties aériennes. Ces résultats sont confirmés par les travaux de **Seregin et al. (2004) ; Sharma et Dubey (2005)**, indiquant que chez la plupart des espèces, la majorité du plomb absorbé par les plantes réside dans les racines, et seulement une faible proportion est transloquée vers les parties aériennes de la plante. Il a été démontré aussi par **Kumar et al. (1995) ; Huang et Cunningham (1997)**, que le plomb est rapidement accumulé dans les racines s'il est biodisponible dans le milieu de croissance de la plante, cependant, seulement une petite portion du plomb est transférée vers les pousses. Les dosages réalisés ont montré que le plomb était majoritairement accumulé dans les racines. Il existe donc probablement, comme chez beaucoup d'autres espèces, un mécanisme permettant de limiter la translocation du plomb du système racinaire vers le système foliaire (**Baker, 1981**), soulignant une faible mobilité du plomb des racines vers les parties aériennes et donc une immobilisation dans les racines (**Yoon et al., 2006**). Ce transport limité des racines vers les feuilles peut être expliqué par la barrière formée par l'endoderme des racines. Les bandes de Caspary peuvent en effet être un facteur majeur limitant le franchissement de l'endoderme jusqu'au cylindre central (**Sharma et Dubey, 2005**).

L'accumulation de métal dans les racines est considérée comme l'un des premiers moyens pour la plante de gérer un stress métallique (**Das et al., 1998**), tandis que la translocation vers la tige est un facteur décisif de l'hyperaccumulation (**Xing et al., 2008**). Le cas d'*Atriplex halimus* semble frontalier ; il présente une forte translocation du plomb, mais aussi une importante accumulation dans les racines lorsque la dose est toxique. La sensibilité de cette espèce au stress métallique semble être déterminée en bonne partie au niveau racinaire. Ces résultats démontrent clairement que l'*Atriplex halimus* a un potentiel considérable pour la décontamination de sols pollués au plomb.

Bert et al. (2000) et Macnair (2003), ont montré que, lorsque les plantes issues des sites métallifères et non métallifères sont cultivées dans des conditions standard sous serre ou en solution, la capacité physiologique à hyperaccumuler les métaux lourds est une propriété constitutive de l'espèce. En conclusion, l'*Atriplex halimus* a prouvé sa capacité à se développer dans des sols contaminés avec une forte concentration de plomb. Pour une phytoextraction efficace, il faut des plantes hyper-extractrices pour éliminer les métaux lourds de sols pollués, mais aussi un haut rapport de transfert des racines vers les parties aériennes afin d'accumuler un maximum de métal dans les parties exploitables (**Salt et al., 1998**). L'efficacité de la dépollution dépend aussi de la quantité de biomasse aérienne et de la biodisponibilité des métaux (**Khan et al., 2000**). Cette étude montre que les plantes d'*Atriplex halimus* ont parfaitement survécu dans des sols pollués au plomb et que son activité métabolique a amélioré sa croissance et la phytoextraction du plomb. Ils ont également eu un effet positif sur la biomasse des racines.

III-2- Effet du stress par le Cr(III) sur l'accumulation du Cr par les plantes d'*Atriplex halimus* L.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 71, Annexe 32**), montrent que le facteur "Provenance" et l'interaction "Provenance-Concentration" n'influent pas de manière significative sur la teneur en chrome, dans les racines d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(III), avec une probabilité respectivement : $P= 0,330$ et $P= 0,965$. Par contre, le facteur concentration du métal a un effet hautement significatif ($P= 0$) sur ce paramètre.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** confirme l'effet "Concentration" (**Tableau 72, Annexe 32**), et donne lieu à quatre groupes homogènes :

Le groupe A représenté par la concentration 750 ppm avec une teneur moyenne de 1,787 mg/kg, le second groupe B par (500 ppm) avec une teneur égale à 1,192 mg/kg, vient ensuite un le groupe C représenté par (250 ppm) de Cr(III) avec la teneur en Cr de (0,608 mg/kg), et enfin un dernier groupe D qui est le témoin avec des faibles teneurs en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus* (0,003 mg/kg).

Les teneurs enregistrées sont variables en fonction des concentrations de Cr(III) appliquées dans les différents substrats. La provenance «Sig» se caractérise par des teneurs qui varient entre 1,864 mg/kg à la concentration 750 ppm et 0,004 mg/kg dans les racines des plantes témoins, et pour Oued'Rhiou entre 1,759 mg/kg à 750 ppm et 0,003 mg/kg chez les témoins.

Quant à la provenance «Kharouba», les analyses de Cr, montrent des concentrations qui varient entre 1,797 mg/kg à 750 ppm et 0,003 mg/kg dans les racines des plantes témoins.

Les teneurs les plus élevées en chrome sont enregistrées dans les racines des plantes de la provenance «Béni Saf», dont les teneurs varient entre 1,727 mg/kg à la concentration 750 ppm et 0,002 mg/kg chez les plantes témoins.

Dans les racines des plantes, traitées par le Cr(III) (**Tableau 29**), la teneur en Cr augmente rapidement et atteint des valeurs d'autant plus élevées que la concentration en Cr(III) dans le milieu de culture est importante. C'est ainsi à une forte concentration (750 ppm), la teneur en ce métal atteint plus de 1,864 mg/kg.

En ce qui concerne le dosage de chrome dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées à des concentrations croissantes en Cr(III), les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 73, Annexe 33**), montrent que le facteur "Provenance" influe faiblement ($P \leq 0,05$) sur le paramètre de concentration en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, et le facteur "Concentration" influe de manière hautement significative ($P = 0$). Quand à l'effet d'interaction bifactorielle "Provenance-Concentration" a un effet très significatif sur ce paramètre ($P \leq 0,01$).

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 74, Annexe 33)**, indique que le facteur "Provenance" agit sur l'expression de la teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, selon trois modalités et constitue trois groupes homogènes :

Un premier groupe A représenté par la provenance «Sig», le 2^{ème} groupe AB constitué par les provenances «Kharouba et Oued'Rhiou» et le 3^{ème} groupe B représenté par la provenance «Béni Saf» qui représente des faibles teneurs en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(III).

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 75, Annexe 33**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Le premier groupe A constitué par la concentration 750 ppm avec une teneur moyennes de 0,116 mg/kg, le second groupe B par la concentration 500 ppm avec 0,096 mg/kg de Cr, le troisième groupe C par la concentration 250 ppm avec une teneur de 0,063 mg/kg, et enfin le groupe homogène D qui représente le témoin, aucune trace de Cr n'est détectée.

La provenance «Kharouba» se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,136 mg/kg dans les tiges traitées au Cr(III) à la concentration 750 ppm et 0,051 mg/kg à la concentration 250 ppm, et entre 0,098 mg/kg à 250 ppm et 0,087 mg/kg dans les tiges des plantes traitées à 750 ppm de Cr(III) de la provenance «Oued'Rhiou» (**Tableau 29**).

Les teneurs les plus élevées en Cr sont enregistrées dans les tiges des plantes appartenant à «Sig», qui se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,149 mg/kg à 750 ppm et 0,069 mg/kg à 250 ppm.

A l'inverse des autres provenances, la provenance «Béni Saf», se caractérise par des faibles teneurs en Cr qui varient entre 0,092 mg/kg à 750 ppm et 0,035 mg/kg à 250 ppm (**Tableau 29**).

Dans les tiges des plantes, traitées par le Cr(III), la teneur en Cr augmente rapidement et atteint des valeurs d'autant plus élevées que la concentration en Cr(III) dans le substrat est importante. C'est ainsi à une forte concentration (750 ppm), la teneur en métal atteint plus de 0,149 mg/kg.

Par ailleurs, Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 76, Annexe 34**), montrent que les facteurs "Provenance", "Concentration" et l'interaction bifactorielle "Provenance-Concentration" influent de manière hautement significative avec une probabilité ($P= 0$) sur le paramètre de la teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(III).

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance" selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 77, Annexe 34)**, fait ressortir deux groupes homogènes :

Le groupe A représenté par «Kharouba, Oued'Rhiou et Sig» et le second groupe B par «Béni Saf» ou leur teneurs en chrome sont les plus faibles dans les feuilles d'*Atriplex halimus*.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 78, Annexe 34**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Le premier groupe A constitué par la concentration 750 ppm, ou nous avons enregistré une teneur moyenne de 0,486 mg/kg, le second groupe B par la concentration 500 ppm, avec une teneur en Cr dans les feuilles de 0,413 mg/kg, et ensuite un 3^{ème} groupe C représenté par la concentration 250 ppm avec 0,198 mg/kg de Cr, et enfin un dernier groupe D, qui est le témoin avec des teneurs plus faibles en Cr (0,001 mg/kg).

Les teneurs en Cr enregistrées dans les feuilles sont variables en fonction des concentrations de Cr(III) appliquées dans les différents substrats.

La provenance «Sig» se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,449 mg/kg à la concentration 500 ppm et 0,221 mg/kg dans les feuilles des plantes traitées à la concentration 250 ppm de Cr(III). Quant à la provenance «Oued'Rhiou», les analyses de chrome montrent des quantités en Cr qui varient entre 0,617 mg/kg à 750 ppm et 0,192 mg/kg à la concentration 500 ppm.

Les teneurs les plus élevées en chrome sont enregistrées dans les feuilles des plantes appartenant à la provenance «Kharouba», qui se caractérisent par des teneurs qui varient entre 0,633 mg/kg à 750 ppm et 0,192 mg/kg à la dose 250 ppm.

A l'inverse des autres provenances, la provenance «Béni Saf», se caractérise par des faibles teneurs en chrome qui varient entre 0,289 mg/kg à 500 ppm de Cr(III) et 0,181 mg/kg dans les feuilles traitées à la concentration 250 ppm (**Tableau 29**).

Tableau 29. Valeurs moyennes des teneurs en chrome (en mg/kg MS) dans les feuilles (F), tiges (T) et racines (R) d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Organe	Provenance			
Métal	[] (ppm)		Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	R	0,003 ^D ±0,002	0,002 ^D ±0,001	0,004 ^D ±0,001	0,003 ^D ±0,002
		T	0,001 ^F ±0,000	0,000 ^F ±0,000	0,000 ^F ±0,000	0,001 ^F ±0,000
		F	0,001 ^D ±0,001	0,001 ^D ±0,001	0,001 ^D ±0,001	0,001 ^D ±0,000
Cr(III)	250	R	0,665 ^C ±0,114	0,437 ^C ±0,066	0,727 ^C ±0,133	0,603 ^C ±0,158
		T	0,051 ^{DE} ±0,019	0,035 ^{EF} ±0,013	0,069 ^{CDE} ±0,035	0,098 ^{BCD} ±0,022
		F	0,199 ^C ±0,048	0,181 ^C ±0,037	0,221 ^C ±0,026	0,192 ^C ±0,043
	500	R	1,234 ^B ±0,173	1,152 ^B ±0,116	1,209 ^B ±0,239	1,174 ^B ±0,296
		T	0,103 ^{BC} ±0,025	0,090 ^{BCD} ±0,019	0,098 ^{BCD} ±0,028	0,091 ^{BCD} ±0,029
		F	0,455 ^B ±0,042	0,289 ^C ±0,105	0,449 ^B ±0,035	0,460 ^B ±0,028
	750	R	1,797 ^A ±0,407	1,727 ^A ±0,417	1,864 ^A ±0,268	1,759 ^A ±0,329
		T	0,136 ^{AB} ±0,042	0,092 ^{BCD} ±0,021	0,149 ^A ±0,036	0,087 ^{CD} ±0,038
		F	0,633 ^A ±0,072	0,271 ^C ±0,055	0,421 ^B ±0,212	0,617 ^A ±0,054

Nos résultats montrent que l'*Atriplex halimus* accumule le chrome dans ses racines puis celui-ci est transféré vers les parties aériennes où il est également accumulé en grande quantité dans les feuilles. Pour les trois concentrations de chrome chez les quatre provenances testées, l'accumulation du Cr dans la partie racinaire des plantes est nettement importante comparativement à celle de la partie aérienne et atteint une valeur moyenne de 1,864 mg/kg dans les racines de la provenance «Sig». Quand aux parties aériennes des plantes, traitées par le Cr(III), une évolution comparable est observée, mais leurs teneurs en Cr restent beaucoup plus faibles : une teneur maximale de 0,633 mg/kg est mesurée dans les échantillons de la provenance «Kharouba» à la concentration 750 ppm (Tableau 29).

En effet, les teneurs métalliques des racines sont supérieures aux teneurs métalliques des parties aériennes. Ce résultat met en lumière une mobilité limitée de ces polluants une fois à l'intérieur du tissu végétal puisqu'ils semblent se concentrer principalement au niveau des racines. Ce résultat est en accord avec de nombreuses observations déjà rapportées (Mays et Edwards, 2001 ; Deng et al., 2004 ; Almeida et al., 2006 ; Chandra et al., 2008 ; Sasmaz et al., 2008 ; Almeida et al., 2011). Par exemple, les résultats de Sasmaz et al. (2008), montrent que les parties racinaires de *Typha latifolia* collecté à proximité d'un cours d'eau sujet à une pollution métallique contenaient plus

de métaux dans les racines que les parties aériennes. Des résultats similaires ont été observés avec l'Épine de Jérusalem (*Parkinsonia aculeata*) (Yong Zhao *et al.*, 2008), le mesquite (*Prosopis sp.*), le Liseron des champs (*Convolvulus arvensis*), le pois (*Pisum sativum*), et Le Trèfle blanc (*Trifolium repens*) (Lytle *et al.*, 1998 ; Howe *et al.*, 2003 ; Hiram *et al.*, 2006).

La quantité en chrome varie dans les différents organes de la plante. Ainsi, les feuilles accumulent plus d'éléments que les tiges, et les racines plus que les parties aériennes (Howell et Gawthorne, 1987). Le chrome est présent principalement dans les racines. Il peut être retenu au niveau des sites d'échanges cationique des cellules du xylème ou être séquestré dans des vacuoles au niveau des racines, d'où les fortes teneurs observées dans les racines. Cela peut être un mécanisme naturel permettant aux plantes de tolérer de fortes concentrations en métal, en le rendant moins toxique (Shanker *et al.*, 2005 ; Mangabeira *et al.*, 2006). Cependant, il peut passer dans la circulation du xylème et être transporté vers les parties aériennes.

L'accumulation de chrome dans les parties aériennes et racinaires augmente de façon linéaire avec la concentration du Cr(III) dans le milieu de culture. Cette accumulation est d'autant plus importante que la concentration en Cr(III) augmente. D'après Tremel-Schaub et Felix (2005), la concentration en chrome des végétaux est principalement contrôlée par la concentration en solution dans le sol. Or, une solution de Cr(III) ajoutée au sol est rapidement immobilisée.

L'application des trois différentes concentrations du Cr(III) entraîne une augmentation des teneurs en Cr dans les racines, tiges et feuilles d'*Atriplex halimus*.

Cependant, l'addition de Cr(III) au sol influence la teneur en chrome dans les plantes. Habituellement, une quantité plus importante en chrome est observée dans les racines, plutôt que dans les feuilles, tandis que la concentration la plus faible se trouve dans les graines (Kabata-Pendias *et al.*, 1992).

III-3- Effet du stress par le Cr(VI) sur l'accumulation du Cr par les plantes d'*Atriplex halimus* L.

Les résultats de l'analyse de variance (Tableau 79, Annexe 35), montrent que le facteur "Provenance" influe de manière très significative ($P \leq 0,01$), sur la teneur en Cr dans les racines des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées à différentes concentrations de Cr(VI), quant aux facteurs concentration du métal et la combinaison des deux facteurs "Provenance-Concentration", influent de manière hautement significative ($P = 0$) sur ce paramètre.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance" selon le test de NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 80, Annexe 35), fait ressortir trois groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Oued'Rhiou et Sig», le second groupe par «Kharouba», et enfin le 3^{ème} groupe C par «Béni Saf», où leurs teneurs en chrome sont les plus faibles.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 81, Annexe 35**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Le premier groupe A constitué par la concentration 150 ppm avec une teneur moyenne en Cr, dans les racines d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI), de 0,581 mg/kg, le second groupe B par la concentration 100 ppm avec une moyenne de 0,393 mg/kg, ensuite un 3^{ème} groupe C représenté par la concentration 50 ppm avec une teneur en Cr de 0,248 mg/kg, et enfin un dernier groupe D qui est le témoin avec des teneurs les plus faibles en Cr (0,003 mg/kg).

Les teneurs enregistrées sont variables en fonction des concentrations appliquées. La provenance «Sig» se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,437 mg/kg à la concentration 150 ppm et 0,004 mg/kg dans les racines des plantes témoins, et pour «Oued'Rhiou» entre 0,704 mg/kg à 750 ppm et 0,003 mg/kg chez les témoins.

Quant à la provenance «Kharouba», les analyses de Cr, montrent des concentrations qui varient entre 0,618 mg/kg à 150 ppm et 0,003 mg/kg dans les racines des plantes témoins.

Les teneurs les plus élevées en chrome sont enregistrées dans les racines des plantes de la provenance «Béni Saf», dont les teneurs varient entre 0,566 mg/kg à la concentration 150 ppm de Cr(VI) et 0,002 mg/kg chez les plantes témoins.

Dans les racines des plantes, traitées par le Cr(VI) (**Tableau 30**), la teneur en Cr augmente rapidement et atteint des valeurs d'autant plus élevées que la concentration du Cr(VI) dans le milieu de culture est importante. C'est ainsi à des fortes concentrations 150 ppm, la teneur en métal atteint plus de 0,704 mg/kg dans les racines d'*Atriplex halimus* traitées par le Cr(VI).

Cependant, les résultats de l'analyse de variance de la teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI) (**Tableau 82, Annexe 36**), montrent que le facteur "Provenance" et l'interaction bifactorielle "Provenance-Concentration" n'influent pas de manière significative, avec une probabilité respectivement ($P= 0,305$ et $P= 0,120$), sur le paramètre de concentration en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI), et le facteur "Concentration" influe de manière hautement significative sur ce paramètre ($P= 0$).

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** (**Tableau 83, Annexe 36**), indique que le facteur "Concentration" agit sur l'expression de la teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus* selon quatre modalités et constitue quatre groupes homogènes : Le premier groupe A constitué par la concentration 150 ppm avec une teneur moyenne de 0,02 mg/kg, le second groupe B par la concentration 100 ppm (0,015 mg/kg), le troisième groupe C par la concentration 50 ppm avec une teneur en Cr de 0,007 mg/kg, et enfin, le groupe homogène D qui représente le témoin, aucune trace de Cr n'est détectée.

La provenance «Oued'Rhiou» se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,022 mg/kg dans les tiges traitées au Cr(VI) à la concentration 150 ppm et 0,005 mg/kg à la concentration 50 ppm, et entre 0,023 mg/kg à 150 ppm et 0,007 mg/kg dans les tiges des plantes traitées à 50 ppm de Cr(VI) de la provenance «Sig».

Les teneurs les plus élevées en Cr sont enregistrées dans les tiges des plantes appartenant à «Béni Saf», qui se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,024 mg/kg à 100 ppm et 0,010 mg/kg à 50 ppm.

A l'inverse des autres provenances, la provenance «Kharouba», se caractérise par des faibles teneurs en Cr qui varient entre 0,020 mg/kg à 150 ppm et 0,006 mg/kg à 50 ppm (**Tableau 30**).

Dans les tiges des plantes, traitées par le Cr(VI), la teneur en Cr augmente rapidement et atteint des valeurs d'autant plus élevées que la concentration en Cr(VI) dans le substrat est importante. C'est ainsi à des fortes concentrations (100 et 150 ppm), la teneur en ce métal atteint plus de 0,024 mg/kg MS.

En ce qui concerne les résultats de l'analyse de variance de la teneur en chrome dans les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI) (**Tableau 84, Annexe 37**), montrent que le facteur "Concentration" et l'interaction bifactorielle "Provenance-Concentration" influent de manière hautement significative, avec une probabilité respectivement ($P=0$ et $P\leq 0,001$), sur le paramètre de concentration en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI). Cependant, le facteur "Provenance" influe de manière très significative ($P\leq 0,01$) sur ce paramètre.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance" selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 85, Annexe 37)**, fait ressortir trois groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Oued'Rhiou», le second groupe AB par «Sig», et enfin le dernier groupe B par «Kharouba et Béni Saf», ou leur teneurs en chrome sont les plus faibles.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 86, Annexe 37)**, indique que le facteur "Concentration" agit sur l'expression de la teneur en Cr, dans les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI), selon quatre modalités et constitue quatre groupes homogènes : Le premier groupe A constitué par la concentration 150 ppm avec une teneur moyenne en Cr de 0,173 mg/kg. Le second groupe B par la concentration 100 ppm, ou la teneur en Cr est de 0,141 mg/kg, et ensuite le troisième groupe C par la concentration 50 ppm avec une moyenne de 0,071 mg/kg et enfin, le groupe homogène D qui représente le témoin avec une faible teneur en Cr (0,001 mg/kg).

La provenance «Béni Saf» se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,175 mg/kg dans les feuilles traitées au Cr(VI) à la concentration 150 ppm et 0,064 mg/kg à la concentration 50 ppm, et entre 0,177 mg/kg à 100 ppm et 0,084 mg/kg dans les feuilles des plantes traitées à 50 ppm de Cr(VI) de la provenance «Sig».

Les teneurs les plus élevées en Cr sont enregistrées dans les feuilles des plantes appartenant à «Oued'Rhiou», qui se caractérise par des teneurs qui varient entre 0,253 mg/kg à 150 ppm et 0,053 mg/kg à 50 ppm. A l'inverse des autres provenances, la provenance «Kharouba», se caractérise par des faibles teneurs en Cr qui varient entre 0,132 mg/kg à 100 ppm et 0,083 mg/kg à la concentration 50 ppm de Cr(VI) (**Tableau 30**).

Dans les feuilles des plantes traitées par le Cr(VI), la teneur en Cr augmente rapidement et atteint des valeurs d'autant plus élevées que la concentration en Cr(VI) dans le milieu de culture est importante. C'est ainsi à une forte concentration (150 ppm), la teneur en métal atteint plus de 0,253 mg/kg dans les feuilles d'*Atriplex halimus*.

Tableau 30. Valeurs moyennes des teneurs en chrome (en mg/kg MS) dans les feuilles (F), tiges (T) et racines (R) d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Organe	Provenance			
Métal	[] (ppm)		Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	R	0,003 ^D ±0,002	0,002 ^D ±0,001	0,004 ^D ±0,001	0,003 ^D ±0,002
		T	0,001 ^D ±0,000	0,000 ^D ±0,000	0,000 ^D ±0,000	0,001 ^D ±0,000
		F	0,001 ^F ±0,001	0,001 ^F ±0,001	0,001 ^F ±0,001	0,001 ^F ±0,000
Cr(VI)	50	R	0,350 ^C ±0,038	0,205 ^C ±0,048	0,213 ^C ±0,047	0,227 ^C ±0,025
		T	0,006 ^C ±0,003	0,010 ^C ±0,004	0,007 ^C ±0,005	0,005 ^C ±0,005
		F	0,083 ^{CDE} ±0,031	0,064 ^{DEF} ±0,020	0,084 ^{CDE} ±0,024	0,053 ^{EF} ±0,021
	100	R	0,225 ^B ±0,022	0,302 ^B ±0,085	0,627 ^B ±0,061	0,419 ^B ±0,088
		T	0,012 ^B ±0,006	0,024 ^B ±0,013	0,015 ^B ±0,008	0,011 ^B ±0,003
		F	0,132 ^{BC} ±0,040	0,094 ^{CDE} ±0,017	0,177 ^B ±0,026	0,160 ^B ±0,037
	150	R	0,618 ^A ±0,141	0,566 ^A ±0,064	0,437 ^A ±0,080	0,704 ^A ±0,073
		T	0,020 ^A ±0,007	0,017 ^A ±0,009	0,023 ^A ±0,008	0,022 ^A ±0,008
		F	0,122 ^{BCD} ±0,029	0,175 ^B ±0,046	0,142 ^{BC} ±0,079	0,253 ^A ±0,056

Le Cr et plus particulièrement le Cr(VI) est un élément très toxique aussi bien pour la faune que pour la flore. Cette toxicité a notamment été démontrée à différents degrés et étapes du stade de croissance et développement des plantes (**Shanker et al., 2005**). Il engendre une diminution de croissance et de développement des végétaux et modifie la capacité de germination des graines (**Srivastava et al., 1994 ; Peralta et al., 2001**). Le Cr est toxique pour la majorité des plantes supérieures à partir de 30 mg par kg de masse sèche (**Davies et al., 2002**) et des concentrations de 0.5 mg L⁻¹ en solution et de 5 mg kg⁻¹ dans le sol (**Turner et Rust, 1971**).

Après un mois de la culture d'*Atriplex halimus* sur les différentes concentrations du Cr(VI), les résultats obtenus montrent une capacité d'accumulation chez cette espèce. Le **tableau 30** présente la teneur en Cr dans les différentes parties d'*Atriplex halimus* des quatre provenances, après l'application du Cr(VI).

Nos résultats montrent que les plantes d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI) accumulent le chrome dans ses racines puis celui-ci est transféré vers les parties aériennes où il est également accumulé en grande quantité dans les feuilles. Pour les trois concentrations de chrome chez les quatre provenances testées, l'accumulation du Cr dans la partie racinaire des plantes est nettement importante comparativement à celle de la partie aérienne et atteint une valeur moyenne de 0,704 mg/kg dans les racines de la provenance «Oued'Rhiou». Quand aux parties aériennes des plantes, traitées par le Cr(VI), une évolution comparable est observée, mais leurs teneurs en Cr restent beaucoup plus faibles : une teneur maximale de 0,253 mg/kg est mesurée dans les échantillons de la provenance «Oued'Rhiou» à la concentration 150 ppm (**Tableau 30**). **Banks et al. (2006)**, ont pu mettre en évidence la présence de Cr au sein des tissus des plantes, et ont estimé que les plantes prélevaient seulement 1% du Cr disponible au sein des sols. Le développement racinaire s'avère plus profond dans le cas des sols dont la teneur en Cr est plus faible, suggérant une forte phytotoxicité du Cr. **Zayed et Terry (2003)**, notent que la quasi-totalité du Cr absorbé (>99%) reste dans les racines où il est rapidement réduit. Ce résultat confirme l'étude sur le haricot menée par **Huffman et Allaway (1973)**, qui démontrent que seulement 0,1% du Cr s'est accumulé dans la graine contre 98% dans les racines. Des résultats similaires ont été observés avec **Zayed et al. (1998)**, chez *Lemna minor* et *Lemna gibba*, chez *Eichhornia crassipes* (**Zhu et al., 1999**) et chez *Nymphaea alba* (**Vajpayee et al., 2000**).

Les dosages réalisés ont montré que le chrome était majoritairement accumulé dans les racines. Il existe donc probablement, comme chez beaucoup d'autres espèces, un mécanisme permettant de limiter la translocation du Cr du système racinaire vers le système foliaire. Quoi qu'il en soit il faut noter que les concentrations en chrome, atteintes respectivement dans les racines, dans les tiges et dans les feuilles, sont moins importantes au regard de la toxicité connue du Cr (5-30 mg/kg MS) (**Kabata-Pendias, 1992 ; Benton, 1998 ; Larcher, 2003**).

En effet, l'*Atriplex halimus* présente une bonne tolérance aux conditions défavorables du milieu (**Zid et Boukheris, 1977**), ces plantes ont développé au cours de l'évolution des formes de résistance aux métaux et se développent sans problème sur des sites présentant de fortes teneurs en ETM (**Aggangan et al., 1998 ; Cervantes et al., 2001 ; Brady et al., 2005 ; Reeves et al., 2007**), et sont capables de croître sur de tels sols, font l'objet de nombreuses études. Certaines plantes, tolérantes, accumulatrices ou hyper-accumulatrices, sont utilisées pour la revégétalisation des sites

riches en ETM voire la phytoremédiation (ex: *Thlaspi Caerulescens*) (**Brett et al., 1998 ; Robinson et al., 1998 ; Anderson et al. 1999 ; Proctor, 2003 ; Whiting et al., 2004**). Cependant, les relations existant entre les plantes et le Cr restent encore sujettes à de nombreuses interrogations, et notamment l'accumulation par l'*Atriplex halimus*. Les recherches traitant des interactions entre le Cr et les plantes sont relativement limitées (**Cary et Kubota, 1990**).

Alors que, les résultats obtenus confirment donc qu'il existe très probablement chez *Atriplex halimus* un mécanisme efficace de détoxification intracellulaire de la surcharge métallique. Cela étant, les plantes ont tendance à accumuler plus fortement le métal dans les racines que dans les parties aériennes. L'hypothèse d'un blocage du transfert du métal vers les parties supérieures a en effet été mise en évidence chez *Typha latifolia* afin de protéger son système photosynthétique (**Deng et al., 2004**). L'accumulation du Cr au sein des vacuoles des cellules racinaires pourrait expliquer son immobilisation dans les racines, et diminuer sa toxicité. Etant donnée cette forte immobilisation dans les racines, les biologistes envisagent une réduction rapide du Cr(VI) au sein des cellules associé à la production de radicaux libres et le stockage du Cr(III) au sein des vacuoles. Ainsi, la notion de tolérance de certaines espèces semble plus en adéquation (**Shanker et al., 2005**).

L'analyse des teneurs en métaux lourds dans les organes végétaux des plantes a permis de déterminer les quantités de métaux lourds (Pb et Cr) accumulées par organe végétal d'*Atriplex halimus*. Les résultats ont montré la capacité des plantes testées à accumuler des quantités plus élevées de Pb et de Cr à des fortes concentrations en Pb, en Cr(III) et en Cr(VI) dans les différentes parties des plantes d'*Atriplex halimus* (feuilles, tiges et racines). Toutefois, les quantités exportées par chaque organe végétal dépendent de la dose et du métal apportés.

Ce résultat suggère que, même à des concentrations élevées, le plomb et le chrome sont favorables à la croissance de l'*Atriplex halimus* L. les quantités différentes de métaux exportées par les organes végétaux pourraient s'expliquer par les biomasses produites mais aussi par la capacité de chaque plante à transférer le métal vers ses parties aériennes. Pour ce qui est de la corrélation entre la quantité de métaux accumulée par rapport à la biomasse produite, des résultats ont été prouvés par de nombreux auteurs (**Vandecasteele et al., 2008**).

La présence de métaux dans les différentes parties de la plante indique qu'il y a accumulation mais aussi translocation vers les parties aériennes, c'est-à-dire transport de ces éléments des racines vers les parties aériennes.

III-4- Facteur de translocation (FT) du Pb, Cr(III) et du Cr(VI)

Des facteurs de translocation (FT) ont été calculés afin d'évaluer la capacité des plantes d'*Atriplex halimus* à transférer les métaux lourds (plomb et chrome) de ses racines vers ses parties aériennes.

Les résultats moyens dégagés dans le **tableau 31**, indiquent que chez les plantes, traitées par le Cr(VI), le facteur de translocation était aussi important que chez les plantes traitées au Cr(III) et au Pb, ceci est observé chez les quatre provenances. De plus, en présence de Pb, et notamment pour la concentration 4000 ppm, le FT est très réduit. En outre, la provenance «Kharouba» traitée à la concentration 100 ppm de Cr(VI) enregistre un FT (0,585 %) plus élevée que celle des autres provenances traitées avec différentes concentration des métaux lourds : Pb et Cr(III). Les plantes peuvent, comme pour les autres éléments, prélever des quantités différentes de métaux lourds (**Haghir, 1973 ; Page et al., 1981 ; Juste et Solda, 1984 ; Kim et al., 1988**). La migration et l'accumulation des métaux lourds dans les organes, les tissus, les cellules de la plante dépendent essentiellement du métal considéré (**Reddy et Patrick, 1977 ; Richter et Hlusek, 1986 ; Mench et al., 1987**), la plupart des espèces végétales paraissent opérer une forte rétention des métaux lourds dans les racines, à un degré moindre dans les feuilles (**Page et al., 1981 ; Peterson, 1986**). Ces éléments traces sont absorbés par les racines, et y demeurent le plus souvent (**Miquel, 2001**).

Tableau 31. Facteur de translocation (FT) d'*Atriplex halimus*, traitées par différentes concentrations de Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
Pb	1000	0,187±0,273	0,468±0,704	0,193±0,208	0,188±0,161
	4000	0,150±0,245	0,048±0,053	0,132±0,054	0,147±0,191
	8000	0,218±0,257	0,217±0,199	0,198±0,175	0,185±0,454
Cr III	250	0,376±0,592	0,495±0,756	0,399±0,459	0,481±0,412
	500	0,452±0,384	0,329±1,071	0,452±0,264	0,470±0,191
	750	0,428±0,280	0,210±0,181	0,306±0,925	0,400±0,279
Cr VI	50	0,253±0,899	0,359±0,491	0,427±0,632	0,253±1,092
	100	0,639±2,134	0,392±0,347	0,305±0,555	0,407±0,452
	150	0,230±0,257	0,339±0,862	0,376±1,083	0,392±0,874

Les facteurs de translocation les plus faibles ont été observés dans le cas de l'accumulation du plomb par l'*Atriplex halimus*. (**Tableau 31**). **Yoon et al. (2006)**, ont montré dans une étude, des concentrations en métaux dans des plantes natives sur un site contaminé que dans 95% des cas, les concentrations en plomb dans les racines étaient beaucoup plus élevées que dans les feuilles, soulignant une faible mobilité du plomb des racines vers les parties aériennes et donc une immobilisation dans les racines. De plus, ils trouvent des facteurs de translocation assez faibles, indiquant que les plantes séquestrent le plomb dans les parties racinaires et limitent le transport interne, des racines vers les parties aériennes. De même, **Del Rio-Celestino et al. (2006)**, ont trouvé des faibles facteurs de translocation dans des plantes sauvages ayant poussé dans un sol artificiellement contaminé avec du plomb. Ceci peut être attribué à une moindre sollicitation des mécanismes de résistance de la plante vis-à-vis du plomb qui sera alors moins transloqué, les mécanismes de transport du métal vers les parties aériennes étant bloqués du fait d'une trop grande toxicité pour les chloroplastes et les mécanismes moléculaires associés à la photosynthèse (**Clemens et al., 2002**). Par ailleurs, la forme et la composition chimique des éléments jouent un rôle important dans l'absorption végétale (**Callot et al., 1984**). Il a également été montré que le plomb a une faible mobilité dans le sol (moins mobile que le Cr) et une capacité à former des complexes organiques qui le rendent indisponible pour les plantes (**Orlowska et al., 2002**).

Cependant, les facteurs de translocation les plus élevées ont été observés dans le cas de l'accumulation du Cr(VI) par l'*Atriplex halimus* (**Tableau 31**). Selon **Zu et al. (2005)**, un facteur de translocation élevé est favorable à la phytoremédiation. Ce résultat souligne la capacité de cette espèce à transférer le métal lourd de ces racines vers ses parties aériennes. L'étude menée par **Deng et al. (2006)**, a également montré un meilleur transfert des métaux des racines vers les parties aériennes du *Oenanthé javanica*. Les essais faits par **Kabata-Pendias (1992)** ; **Benton (1998)** ; **Larcher (2003)**, montrent aussi, une meilleure translocation du chrome vers les parties aériennes (tiges et feuilles) à partir d'une solution de Cr(VI) qu'avec une solution de Cr(III).

Le facteur de translocation est plus élevés à faibles et moyennes concentrations du Cr(VI) (50 et 100 ppm) et du Cr(III) (500 ppm), ce qui indique qu'à forte concentration, *A. halimus* évite la translocation de ce métal vers ses parties aériennes. Ceci pourrait constituer un mécanisme important de protection contre la diffusion de ce métal toxique vers les tissus verts. Des résultats similaires ont été observés avec **Mesnoui (2016)**, chez l'*Atriplex halimus* traitées au Cd. En effet, le comportement d'*Atriplex halimus* pourrait s'expliquer par la mise en place d'un ou de plusieurs mécanismes permettant de limiter l'absorption par la racine, de réduire le transfert vers la partie aérienne, ou de favoriser l'efflux de chrome en dehors du cytoplasme.

La tolérance aux métaux lourds s'accompagne de différentes stratégies d'accumulation (**Baker et al., 1990**). La plupart des espèces excluent les métaux de leurs organes aériens tout en les accumulant dans leurs racines, si bien que la concentration en métaux dans les parties aériennes est inférieure à celle du sol. Par ailleurs **Salt et al. (1995)**, ont montré qu'une meilleure phytostabilisation immobilisera les métaux lourds dans le sol via le prélèvement racinaire ou la précipitation.

Cette partie du travail a permis de constater que l'*Atriplex halimus* pourrait être de bonne accumulatrice de Pb et de Cr comparativement à certaines espèces halophytes et peuvent avoir un pouvoir purificateur qu'il utilise pour la décontamination des sols pollués. Par ailleurs, les prochaines études physiologiques et biochimiques de ces plantes pourraient expliquer leur capacité à bioaccumuler ces métaux lourds (Pb et Cr). Toutefois, d'un point de vue écotoxicologique, le transfert des métaux vers les parties aériennes est une propriété non désirable puisque les métaux qui s'accumulent peuvent passer dans la chaîne alimentaire par le biais des herbivores.

La suite de notre étude vise à acquérir une meilleure compréhension des comportements de la plante d'*Atriplex halimus* et les différents mécanismes d'adaptations physiologiques et biochimiques, déclenché au stress métallique, afin évaluer les capacités de tolérance et d'accumulation de cette espèce au Pb, au Cr(III) et au Cr(VI) et leur efficacité de dépollution.

IV- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les caractéristiques biochimiques des plantes d'*Atriplex halimus* L.

Les changements biométriques analysés précédemment comme une réponse au stress métallique d'*Atriplex halimus*, sont en réalité le résultat morphologique de l'effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur le métabolisme de ces plantes.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons essayé de mettre en évidence les modifications biochimiques des plantes d'*Atriplex halimus* traitées par 1000, 4000 et 8000 ppm de Pb (NO₃)₂, 250, 500 et 750 ppm de Cr Cl₃ 6H₂O et 50, 100 et 150 ppm de K₂ CrO₄ pendant 30 jours. Notre étude a porté sur la caractérisation des symptômes d'intoxication, l'effet du stress de Pb, Cr(III) et Cr(VI), sur la réponse biochimique qui est basée principalement sur la teneur en chlorophylle (a, b et a+b), en sucres solubles, en proline et en polyphénols (phénols totaux, flavonoïdes et tanins) dans les plantes d'*Atriplex halimus* des quatre provenances.

IV-1- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en chlorophylle a, chlorophylle b et chlorophylle a+b chez l'*Atriplex halimus* L.

Afin de mieux appréhender le fonctionnement du système photosynthétique en présence de pollutions métalliques, les plantes d'*Atriplex halimus*, âgées de 32 semaines, ont été traitées avec différentes concentrations du Pb, du Cr(III) et du Cr(VI), pendant 4 semaines. L'effet de ces métaux sur la teneur chlorophyllienne foliaires des plantes est présenté dans la **figure 23**.

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 87, Annexe 38**), montrent que les facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les interactions bifactorielles "Provenance-Concentration" "Provenance-Métal" et "Métal-Concentration", ainsi que les interactions trifactorielles "Provenance-Métal-Concentration" présentent un effet hautement significatif (P= 0) sur la teneur en chlorophylle chez l'*Atriplex halimus* L.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 88, Annexe 38)**, fait ressortir deux groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Kharouba et Sig» avec des teneurs en chlorophylle a+b plus élevées que le second groupe B constitué par «Béni Saf et Oued'Rhiou».

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait ressortir trois groupes homogènes (**Tableau 89, Annexe 38**) : Groupe A constitué par le Cr(VI) (teneurs en chlorophylle totale plus élevées) et le second groupe B représenté par le Cr(III) et enfin le troisième groupe par le plomb.

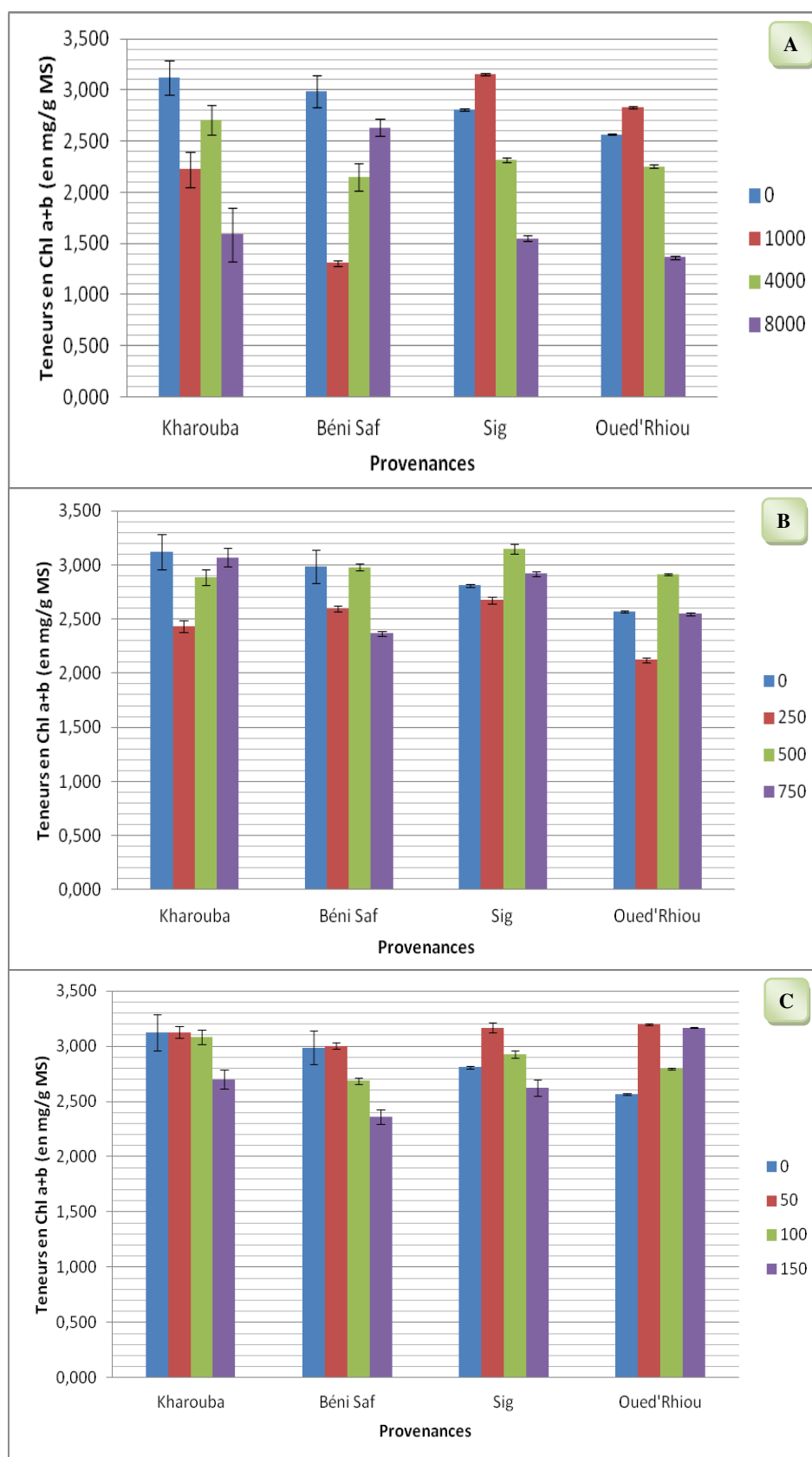


Figure 23. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en chlorophylle totale (en mg/g MS) chez l'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types.

A : Effet du Plomb sur la teneur en chlorophylle totale chez l'*Atriplex halimus* L.

B : Effet du Cr(III) sur la teneur en chlorophylle totale chez l'*Atriplex halimus* L.

C : Effet du Cr(VI) sur la teneur en chlorophylle totale chez l'*Atriplex halimus* L.

Les figures 23 (A, B et C) représentent la teneur en chlorophylle totale de l'espèce étudiée *Atriplex halimus* L. en fonction de l'intensité du stress métallique (1000, 4000 et 8000 ppm) de Pb, (250, 500 et 750 ppm) de Cr(III) et (50, 100 et 150 ppm) de Cr(VI) dans des substrats (Sol). L'examen de ces figures, montre que le contenu en Chlorophylle a+b dans la plante est le plus élevé dans le substrat témoin sans métaux comparativement aux autres plantes stressées à des différentes concentrations. La teneur en chlorophylle a+b dans les plantes stressées varie entre 3,167 à 1,308 mg/g MS par rapport à celles non stressées aux métaux. Les plantes témoins appartenant à la provenance «Oued'Rhiou» représente la teneur la plus importante soit 1,8 mg/g MS.

Il est noté chez l'*Atriplex halimus* L. que le stress au Pb à la concentration 1000 ppm, au Cr(III) à (250 ppm) et au Cr(VI) à la dose (50 ppm) chez les provenances chez la plus part des provenances testées conduit à une légère augmentation de la chlorophylle a et de la chlorophylle a+b par rapport aux autres plantes stressées. Ce résultat est en accord avec les études menées sur *Talinum triangulare* qui montrent une augmentation de la teneur en chlorophylle a dans les feuilles des plantes suite à un traitement à faibles concentrations en Pb (Kumar *et al.*, 2012). Ces résultats sont confirmés par des études qui désignent que des petites quantités en métaux lourds dans les tissus végétaux peuvent avoir un effet stimulant de la chlorophylle sur quelques plantes (Balsberg Pahlsson, 1989 ; Liu *et al.*, 2000). Une augmentation de la photosynthèse paraît en effet peu vraisemblable pour rendre compte de l'augmentation des sucres solubles observée. De plus, la teneur accrue des chlorophylles pourrait résulter d'une protection par la proline des membranes thylacoïdales contre l'attaque des ROS comme rapporté par Kavi Kishor *et al.* (2005).

L'application du traitement par les métaux lourds (Cr(III) et Cr(VI)), se traduit par le maintien des pigments et donc vraisemblablement de la photosynthèse. En revanche, l'effet des différentes concentrations de Pb, Cr(III) et Cr(VI) ne semble pas identique sur les deux types de chlorophylle a et b, les résultats obtenus montrent que la chlorophylle b est plus sensible que la chlorophylle a à l'intoxication (Tableau 32). La chlorophylle b est connue pour être plus affectée par les traitements au Pb que la chlorophylle a (Vodnik *et al.*, 1999 ; Sharma et Dubey, 2005). Zou *et al.* (2010), ont mis en évidence l'impact du Pb sur la chlorophylle et ont observé des tendances semblables pour la chlorophylle b chez des plantes d'*Athyrium wardii* en présence des concentrations du Pb variant de 0 à 600 mg/kg.

Tableau 32. Teneurs moyennes en chlorophylle a et chlorophylle b (en mg/g MS) chez l'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressés au Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type.

Traitement		Provenance							
Métal	[] (ppm)	Kharouba		Béni Saf		Sig		Oued'Rhiou	
		Chl a	Chl b	Chl a	Chl b	Chl a	Chl b	Chl a	Chl b
T	0	1,786±0,154	1,337±0,051	1,698±0,116	1,289±0,063	1,838±0,011	1,314±0,009	1,876±0,006	1,319±0,007
Pb	1000	1,549±0,124	1,157±0,044	1,504±0,077	1,129±0,013	1,668±0,009	1,143±0,007	1,690±0,010	1,145±0,005
	4000	1,248±0,069	0,978±0,105	1,251±0,045	0,898±0,095	1,330±0,011	0,983±0,014	1,289±0,010	0,964±0,013
	8000	0,899±0,187	0,687±0,102	0,784±0,019	0,525±0,015	1,005±0,008	0,543±0,032	0,865±0,012	0,501±0,015
Cr(III)	250	1,811±0,071	1,257±0,030	1,711±0,021	1,269±0,025	1,853±0,037	1,296±0,013	1,840±0,008	0,282±0,018
	500	1,780±0,076	1,109±0,028	1,616±0,016	0,981±0,017	1,803±0,012	1,116±0,009	1,821±0,006	1,091±0,012
	750	1,581±0,050	0,853±0,096	1,567±0,012	0,801±0,016	1,691±0,012	0,983±0,018	1,657±0,007	0,891±0,013
Cr(VI)	50	1,813±0,076	1,315±0,063	1,803±0,035	1,201±0,011	1,875±0,049	1,291±0,015	1,882±0,007	1,285±0,005
	100	1,784±0,077	1,298±0,013	1,683±0,013	1,003±0,037	1,730±0,025	1,199±0,014	1,717±0,014	1,081±0,008
	150	1,596±0,083	1,104±0,019	1,489±0,014	0,873±0,070	1,629±0,005	0,998±0,077	1,587±0,007	0,981±0,014

Certains paramètres physiologiques, comme la teneur relative en eau dans les feuilles, ne sont pas affectés par la présence des métalloïdes. En revanche, les polluants affectent fortement les concentrations en chlorophylles totales qui diminuent de 50 %. Dans la littérature, la baisse des teneurs en chlorophylles est souvent corrélée à une inhibition de la biosynthèse des chlorophylles (Stobart *et al.*, 1985 ; Stiborova *et al.*, 1986) ou à une accélération de leur dégradation (Luna *et al.*, 1994) provoquées par la présence des métaux lourds. De même, la photosynthèse nette est fortement affectée par les polluants pendant la période végétative des plantes. Cette diminution de l'activité photosynthétique a pu dans le cas du plomb être corrélée à une diminution de la taille et du nombre des stomates (Kosobrukhov *et al.*, 2004).

Nos résultats montrent une diminution importante de la teneur en pigments chlorophylliens (Chl a, Chl b, Chl a+b) des plantes d'*Atriplex halimus* exposées à différentes concentrations en Pb, Cr(III) et en Cr(VI), par rapport aux témoins chez la plus part des provenances testées. Cette diminution est surtout prononcée chez les plantes stressées au plomb. La réduction de la teneur chlorophylle s'accroît avec l'augmentation de l'intensité du stress.

De ce fait plusieurs travaux montrent que le plomb a une influence sur la réduction de la teneur en pigments chlorophylliens. Ceci pourrait être attribué d'une part au stress oxydatif qui provoque l'inhibition de l'acide aminolévulinique déshydratase (ALAD), une enzyme importante dans la biosynthèse de la chlorophylle (**Pereira et al., 2006**) et d'une autre part, le plomb peut agir directement sur le transport des électrons et des enzymes du cycle de Calvin (en particulier la Rubisco) et indirectement induit une diminution de la teneur en chlorophylle (**Chatterjee et Chatterjee, 2000**). Le plomb, en induisant une fermeture des stomates, limite considérablement les flux gazeux entre les feuilles et le milieu extérieur. Cette limitation du flux de CO₂, entrant est considérée comme la cause principale de la forte réduction de la fixation du CO₂ (**Bazzaz et al., 1975**). Les ions du plomb peuvent aussi être la cause principal de la détérioration de la structure de la composition des thylakoïdes et des chloroplastes, ce qui a pour effet d'altérer les photosystèmes (**Yruela et al., 1996 ; Yruela, 2005**).

Le stress au plomb, Cr(III) et Cr(VI) a provoqué une légère diminution de la chlorophylle d'une manière générale, mais l'effet de ce stress demeure significatif. Il en résulte un léger abaissement du taux en chlorophylle a+b. Les mêmes résultats ont été obtenus chez le radis (*Raphanus sativus* L.) et canola (*Brassica napus*) cultivés dans des sols pollués par plusieurs contaminants (**Marchiol et al., 2004**), le blé traité avec du nickel (**Gajewska et Sktodowska, 2007**), le maïs traité par le cadmium (**Jain et al., 2007**) et dans les cotylédons de concombres traités par l'aluminium (**Pereira et al., 2010**). Nos résultats sont aussi en accord avec les travaux de **Baszynski et al. (1980) ; Larsson et al. (1998) ; Di Cagno et al. (1999). Huang et al. (1974) ; Bazzaz et al. (1975) ; Poskuta et al. (1988)**, ont confirmé que l'exposition des plantes aux métaux lourds conduit à une forte inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique et à une limitation du taux d'assimilation de CO₂. Le rendement photosynthétique très sensible, peut chuter de plus de 50 % (**Kosobrukhov et al., 2004 ; Irfan Qureshi et al., 2005 ; Chen et al., 2007 ; Gopal et Rizvi, 2008**). Les plantes montrent alors des signes de stress par la production d'anthocyanes ou la destruction de la chlorophylle (**Ochatt et al., 1999**).

IV-2- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en sucres solubles d'*Atriplex halimus* L.

Dans cette partie, l'effet du plomb et du chrome a été étudié en mesurant la teneur en sucres solubles dans les feuilles et les tiges d'*Atriplex halimus* L. cultivées en présence de différentes concentrations en Pb, Cr(III) et Cr(VI).

IV-2-1- Dans les feuilles

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 90, Annexe 39**), permettent de conclure que l'effet du facteur "Provenance" influe de manière très significative sur la teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus* avec ($P \leq 0,01$) et le facteur "Concentration" influe de manière hautement significative avec ($P = 0$). Seul le facteur "Métal" qui n'a pas une influence significative ($P = 0,022$) sur ce paramètre.

L'effet d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal" influe de manière hautement significative sur la teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus* en avec ($P \leq 0,001$), l'interaction "Provenance-Concentration" a un effet très significatif sur ce paramètre avec ($P \leq 0,01$). Quand à l'interaction "Métal-Concentration" influe de manière hautement significative ($P = 0$).

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître deux groupes homogènes (**Tableau 91, Annexe 39**) :

Groupe A constitué par le Cr(III) avec une moyenne de 11,273 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Pb et le Cr(VI) avec respectivement une moyenne de 11,056 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ et 11,037 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 92, Annexe 39**), fait ressortir trois groupes homogènes :

Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 12,69 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$, le deuxième groupe B représenté par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI), avec une moyenne de 10,83 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ et (4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI)) avec une moyenne de 10,82 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$, qui sont plus élevées que celle du 3^{ème} groupe C par le Témoin qui représente des valeurs les plus faibles de 10,16 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$.

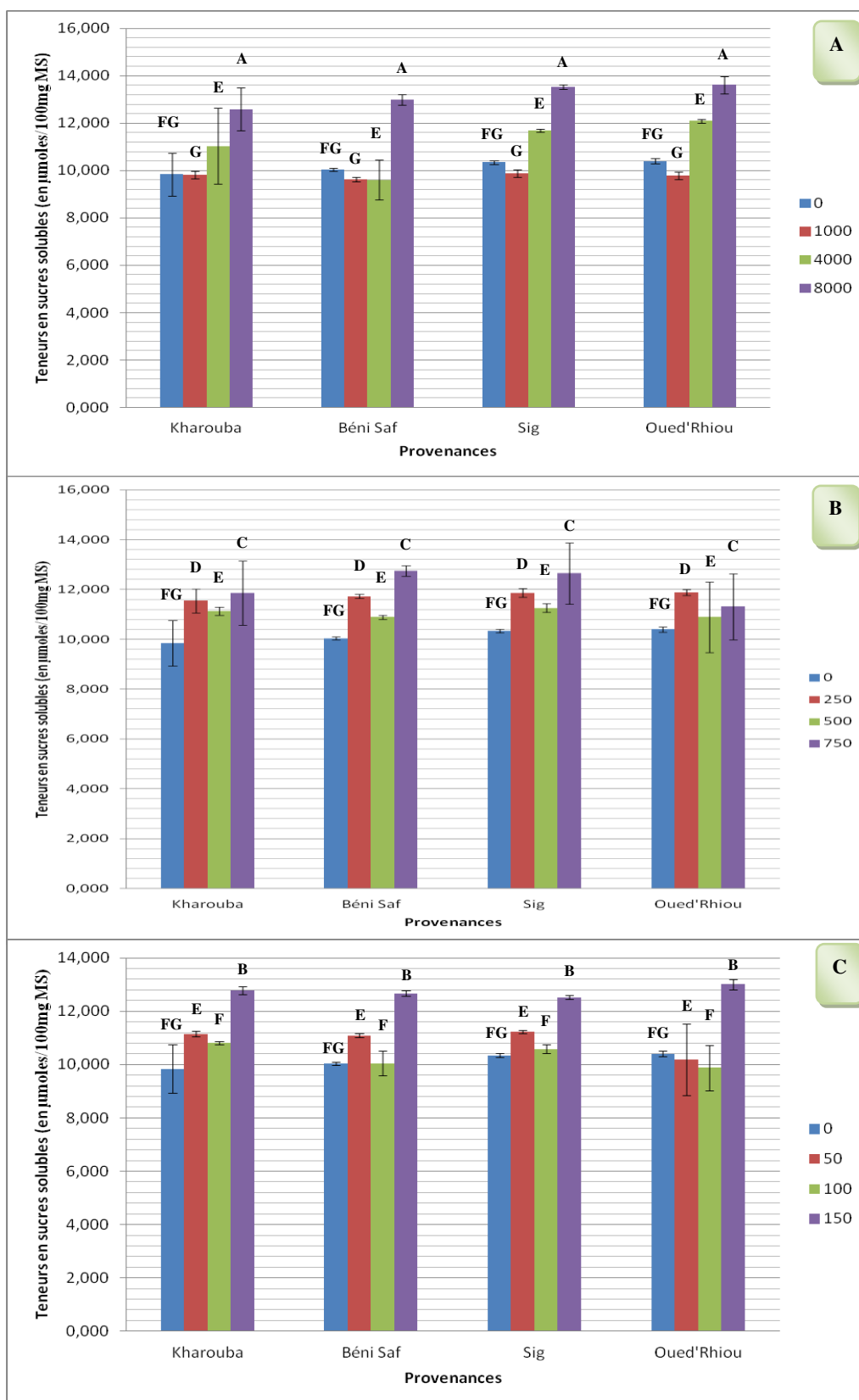


Figure 24. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en sucres solubles (en $\mu\text{mol}/100 \text{ mg MS}$) dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types et les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

A : Effet du Plomb sur la teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L.

B : Effet du Cr(III) sur la teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L.

C : Effet du Cr(VI) sur la teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L.

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (Voir **Tableau 93, Annexe 40**).

Par ailleurs, En présence du Cr(III), les quatre provenances présentent des teneurs en sucres solubles dans les feuilles plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Pb et le Cr(VI) (**Figure 24**).

IV-2-2-Dans les tiges

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 94, Annexe 41**), montrent que les deux facteurs "Métal" et "Concentration" influent fortement sur la teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus* ($P= 0$). Par ailleurs, aucune différence significative n'apparaît sur le facteur "Provenance" ($P= 0,83$).

La comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour ce paramètre (**Tableau 95, Annexe 41**), fait apparaître trois groupes homogènes : Le premier groupe A représenté par le facteur Pb, qui en leur présence les plantes des quatre provenances testées ont des teneurs plus élevées en sucres solubles dans les tiges, le second groupe B représenté par le Cr(VI) et le 3^{ème} groupe C correspondant au Cr(III) sous l'effet duquel on observe une réduction de sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus*.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 96, Annexe 41**), fait ressortir trois groupes homogènes :

Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 5,24 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$, le deuxième groupe B représenté par les concentrations : (1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI)) avec une moyenne de 4,24 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ et (4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI)) avec une moyenne de 4,16 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$, qui sont plus élevées que celle du 3^{ème} groupe C par le Témoin qui représente des valeurs les plus faibles de 3,22 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$.

Les résultats des **figures 24 et 25** montrent que les teneurs en sucres solubles chez l'*Atriplex halimus* sont plus élevées au niveau des différents organes étudiés en situation de stress métallique comparativement au témoin. On remarque que les teneurs en sucres solubles augmentent au fur et mesure que l'application des métaux lourds augmente. **Verma et Dubey (2003)**, ont montré également que les métaux lourds augmentent la teneur en sucres solubles chez les plantes de riz.

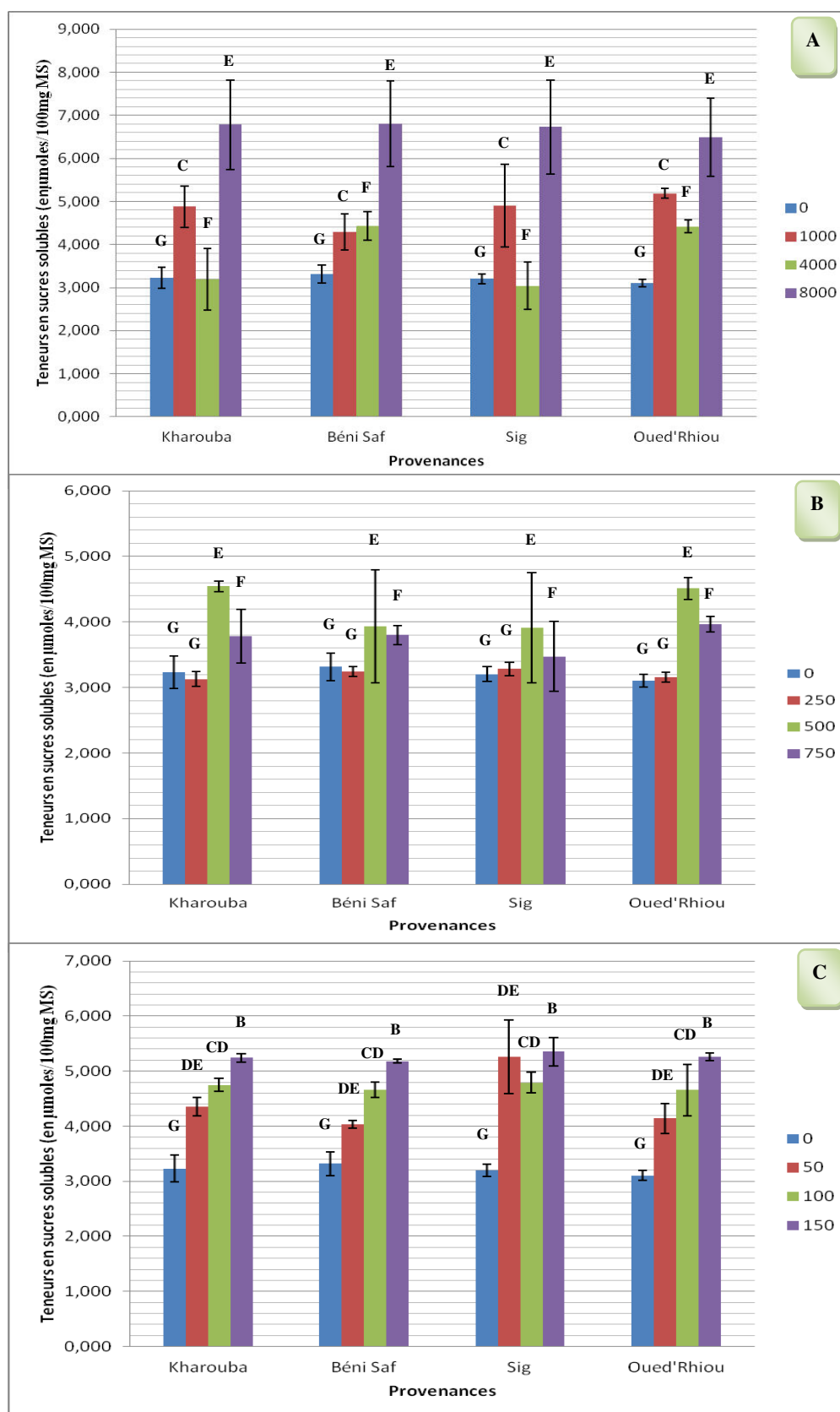


Figure 25. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en sucres solubles (en $\mu\text{mol}/100 \text{ mg MS}$) dans les tiges d'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types et les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

A : Effet du Plomb sur la teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus* L.

B : Effet du Cr(III) sur la teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus* L.

C : Effet du Cr(VI) sur la teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus* L.

Il faut noter également que la dose 8000 ppm du plomb présente le taux le plus élevé de sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la provenance «Oued'Rhiou» avec une valeur de 13,614 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ (**Tableau 93, Annexe 40**) et dans les tiges d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la provenance «Béni Saf» avec une valeur de 6,798 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ (**Figure 25**). Nos résultats sont en accord avec de nombreux travaux rapportant une augmentation de la teneur en sucres solubles sous l'effet du plomb. Ces résultats sont signalés chez le riz (**Bhattacharjee et al., 1996**), *Lemma gibba* (**Miranda et Ilangovan, 1996**), la tomate (**Kratovalieva et Cvetanowska, 2001**), la carotte (**Selim, 2001**), *Chlorella vulgaris* (**Bajguz, 2011**), les feuilles et la tige de *Vicia faba* L. (**Azzouz, 2011**), l'artichaut (*Cynara scolymus* L.) (**Karimi et al., 2012**), les racines et la partie aériennes de la betterave à sucre (**Naderi et al., 2013**) et chez l'haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) (**Aldoobie et Beltagi, 2013**). Par contre, d'autres auteurs confirment des résultats différents de notre étude en enregistrant des chutes de ces composées glucidiques chez *Salvinia natans* (**Mohan et Hosetti, 1998**), carthame (**Sayed, 1999**) et chez la citronnelle (**Soheir et al., 2002**). **Bhardwaj et al. (2009)**, rapportent que le plomb induit une diminution totale des sucres solubles chez *Phaseolus vulgaris*. Selon **Preeti et Tripathi (2011)**, la diminution des glucides est montrée aussi chez *Albizia procera*.

Cependant, d'après les résultats obtenus sur l'évolution des sucres solubles dans la partie aérienne des plantes d'*Atriplex halimus* L., il ressort que ces composés glucidiques ont aussi connu une augmentation de la concentration en réponse au stress métallique pour cette espèce. L'accumulation des sucres solubles se produit de manière importante dans les feuilles que dans les tiges sous les conditions normales ou sous stress métallique. À cet égard, **Bennabi (2005)**, a signalé une accumulation des sucres solubles au niveau des feuilles, supérieures aux tiges et aux racines, lorsque les plantes d'*Atriplex halimus* L. sont stressées. Selon **Hajhashemi et al. (2006)**, l'accumulation des sucres solubles observés au niveau foliaire est parmi les phénomènes les plus observés dans la réponse au stress. Ces résultats traduisent d'une part, la variabilité du métabolisme biochimique d'*Atriplex halimus* sous stress métallique et d'autre part, expriment leur capacité à synthétiser les sucres solubles et les accumuler dans des sites différents.

Nos résultats montrent que le traitement par le plomb produit un doublement de la teneur en sucres solubles dans les tiges. Par ailleurs, le traitement par le Cr(III) et le Cr(VI), une légère augmentation de ces métabolites est observée. Cette accumulation de sucres solubles sous l'effet du Pb, Cr(III) et le Cr(VI), pourrait, à l'exemple de ce qui a été rapporté pour l'arsenic par **Jha et Dubey (2004)**, résulté d'une altération des activités enzymatiques notamment l'invertase acide, le saccharose synthase et l'amidon phosphorylase. **Costa et Spitz (1997)**, observent également une perturbation de la teneur en sucres solubles sous l'effet du Cd qui résulterait de l'action des radicaux libres produits.

En outre, l'accumulation des sucres solubles totaux chez les plantes a été largement reportée comme une réponse à la salinité et à la sécheresse, souvent accompagnée par une décroissance significative concernant la vitesse d'assimilation de CO₂ (Ashraf, 2004). Ils ont une importance particulière à cause de leur relation directe avec des processus physiologiques comme la photosynthèse, la translocation et la respiration ; en plus, ils ont un rôle potentiel dans l'adaptation des stress (Ildiko et Gabor, 2000). Parmi les rôles attribués aux sucres est la vitrification du cytoplasme, protection des protéines et protection des membranes (Wingler, 2002). À cet égard, L'accumulation des sucres solubles dans les tissus des végétaux sous l'effet d'un stress environnemental a été considérée comme un aspect d'adaptation (Flowers *et al.*, 1977).

Depuis longtemps, il est connu que le taux des sucres augmente considérablement chez les plantes soumises aux différents types de stress. En effet, Plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude de leur accumulation chez plusieurs espèces soumises aux stress (Zerrad *et al.*, 2006 ; Arndt *et al.*, 2007 ; Belfakih *et al.*, 2013) ; des corrélations significatives et négatives ont été établies, en conditions salines, entre la production de la biomasse sèche aérienne et les teneurs des feuilles en sucres solubles totaux de certaines espèces comme le tournesol, le haricot et le riz (El Midaoui *et al.*, 2007). Les variétés présumées plus tolérantes de ces espèces semblent accumuler des quantités plus élevées de sucres solubles (Bouزيد, 2009). Cela a été vérifié aussi par Chunyang (2003), chez des arbres adultes d'eucalyptus sous différents stress hydriques. Mekliche *et al.* (2003), ont mis en évidence une augmentation de la teneur en sucres solubles chez six variétés de blé dur en situation de contrainte hydrique. Dubey et Singh (1999), suggèrent que cette accumulation de glucides solubles a été rapportée en réponse à différents stress environnementaux et particulièrement des métaux. C'est une stratégie adoptée par les plantes afin de résister aux contraintes du milieu (Bajji *et al.*, 1998 ; El Midaoui *et al.*, 2007).

Les principaux sucres solubles accumulés sous stress sont : le glucose, fructose et le saccharose (Hare *et al.*, 1998), et ces derniers semblent jouer un rôle très important dans le maintien d'une pression de turgescence qui est à la base des différents processus contrôlant la vie d'une plante. Selon Clifford *et al.* (1998), l'accumulation des sucres solubles peut résulter d'une augmentation de l'hydrolyse de l'amidon puisqu'ils ont enregistré, simultanément, une diminution de l'amidon et une accumulation de sucres solubles dans les tissus stressés. La teneur élevée des hexoses, essentiellement au niveau des feuilles âgées, pourrait témoigner soit d'une limitation de leur utilisation suite à l'arrêt de croissance (Lawlor, 2002), soit d'une force d'appel importante et leur hydrolyse par des enzymes présentes dans ces organes (Mouri *et al.*, 2014). Cette accumulation pourrait avoir un rôle osmotique empêchant la déshydratation des cellules et le maintien de la balance

de la force osmotique pour garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible (Bouzoubaa *et al.*, 2001).

Les sucres solubles totaux contribuent fortement à l'ajustement osmotique chez les plantes en conditions de stress. Ils compromettent indirectement la croissance puisque les glucides ne sont pas directement métabolisables et, d'autre part, parce qu'il est aujourd'hui clairement établi que l'accumulation des sucres solubles totaux peut modifier certains paramètres de la photosynthèse en inhibant l'expression de nombreux gènes impliqués dans l'assimilation du CO₂ (Koch, 1996). A ce stade d'expérimentation, les résultats sont en faveur de l'implication de l'*Atriplex halimus* en un projet de phytoremédiation.

IV-3- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en proline d'*Atriplex halimus* L.

Un dosage de proline a été réalisé, afin d'évaluer l'effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les différents organes (racines, tiges et feuilles) des plantes d'*Atriplex halimus* des quatre provenances testées (Voir **Figures 26, 27 et 28**).

IV-3-1- Dans les feuilles

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 97, Annexe 42**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P=0$) sur la teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus*.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** (**Tableau 98, Annexe 42**), fait ressortir trois groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig et Kharouba» avec des teneurs en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus* plus élevées que celles du second groupe B constitué par «Oued'Rhiou», ensuite un troisième groupe C «Béni Saf» qui représente les teneurs en proline les plus faibles.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 99, Annexe 42**) :

Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 0,774 μ moles/100 mg MS, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(III) avec une moyenne de 0,708 μ moles/100 mg MS et enfin le groupe C représenté par le Cr(VI) avec une moyenne la plus faible de 0,625 μ moles/100 mg MS.

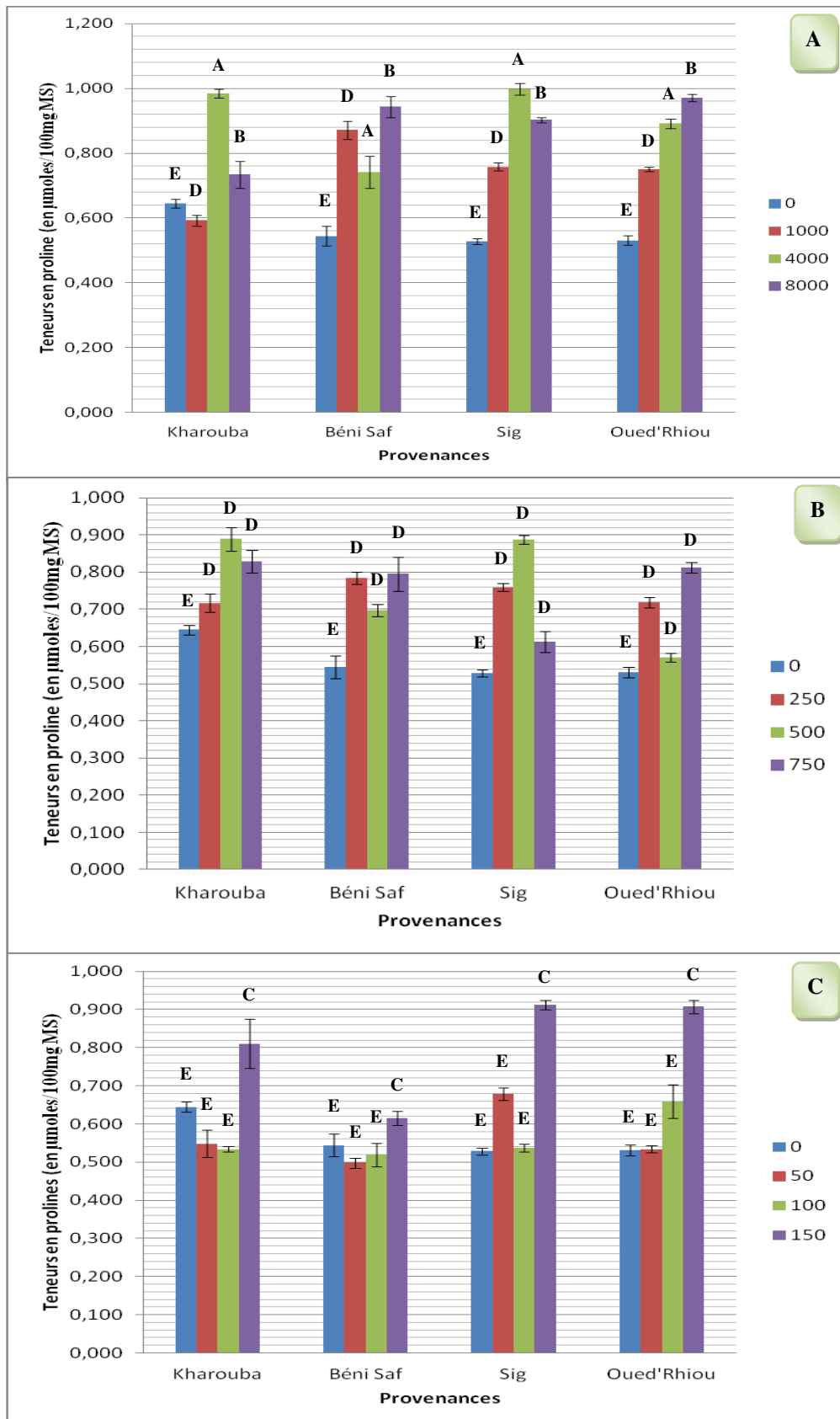


Figure 26. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en proline (en $\mu\text{mol}/100\text{ mg MS}$) dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types et les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

A : Effet du Plomb sur la teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L.

B : Effet du Cr(III) sur la teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L.

C : Effet du Cr(VI) sur la teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 100, Annexe 42**), fait ressortir quatre groupes homogènes :

Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,82 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$, le deuxième groupe B par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,742 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ ensuite le 3^{ème} groupe C par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,684 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ et enfin le 4^{ème} groupe D par le Témoin avec une moyenne de 0,562 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$.

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Figure 26**).

Les teneurs moyennes en proline dans les feuilles des plantes d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement plus élevées chez les provenances «Sig et Kharouba» que celles signalées chez les provenances «Béni Saf et Oued'Rhiou».

Par ailleurs, En présence du Pb, les quatre provenances présentent des teneurs en proline dans les feuilles plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(III) et Cr(VI) (**Tableau 101, Annexe 43**).

IV-3-2- Dans les tiges

En ce qui concerne la teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus*, les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 102, Annexe 44**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P= 0$) sur ce paramètre.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** (**Tableau 103, Annexe 44**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Oued'Rhiou» avec des teneurs en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus* plus élevées que le second groupe AB constitué par «Sig», ensuite un troisième groupe B par «Kharouba» et enfin le quatrième groupe C «Béni Saf» qui représente les teneurs en proline les plus faibles.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 104, Annexe 44**) : Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 0,632 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(VI) avec une moyenne de 0,572 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$ et enfin le groupe C représenté par le Cr(III) avec une moyenne la plus faible de 0,554 $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$.

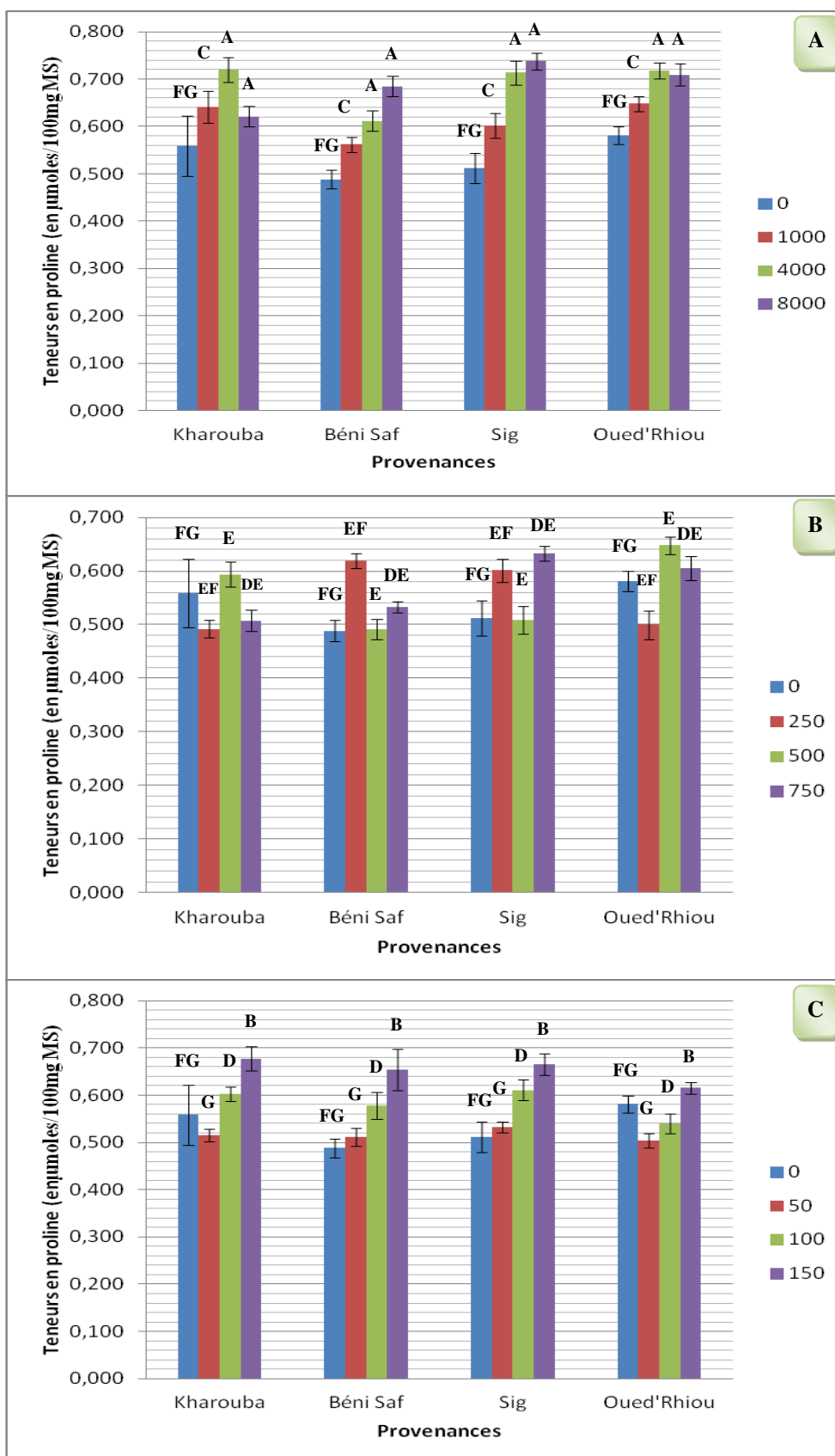


Figure 27. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en proline (en $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$) dans les tiges d'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types et les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

A : Effet du Plomb sur la teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus* L.

B : Effet du Cr(III) sur la teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus* L.

C : Effet du Cr(VI) sur la teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus* L.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 105, Annexe 44**), fait ressortir quatre groupes homogènes :

Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,637 μ moles/100 mg MS, le deuxième groupe B par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,611 μ moles/100 mg MS ensuite le 3^{ème} groupe C par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,561 μ moles/100 mg MS et enfin le 4^{ème} groupe D par le Témoin avec une moyenne de 0,535 μ moles/100 mg MS.

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Figure 27**).

Les teneurs moyennes en proline dans les tiges des plantes d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement plus élevées chez les provenances «Oued'Rhiou et Sig» que celles signalées chez les provenances «Kharouba et Béni Saf».

Par ailleurs, En présence du Pb, les quatre provenances présentent des teneurs en proline dans les tiges plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(III) et Cr(VI) (**Tableau 101, Annexe 43**).

IV-3-3- Dans les racines

Les résultats de l'analyse de variance de la teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus* (**Tableau 106, Annexe 45**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" ont un effet hautement significatif avec ($P=0$) sur ce paramètre.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** (**Tableau 107, Annexe 45**), fait ressortir trois groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig et Oued'Rhiou» avec des teneurs en proline dans les racines d'*Atriplex halimus* plus élevées que le second groupe B constitué par «Kharouba», ensuite un troisième groupe C «Béni Saf» qui représente les teneurs en proline les plus faibles.

La comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour ce paramètre (**Tableau 108, Annexe 45**), fait apparaître trois groupes homogènes : Le premier groupe A représenté par le facteur Pb, qui en leur présence les plantes des quatre provenances testées ont des teneurs plus élevées en proline dans les racines, le second groupe B représenté par le Cr(VI) et le 3^{ème} groupe C correspondant au Cr(III) sous l'effet duquel on observe une réduction de proline dans les racines d'*Atriplex halimus* chez la plus part des provenances testées.

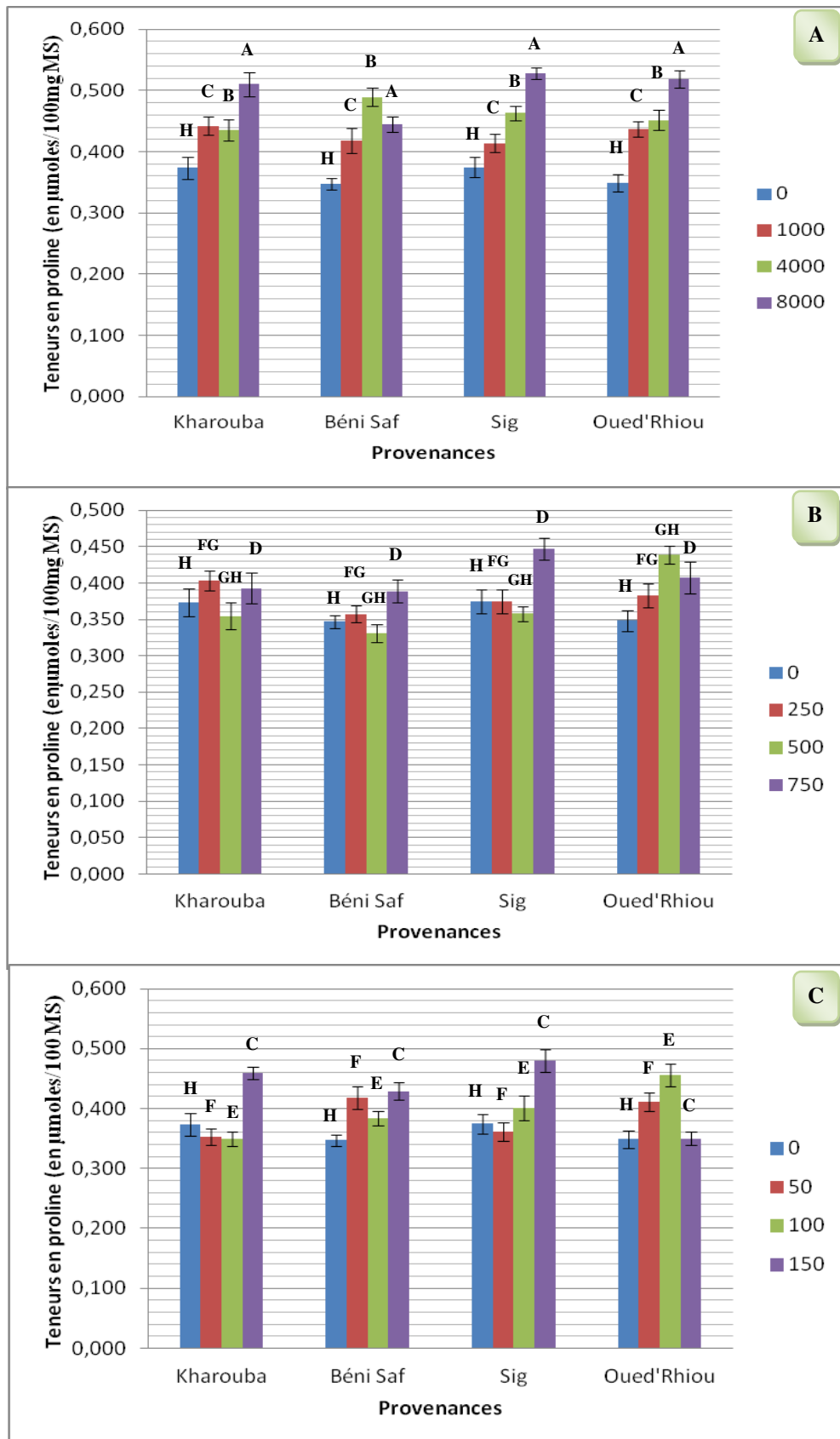


Figure 28. Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la teneur en proline (en $\mu\text{moles}/100 \text{ mg MS}$) dans les racines d'*Atriplex halimus* L. Les barres représentent les écarts types et les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

A : Effet du Plomb sur la teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus* L.

B : Effet du Cr(III) sur la teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus* L.

C : Effet du Cr(VI) sur la teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus* L.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 109, Annexe 45**), fait ressortir trois groupes homogènes :

Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,45 μ moles/100 mg MS, le deuxième groupe B représenté par les concentrations : (1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI)) avec une moyenne de 0,405 μ moles/100 mg MS et (4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI)) avec une moyenne de 0,398 μ moles/100 mg MS, qui sont plus élevées que celle du 3^{ème} groupe C par le Témoin qui représente des valeurs les plus faibles de 0,361 μ moles/100 mg MS.

Comparativement aux plantes non stressées, Les résultats des **figures 26, 27 et 28** montrent que le taux de la proline dans les feuilles, les tiges et les racines d'*Atriplex halimus* est plus élevé chez les plantes traitées au plomb que chez les plantes témoins et celles traitées au Cr(III) et au Cr(VI), chez la plus part des provenances testées. Il faut noter également que la dose 4000 ppm du plomb présente le taux le plus élevé du proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la provenance «Sig» avec une valeur de 0,998 μ moles/100 mg MS (**Figure 26**), dans les tiges d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la provenance «Sig» traitées à la dose (8000 ppm) du plomb avec une valeur de 0,738 μ moles/100 mg MS (**Figure 27**) et dans les racines d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la même provenance «Sig» traitées à la même dose (8000 ppm) du plomb, ou la teneur en proline atteint une valeur de 0,528 μ moles/100 mg MS (**Figure 28**). Nos résultats sont en accord avec de nombreux travaux rapportant une augmentation de la teneur en proline sous l'effet du plomb. Ces résultats sont signalés chez la fève (*Vicia faba* L.) (**Azzouz, 2011**), chez les racines du tournesol en présence de ce métal (**Azad et al., 2011**) et chez *Hydrilla verticillata* sous l'action combiné du plomb et de cadmium (**Singh et al., 2012**). De plus, **Biteur (2012)**, rapporte que l'apport d'acétate de plomb induit une augmentation importante en proline chez le radis (*Raphanus sativus*). En effet, notre étude montre que la teneur en proline augmente chez l'*Atriplex halimus* au fur et mesure que les concentrations en nitrate de plomb, chlorure de chrome Cr(III) et chromate de potassium Cr(VI) augmente. Cette accumulation affecte les parties aériennes et les racines de plantes stressées. **Thiery et al. (2004)** ; **Djeddi (2006)** ; **Hadjadj et al. (2011)**, suggèrent que les quantités accumulées pourraient être liées au niveau de tolérance aux stress. Nos résultats sont en accord avec de nombreux travaux, par exemple chez *Vigna unguiculata* (**Bhattacharjee et al., 1996**), la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) (**De et Mukherjee, 1998**), l'haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) (**Zengin et Munzuroglu, 2005**), chez la partie aériennes de la betterave à sucre (**Naderi et al., 2013**) et chez l'artichaut (*Cynara scolymus* L.) (**Karimi et al., 2012**). Ces résultats sont signalés aussi chez (*Vigna mungo* L.) (**Handique et Handique, 2009**). **Chen et al. (2003)** ; **Dinakar et al. (2008)** ; **Tamas et al. (2008)**, ont également montré que la teneur en proline augmente en réponse à différents stress

dont le cadmium, pour des plantes variées telles que le lupin (Costa et Spitz, 1997), le riz (Shah et Dubey, 1998), le radis (Chen *et al.*, 2003) et le soja (Balestrasse *et al.*, 2005). D'autres travaux ont abouti aux conclusions similaires sous l'effet des autres métaux tels que le Mn (Lei *et al.*, 2007), Zn, Pb, Co et Cu (Alia *et al.*, 1995 ; Schat *et al.*, 1997 ; Sharmila et Pardha Saradhi, 2002 ; Sharma et Dietz, 2006).

Par ailleurs, d'après les résultats obtenus sur l'évolution de la proline dans la partie aérienne et les racines des plantes d'*Atriplex halimus* L., il ressort que cet acide aminé a aussi connu une augmentation de la concentration en réponse au stress métallique pour cette espèce, mais la teneur la plus importante est apparue chez les feuilles des quatre provenances testées. De nombreux travaux signalent que la proline migre vers les feuilles pour s'y localiser. À cet égard, Zengin et Kirbag (2007) et Azad *et al.* (2011), signalent une accumulation de la proline au niveau des feuilles de tournesol (*Helianthus annuus* L.) et les feuilles de blé (Janmohammadi *et al.*, 2013) ; ce contenu foliaire en proline a été suggéré comme un marqueur de stress (Leprince *et al.*, 2004 ; Djerroudi-Zidane *et al.*, 2010). Cette accumulation contribue à l'acquisition de la résistance de la plante à la contrainte métallique grâce à l'ajustement osmotique dont la proline est responsable (Azzouz, 2011 ; Biteur, 2012). Par contre, d'autres auteurs confirment des résultats différents de notre étude en signalant que la proline se localiserait dans les tiges, comme chez *Retama retam* (Ighilhariz, 1990) et dans les racines, chez le maïs (Rodriguez *et al.*, 1997). L'accumulation de la proline chez diverses espèces de plantes stressées a été corrélée à leur capacité de tolérance, et sa concentration est généralement plus élevée chez les plantes tolérantes que les plantes sensibles (Ashraf et Foolad, 2007).

L'exposition aux métaux lourds se traduit souvent par une synthèse de métabolites divers qui s'accumulent à des concentrations de l'ordre des millimoles, parmi lesquels figurent certains acides aminés (Costa et Spitz, 1997 ; Sharma et Dietz, 2006 ; Lei *et al.*, 2007), particulièrement la proline (Samarakoon et Rauser, 1979 ; Jha et Dubey, 2004) et des polyamines (Taulavuori *et al.*, 2005 ; Sharma et Dietz, 2006 ; Groppa *et al.*, 2007 ; Groppa et Benavides, 2008). Cependant, la proline reste l'acide aminé le plus important (Ashraf, 2004). Elle s'accumule chez plusieurs espèces végétales (Verbruggen *et al.*, 1993 ; Jithesh *et al.*, 2006 ; Molinari *et al.*, 2007), et dans différentes situations de stress : salin (Demiral et Türkan, 2005), hydrique (Taulavuori *et al.*, 2005), osmotiques (Panda, 2003 ; Leprince *et al.*, 2004), radiations UV (Pardha Saradhi *et al.*, 1995) et thermique (Taulavuori *et al.*, 2005). En effet, la proline est un acide aminé souvent considéré comme un biomarqueur de stress (Szabados et Savoré, 2009 ; Djerroudi-Zidane *et al.*, 2010 ; Boublenza, 2012), elle est considérée comme faisant partie d'un syndrome adaptatif général aux conditions défavorables (Sharmila et Pardha Saradhi, 2002).

En effet, nos résultats sont expliqués par **Flagella et al. (2006)**, qui suggèrent que l'accumulation de la proline est le résultat de l'inhibition de son oxydation, l'augmentation du catabolisme des protéines et/ou une synthèse de nouveau de cet acide aminé (**Ben khaled et al., 2003 ; Djeddi, 2006**). En plus, la biosynthèse de cet acide aminé peut être associée à la régulation du pH cytosolique (**Denden et al., 2005**) ou la production de NADPH pour la stimulation de la voie des pentoses-phosphates (**Lutts et al., 1996**). Généralement, différentes fonctions sont attribuées à l'accumulation de ce soluté compatible (**Sharmila et Pardha Saradhi, 2002**) : Selon **Hassani et al. (2008)**, cette accumulation permet la protection de la membrane cellulaire et participe à l'ajustement osmotique, chélation et détoxification des métaux, protection des enzymes, régulation de l'acidité cytosolique, stabilisation de la machinerie de la synthèse protéique, piégeage des espèces réactives de l'oxygène (radicaux hydroxyles, oxygène singulet) (**Sharmila et Pardha Saradhi, 2002**) et la constitution du réserve de carbone et d'azote réduits, utilisés par la plante postérieurement à la période du stress (**Keller et Ludlow, 1993**).

Les variations dans l'accumulation de la proline en fonction de l'organe, de la nature et de l'intensité du stress métallique, observées chez l'*Atriplex halimus*, traduisent dans nos conditions expérimentales une aptitude à la résistance des seuils de concentrations métalliques des milieux de culture. À cet égard, De nombreux travaux rapportent que la proline s'accumule dans la plante lorsqu'elle se trouve en conditions défavorables (**Sivarakrishnan et al., 1988**), ce qui traduit le caractère de la résistance aux stress (**Greenway et Munns, 1980**). Cette variation dans l'accumulation de la proline observée sur les plantes d'*Atriplex halimus* expérimentées serait due à une compartimentation de l'acide aminé, d'où l'expression de sites de résistance de la plante (**Belkhodja et Benkabilia, 2000**). En outre, le transport de cet acide aminé de la source (lieu de synthèse) au site de résistance apparaît comme un paramètre important dans l'acquisition de cette résistance (**Paquin, 1986**).

Le fait que la teneur en proline évolue, suite au traitement des plantes d'*Atriplex halimus* L. avec des concentrations croissantes de plomb, Cr(III) et Cr(VI), laisse penser que les plantes d'*Atriplex halimus* L. ont mis en place des mécanismes de défenses suffisants qui entraînent de surproduction de proline.

En revanche, Les résultats obtenus lors du traitement par le Pb, Cr(III) et Cr(VI) à trois concentrations croissantes, semblent indiquer que la proline pourrait intervenir soit comme osmoticum soit par piégeage des ROS. En effet, une légère diminution de la teneur relative en eau accompagnée d'une augmentation de la proline est observée, suggérant un rôle d'osmorégulation de la proline. Par ailleurs, le traitement avec le plomb et le chrome sous ses deux formes Cr(III) et Cr(VI), affecte la teneur relative en eau TRE des feuilles et leur teneur en proline. Cet effet est

compatible avec une fonction de protection des membranes contre l'attaque des radicaux libres, s'accordant avec les observations de **Smirnoff et Cumbes (1989)**, qui suggèrent que la proline réagit avec les radicaux hydroxyles pour générer de l'hydroxyproline non toxique et celles d'**Alia et al. (2001)** et de **Matysik et al. (2002)**, qui montrent un piégeage de l'oxygène singulet par la proline.

IV-4- Effet des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur la variation de la teneur en polyphénols d'*Atriplex halimus* L.

Dans cette partie, l'effet du plomb et du chrome a été étudié en mesurant la teneur en polyphénols (phénols totaux, flavonoïdes et tanins) dans les feuilles et les tiges d'*Atriplex halimus* L. cultivées en présence de différentes concentrations en Pb, Cr(III) et Cr(VI).

IV-4-1- Teneur en phénols totaux

Dans un premier temps, l'effet du plomb et du chrome a été étudié en mesurant la teneur en phénols totaux des parties aériennes (feuilles et tiges) d'*Atriplex halimus* L. cultivées en présence de différentes concentrations en Pb, Cr(III) et Cr(VI).

IV-4-1-1- Dans les feuilles

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 110, Annexe 46**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P=0$) sur la teneur en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus*.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 111, Annexe 46)**, fait ressortir quatre groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig» avec des teneurs en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus* plus élevées que celles du second groupe B constitué par «Oued'Rhiou», ensuite un troisième groupe C représenté par «Kharouba» et enfin le quatrième groupe D «Béni Saf» qui représente les teneurs en phénols totaux les plus faibles.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 112, Annexe 46**) : Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 11,119 mg EAG/g MS, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(VI) avec une moyenne de 10,914 mg EAG/g MS et enfin le groupe C représenté par le Cr(III) avec une moyenne la plus faible de 9,613 mg EAG/g MS.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 113, Annexe 46**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Un groupe A constitué par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 11,32 mg EAG/g MS, le deuxième groupe B par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 11,083 mg EAG/g MS ensuite le 3^{ème} groupe C par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 10,001 mg EAG/g MS et enfin le 4^{ème} groupe D par le Témoin avec une moyenne de 9,791 mg EAG/g MS.

Tableau 33. Teneurs moyennes en phénols totaux (en mg EAG/g MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	9,729 ^F ±0,084	9,828 ^F ±0,172	10,481 ^F ±0,206	9,124 ^F ±0,137
Pb	1000	8,336 ^E ±0,122	11,114 ^E ±0,088	11,587 ^E ±0,179	9,531 ^E ±0,114
	4000	13,059 ^A ±0,120	12,970 ^A ±0,130	13,323 ^A ±0,117	13,129 ^A ±0,110
	8000	11,240 ^C ±0,092	11,257 ^C ±0,114	11,609 ^C ±0,178	11,584 ^C ±0,102
Cr(III)	250	9,083 ^H ±0,125	8,018 ^H ±0,089	10,030 ^H ±0,224	9,074 ^H ±0,074
	500	9,458 ^G ±0,118	9,036 ^G ±0,076	9,107 ^G ±0,153	9,904 ^G ±0,125
	750	10,412 ^E ±0,163	10,036 ^E ±0,162	11,609 ^E ±0,178	11,446 ^E ±0,150
Cr(VI)	50	11,482 ^D ±0,165	11,373 ^D ±0,136	9,701 ^D ±0,166	10,678 ^D ±0,214
	100	10,130 ^C ±0,243	12,422 ^C ±0,362	11,779 ^C ±0,141	11,527 ^C ±0,125
	150	12,385 ^B ±0,160	8,326 ^B ±0,156	12,892 ^B ±0,163	12,762 ^B ±0,232

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Tableau 33**).

Les teneurs moyennes en phénols totaux dans les feuilles des plantes d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement plus élevées chez les provenances «Sig et Oued'Rhiou» que celles signalées chez les provenances «Kharouba et Béni Saf». Par ailleurs, En présence du Pb, les quatre provenances présentent des teneurs en phénols totaux dans les feuilles plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(III) et Cr(VI).

IV-4-1-2- Dans les tiges

Les résultats de l'analyse de variance de la teneur en phénols totaux dans les tiges d'*Atriplex halimus* (**Tableau 114, Annexe 47**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P=0$) sur ce paramètre.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** (**Tableau 115, Annexe 47**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig» avec des teneurs en phénols totaux dans les tiges d'*Atriplex halimus* plus élevées que le second groupe B constitué par «Oued'Rhiou», ensuite un troisième groupe C par «Kharouba» et enfin le quatrième groupe D «Béni Saf» qui représente les teneurs en phénols totaux les plus faibles.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 116, Annexe 47**) : Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 4,556 mg EAG/g MS, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(III) avec une moyenne de 3,554 mg EAG/g MS et enfin le groupe C représenté par le Cr(VI) avec une moyenne la plus faible de 3,256 mg EAG/g MS.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 117, Annexe 47**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 5,013 mg EAG/g MS, le deuxième groupe B par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 4,51 mg EAG/g MS ensuite le 3^{ème} groupe C par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 3,184 mg EAG/g MS et enfin le 4^{ème} groupe D par le Témoin avec une moyenne de 2,448 mg EAG/g MS.

Tableau 34. Teneurs moyennes en phénols totaux (en mg EAG/g MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	2,726 ^H \pm 0,128	2,201 ^H \pm 0,085	2,427 ^H \pm 0,141	2,438 ^H \pm 0,121
Pb	1000	3,114 ^E \pm 0,171	3,205 ^E \pm 0,082	3,528 ^E \pm 0,120	5,285 ^E \pm 0,059
	4000	7,153 ^B \pm 0,076	4,981 ^B \pm 0,079	5,303 ^B \pm 0,058	3,389 ^B \pm 0,064
	8000	5,229 ^A \pm 0,080	7,002 ^A \pm 0,124	7,504 ^A \pm 0,102	7,417 ^A \pm 0,072
Cr(III)	250	3,487 ^G \pm 0,137	3,123 ^G \pm 0,133	3,702 ^G \pm 0,099	2,902 ^G \pm 0,159
	500	4,926 ^C \pm 0,135	4,755 ^C \pm 0,119	5,111 ^C \pm 0,083	5,013 ^C \pm 0,063
	750	2,318 ^F \pm 0,063	5,059 ^F \pm 0,091	3,003 ^F \pm 0,072	3,671 ^F \pm 0,131
Cr(VI)	50	2,525 ^H \pm 0,165	2,576 ^H \pm 0,073	2,452 ^H \pm 0,067	2,311 ^H \pm 0,075
	100	3,518 ^G \pm 0,081	2,319 ^G \pm 0,122	3,896 ^G \pm 0,136	3,750 ^G \pm 0,071
	150	5,112 ^D \pm 0,179	3,313 ^D \pm 0,120	5,218 ^D \pm 0,080	5,306 ^D \pm 0,065

Comparativement aux plantes non stressées, Les résultats des **tableaux 33** et **34** montrent que la teneur en phénols totaux dans les feuilles et les tiges d'*Atriplex halimus* est plus élevée chez les plantes traitées au plomb que chez les plantes témoins et celles traitées au Cr(III) et Cr(VI), chez la plus part des provenances testées. On remarque que la teneur en phénols totaux augmente au fur et mesure que l'application des métaux lourds augmente. Il faut noter également que le traitement avec le plomb présente le taux le plus élevé des phénols totaux dans les parties aériennes des plantes d'*Atriplex halimus* qui appartiennent à la provenance «Sig» : les feuilles à la dose 4000 ppm (**Tableau 33**) et les tiges à la dose 8000 ppm (**Tableau 34**) avec une valeur respectivement : 13,323 mg EAG/g MS et 7,504 mg EAG/g MS.

Dans le règne végétal, plusieurs stratégies sont observées pour faire face à un sol contaminé en métaux lourds (**Briat et Lebrun, 1999**). Comme pour les autres stress, la sensibilité des plantes aux métaux lourds varie beaucoup selon les espèces (**Hopkin, 2003**). Par ailleurs, les espèces halophiles appartenant au genre *Atriplex* ont été recommandées pour l'assainissement des anciennes zones minières et des sites industrielles (**Salo et al., 1996**). Les stress abiotiques se traduisent par des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui affectent négativement la croissance de la plante et sa productivité (**Ben Naceur et al., 2001 ; Wang et al., 2001**). Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude est de tester l'effet du stress métallique sur les antioxydants des plantes d'*Atriplex halimus*.

Les polyphénols sont un groupe de métabolites secondaires caractérisés par la présence d'au moins un noyau aromatique (six atomes de carbone liés en un hexagone) possédant un ou plusieurs groupes hydroxyles, substitués ou non ; en font partie les flavonoïdes, les tanins, les dérivés phénylpropanoïdes tels que les lignanes, les esters et amides hydroxycinamiques, les stilbènes, les coumarines, les acides hydroxybenzoïques, les xanthones et de nouveaux composés sont identifiés continuellement (**Marouf et Reynaud, 2007**). En tant qu'antioxydant tous les polyphénols sont capables de piéger les radicaux libres générés en permanence par l'organisme végétal (**Dixon et Paiva, 1995**), pour le maintien de la structure cellulaire et sa protection (**Bidel et al., 2010**), face aux stress biotique et abiotique (**Dixon et Paiva, 1995**). Ces métabolites se trouvent en grande quantité dans les différentes parties de la plante sous l'effet des différents stress (**Smirnoff, 2005**). L'accumulation de polyphénols au niveau des plantes exposées directement aux différents stress est expliquée par la stimulation de la production de la polyphénol-oxydase qui est une enzyme clé de la voie métabolique conduisant à la formation des polyphénols (**Levent-Tuna et al., 2008**).

Les concentrations croissantes des métaux lourds Pb, Cr(III) et Cr(VI) ont augmenté la teneur en phénols totaux. Les tests statistiques affirment l'effet de ces métaux suite à la haute signification trouvée. Une hausse en phénols totaux suite à l'augmentation de la concentration de chaque métal est signalée chez les plantes d'*Atriplex halimus* des quatre provenances testées, Cette augmentation est corrélée positivement avec les concentrations (1000, 4000 et 8000 ppm) de Pb, (250, 500 et 750 ppm) de Cr(III) et (50, 100 et 150 ppm) de Cr(VI), ceci a été confirmé par les études précédentes de **Muthukumarasamy et al. (2000)**, sur la tolérance de plusieurs plantes face au stress salin. Chez l'orge (**Ali et al., 2008**), les feuilles de *Cakile maritima*, et le piment rouge (**Navarro et al., 2006 ; Ksouri et al., 2007**), l'artichaut (**Hanen et al., 2008 ; Rezazadeh et al., 2012**), *Anethum graveolens* L. (**Mehr et al., 2012**), *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash (**Mane et al., 2011**) et *Salvia miltiorrhiz* (**Dong et al., 2010**).

En effet, la diminution de la sensibilité acquise suite au traitement avec les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) peut être la conséquence d'une accumulation plus importante des phénols totaux. Cette observation était bien décrite aussi par **Charles et al. (2008)**, où ils ont bien mis en évidence que le stress aux UV-C induisent l'accumulation des composés phénoliques, ce qui entraîne la formation d'une barrière biochimique formée par des lignines et des subérines empêchant alors la propagation du champignon, *Botrytis cinerea*. L'état de stress oxydatif est aussi diagnostiqué chez les feuilles des laitues romaines en réponse aux deux champignons *Botrytis cinerea* et *Sclerotinia minor*. Il est ainsi bien mis en évidence que le stress est atténué, qui semblent protéger les systèmes membranaires contre la peroxydation lipidique.

Selon nos résultats, le stress métallique des plantes d'*Atriplex halimus* par le Pb, Cr(III) et le Cr(VI) a un effet sur les phénols totaux en augmentant la teneur en phénols totaux. Chez les plantes la synthèse et l'accumulation des métabolites secondaires tels les phénols totaux est généralement une réponse aux stress abiotiques (Naczki et Shahidi, 2004 ; Chanwitheesuk *et al.*, 2005), tels que la salinité (Navarro *et al.*, 2006) et les métaux lourds (Briat et Lebrun, 1999), qui peuvent induire le déclenchement de stress oxydatif, en effet les polyphénols participent à la défense contre les ROS (espèces réactives à l'oxygène) qui sont produites lors du métabolisme photosynthétique établie sous les stress environnementaux (Sreenivasulu *et al.*, 2000). La tolérance au stress semble réagir par une augmentation de la capacité antioxydante pour désintoxiquer les ROS (Zhu et Scandalio, 1994 ; Noctor et Foyer, 1998). Singh *et al.* (2004), a trouvé que les génotypes tolérants de pois chiche (*Cicer arietinum*) ont une teneur élevée en phénols totaux phénols totaux. Selon Duh (1999), une corrélation entre la teneur en phénols et l'activité antioxydante a été observée, puisque les teneurs phénoliques contribuent directement dans l'activité antioxydante.

IV-4-2- Teneur en flavonoïdes

L'effet du plomb et du chrome a été étudié en mesurant la teneur en flavonoïdes des parties aériennes (feuilles et tiges) d'*Atriplex halimus* L., cultivées en présence de différentes concentrations en Pb, Cr(III) et Cr(VI), est présenté dans les **tableaux 35 et 36**.

IV-4-2-1- Dans les feuilles

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 118, Annexe 48**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P=0$) sur la teneur en flavonoïdes chez les feuilles d'*Atriplex halimus*.

En comparant les moyennes du facteur "Provenance", le test **NEWMAN-KEULS** au seuil de 5 % (**Tableau 119, Annexe 48**), fait ressortir deux groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig, Oued'Rhiou et Kharouba» avec une moyenne respectivement de : 5,019, 4,969 et 4,968 mg EC/g MS. et le second groupe homogène B constitué par «Béni Saf», qui représente des teneurs en flavonoïdes dans les feuilles d'*Atriplex halimus* les plus faibles avec une moyenne de 4,821 mg EC/g MS.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître deux groupes homogènes (**Tableau 120, Annexe 48**) : Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 5,593 mg EC/g MS, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(III) et le Cr(VI) avec une moyenne respectivement de : 4,623 et 4,617 mg EC/g MS.

En ce qui concerne le facteur "Concentration" trois groupes homogènes apparaissent (**Tableau 121, Annexe 48**) : Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 5,816 mg EC/g MS, le deuxième groupe B par les concentrations : (4000 et 1000 ppm) de Pb, (500 et 250 ppm) de Cr(III) et (150 et 50 ppm) de Cr(VI) avec une moyenne respectivement de : 4,781 et 4,732 mg EC/g MS. Enfin le 3^{ème} groupe C représenté par le Témoin avec des teneurs en flavonoïdes les plus faibles avec une moyenne de 4,448 mg EC/g MS.

Tableau 35. Teneurs moyennes en flavonoïdes (en mg EC/g MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	4,720 ^F ±0,096	4,285 ^F ±0,067	4,376 ^F ±0,150	4,411 ^F ±0,086
Pb	1000	5,321 ^C ±0,214	4,486 ^C ±0,127	4,587 ^C ±0,088	5,703 ^C ±0,290
	4000	5,117 ^B ±0,185	5,135 ^B ±0,196	5,684 ^B ±0,207	5,305 ^B ±0,102
	8000	7,382 ^A ±0,319	7,414 ^A ±0,086	7,844 ^A ±0,242	7,718 ^A ±0,182
Cr(III)	250	4,241 ^E ±0,110	4,714 ^E ±0,199	4,691 ^E ±0,136	4,642 ^E ±0,113
	500	4,302 ^F ±0,117	4,103 ^F ±0,036	5,215 ^F ±0,097	4,581 ^F ±0,120
	750	4,705 ^D ±0,081	5,092 ^D ±0,223	4,516 ^D ±0,182	5,374 ^D ±0,164
Cr(VI)	50	4,879 ^F ±0,177	4,096 ^F ±0,070	4,746 ^F ±0,275	4,218 ^F ±0,112
	100	4,196 ^F ±0,077	5,193 ^F ±0,024	4,418 ^F ±0,135	4,129 ^F ±0,023
	150	5,316 ^C ±0,130	4,765 ^C ±0,092	5,401 ^C ±0,128	4,724 ^C ±0,125

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en flavonoïdes dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Tableau 35**).

Les teneurs moyennes en flavonoïdes dans les feuilles des plantes d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement moins élevées chez la provenance «Béni Saf» que celles signalées chez «Sig et Oued'Rhiou et Kharouba».

Par ailleurs, En présence du Pb, les quatre provenances présentent des teneurs en flavonoïdes dans les feuilles plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(III) et Cr(VI) (**Tableau 35**).

IV-4-2-2- Dans les tiges

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 122, Annexe 49**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P=0$) sur la teneur en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus*.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 123, Annexe 49)**, fait ressortir trois groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig» avec des teneurs en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus* (0,921 mg EC/g MS) plus élevées que celles du second groupe AB constitué par «Béni Saf» avec (0,897 mg EC/g MS), ensuite un troisième groupe B représenté par «Oued'Rhiou et Kharouba» qui représente les teneurs en flavonoïdes les plus faibles avec une moyenne respectivement : 0,864 et 0,858 mg EC/g MS.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître deux groupes homogènes (**Tableau 124, Annexe 49**) : Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 1,001 mg EC/g MS, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(VI) et le Cr(III) avec une moyenne respectivement : 0,827 et 0,826 mg EC /g MS.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 125, Annexe 49**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,931 mg EC/g MS, le deuxième groupe AB par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,902 mg EC/g MS ensuite le 3^{ème} groupe B par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 0,889 mg EC/g MS et enfin le 4^{ème} groupe C par le Témoin avec une moyenne de 0,817 mg EC/g MS.

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Tableau 36**).

Les teneurs moyennes en flavonoïdes dans les tiges des plantes d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement plus élevées chez les provenances «Sig et Béni Saf» que celles signalées chez les provenances «Kharouba et Oued'Rhiou». Par ailleurs, En présence du Pb, les quatre provenances présentent des teneurs en flavonoïdes dans les tiges plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(III) et Cr(VI) (**Tableau 36**).

Tableau 36. Teneurs moyennes en flavonoïdes (en mg EC/g MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	0,804 ^{CD} \pm 0,060	0,808 ^{CD} \pm 0,052	0,911 ^{CD} \pm 0,148	0,745 ^{CD} \pm 0,059
Pb	1000	0,951 ^A \pm 0,070	0,901 ^A \pm 0,086	1,330 ^A \pm 0,121	1,282 ^A \pm 0,084
	4000	1,123 ^B \pm 0,091	1,093 ^B \pm 0,112	0,822 ^B \pm 0,046	0,877 ^B \pm 0,156
	8000	0,846 ^A \pm 0,135	1,554 ^A \pm 0,137	0,941 ^A \pm 0,133	1,034 ^A \pm 0,031
Cr(III)	250	0,842 ^D \pm 0,102	0,695 ^D \pm 0,066	0,867 ^D \pm 0,056	0,712 ^D \pm 0,041
	500	0,812 ^{CD} \pm 0,101	0,821 ^C \pm 0,087	0,808 ^{CD} \pm 0,093	0,838 ^{CD} \pm 0,050
	750	0,878 ^C \pm 0,118	0,818 ^C \pm 0,061	1,015 ^C \pm 0,101	0,847 ^C \pm 0,055
Cr(VI)	50	0,857 ^{CD} \pm 0,115	0,787 ^{CD} \pm 0,074	0,812 ^{CD} \pm 0,059	0,784 ^{CD} \pm 0,086
	100	0,863 ^C \pm 0,077	0,834 ^C \pm 0,100	0,898 ^C \pm 0,087	0,882 ^C \pm 0,071
	150	0,715 ^{CD} \pm 0,076	0,831 ^{CD} \pm 0,047	0,823 ^{CD} \pm 0,077	0,877 ^{CD} \pm 0,070

Comparativement aux plantes non stressées, Les résultats des **tableaux 35** et **36** montrent que le taux des flavonoïdes dans les feuilles et les tiges d'*Atriplex halimus* est plus élevé chez les plantes traitées au plomb que chez les plantes témoins et celles stressées par les trois différentes concentrations de Cr(III) et de Cr(VI) chez la plus part des provenances testées. On remarque que le taux des flavonoïdes augmente au fur et mesure que l'application des métaux lourds augmente. Des études faites par **Ali et al., (2008)**, ont confirmé que la réponse des plantules face à ce stress varie donc d'une concentration à une autre. Le traitement des racines de *Ginseng Pnanax* par le cuivre à 3000 ppm augmente le taux des polyphénols et de flavonoïdes à 26 % et 83 %, respectivement, comparativement au témoin.

Cependant, pour les concentrations de 500 ppm de Cr(III) et de 100 ppm et 150 ppm de Cr(VI), une diminution du taux de flavonoïdes est observée au niveau des provenances «Kharouba, Béni Saf et Sig» ; ceci pourrait être expliqué soit par la résistance des plantules à ces concentrations (**Isabel et al., 2007**), soit par les troubles de l'activité enzymatique à cause du stress métallique accentué, qui diminue la photosynthèse et par la suite la synthèse des flavonoïdes (**Wong et al., 2006**).

Il faut noter également que le traitement avec le plomb présent le taux le plus élevé des flavonoïdes dans les parties aériennes des plantes d'*Atriplex halimus* : les feuilles qui appartiennent à la provenance «Sig» à la dose 8000 ppm (**Tableau 35**) et les tiges qui appartiennent à la provenance «Béni Saf» à la même dose avec une valeur respectivement : 7,844 mg EC/g MS et 1,554 mg EC/g MS (**Tableau 36**).

Les flavonoïdes sont des glycosides localisés dans la vacuole (**Nijveldt et al., 2001**), ils sont parmi les métabolites secondaires les plus actifs chez les plantes, ils ne sont pas essentiels à la survie de la plante, mais ils sont bioactifs (**Treutter, 2006 ; Sailaja et Sujatha, 2013**), ils affichent aussi une activité anti-oxydante (**Nijveldt et al., 2001**) et influencent le transport des hormones de la plante surtout l'auxine ainsi que leur activité anti-oxydante. Il était trouvé qu'il y a une augmentation considérable dans les niveaux des flavonoïdes lors de stress abiotique, celles qui sont dérivé de la voie biosynthétique phénylpropanoïdes sont reconnus d'être responsive au stress (**Treutter, 2006 ; Sailaja et Sujatha, 2013**).

Selon nos résultats, le stress métallique des plantes d'*Atriplex halimus* par le Pb, Cr(III) et le Cr(VI) a un effet sur les parties aériennes (feuilles et tiges) d'*Atriplex halimus* L. en augmentant la teneur flavonoïdes, Ces résultats sont en accord avec ceux obtenu par **Bendkhil et Denden (2012)**, qui ont travaillé sur la teneur en anthocyanines (un groupe des flavonoïdes) chez le gombo ; qui montrent que les anthocyanines augmentent sous l'effet du stress abiotique, tels que la salinité (**Rezazadeh et al., 2012**), et les métaux lourds (**Valko et al., 2006**), ce qui a été confirmé par les études de **Sgherri et al. (2007)**, qui ont constaté une forte teneur en flavonoïdes au niveau des plantules de *Vicia faba* soumises à un stress aux métaux lourds, comparés au témoin. **Morris (1995)**, montrent que les flavonoïdes sont de bons chélateurs de métaux lourds.

La bibliographie suggère l'implication du stress oxydatif dans la toxicité des métaux lourds (**Stohs et Bagchi, 1995 ; Ercal et al., 2001 ; Galaris et Evangelou, 2002 ; Valko et al., 2006**). La contamination aux métaux lourds est un excellent moyen pour l'examen de la machinerie antioxydative responsable de l'adaptation physiologique de la majorité des espèces végétales (**Valko et al., 2006**). En effet, les composés phénoliques et plus particulièrement les flavonoïdes sont reconnus comme des substances potentiellement antioxydantes ayant la capacité de piéger les espèces radicalaires et les formes réactives de l'oxygène (**Javanovic et al., 1994**).

La plupart des stress liés à l'environnement, produisent dans la plante un choc oxydatif qui va se traduire par la production de radicaux libres et de formes activées de l'oxygène (**Parent et al., 2008**), telles que le peroxyde d'oxygène (H_2O_2), les radicaux superoxydes (O_2^-) et hydroxyl (OH), sont produites au cours des processus cellulaires aérobies et de façon plus accrue suite aux stress abiotiques (**Foyer et Noctor, 2000 ; Hernández et al., 2000 ; Apel et Hirt, 2004 ; Tausz et al.,**

2004 ; Logan, 2005 ; Brosché *et al.*, 2010). Ces composés, lorsqu'ils sont accumulés en faible quantité, peuvent servir de signal pour induire l'expression de gènes de réponse et de défense cellulaires (Parent *et al.*, 2008). La production excessive de ces composés provoque des dégâts oxydatifs, et ils deviennent toxiques pour la cellule (Mahajan *et al.*, 2008). Ces molécules actives dégradent les lipides membranaires et sont responsables de dégâts irréversibles dans la plante (Parent *et al.*, 2008). Le radical hydroxyl, par exemple, risque d'endommager les structures chlorophylliennes, protéiques, nucléiques et lipidiques, et par conséquent entraver le métabolisme cellulaire, la physiologie de la plante et finalement la croissance et le rendement (Frankel, 1984 ; Imlay et Linn, 1986). Par conséquent, la plante doit constamment déployer ses mécanismes de défense pour pallier ces dommages. De ce fait, et afin d'éliminer ces formes actives d'oxygène, les plantes possèdent des antioxydants, tels que les composés phénoliques et les flavonoïdes (Ashraf, 2008).

IV-4-3- Teneur en tanins

L'effet du plomb et du chrome a été étudié en mesurant la teneur en tanins des parties aériennes (feuilles et tiges) d'*Atriplex halimus* L., cultivées en présence de différentes concentrations en Pb, Cr(III) et Cr(VI), est présenté dans les **tableaux 37 et 38**.

IV-4-3-1- Dans les feuilles

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 126, Annexe 50**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P=0$) sur la teneur en tanins chez les feuilles l'*Atriplex halimus*. Seul l'interaction "Provenance-Métal" qui n'a pas une influence significative ($P=0,022$) sur ce paramètre.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** (**Tableau 127, Annexe 50**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig» avec des teneurs en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus* (9,688 mg EC/g MS) plus élevées que celles du second groupe B constitué par «Oued'Rhiou» avec (9,61 mg EC/g MS), ensuite un troisième groupe C représenté par «Kharouba» avec une moyenne de 9,515 mg EC/g MS et enfin le quatrième groupe homogène D «Béni Saf» qui représente les teneurs en tanins les plus faibles avec une moyenne de 9,236 mg EC/g MS.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 128, Annexe 50**) : Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 9,987 mg EC/g MS, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(VI) avec

une moyenne de 9,499 mg EC/g MS et enfin le groupe C représenté par le Cr(III) avec une moyenne la plus faible de 9,051 mg EC/g MS.

Tableau 37. Teneurs moyennes en tanins (en mg EC/g MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	9,113 ^H \pm 0,060	8,785 ^H \pm 0,107	9,434 ^H \pm 0,076	9,216 ^H \pm 0,083
Pb	1000	9,018 ^F \pm 0,110	9,085 ^F \pm 0,079	10,417 ^F \pm 0,034	9,125 ^F \pm 0,030
	4000	10,330 ^B \pm 0,091	10,918 ^B \pm 0,125	9,213 ^B \pm 0,090	10,342 ^B \pm 0,076
	8000	11,519 ^A \pm 0,186	10,114 ^A \pm 0,031	11,622 ^A \pm 0,104	11,537 ^A \pm 0,112
Cr(III)	250	8,878 ^I \pm 0,107	8,516 ^I \pm 0,118	9,105 ^I \pm 0,035	9,105 ^I \pm 0,024
	500	8,868 ^I \pm 0,097	8,509 ^I \pm 0,137	9,328 ^I \pm 0,068	9,036 ^I \pm 0,096
	750	9,316 ^G \pm 0,099	9,107 ^G \pm 0,068	9,083 ^G \pm 0,064	9,416 ^G \pm 0,051
Cr(VI)	50	9,114 ^E \pm 0,155	10,126 ^E \pm 0,076	9,129 ^E \pm 0,057	9,614 ^E \pm 0,139
	100	9,585 ^D \pm 0,189	8,873 ^D \pm 0,116	9,653 ^D \pm 0,124	10,282 ^D \pm 0,043
	150	10,209 ^C \pm 0,153	9,231 ^C \pm 0,094	10,396 ^C \pm 0,065	9,217 ^C \pm 0,047

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 129, Annexe 50**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Un groupe A constitué par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI), le deuxième groupe B par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI) ensuite le 3^{ème} groupe C par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) et enfin le 4^{ème} groupe D par le Témoin qui représente les teneurs les plus faibles en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus*.

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Tableau 37**).

Les teneurs moyennes en tanins dans les feuilles des plantes d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement plus élevées chez les provenances «Sig et Oued'Rhiou» que celles signalées chez les provenances «Kharouba et Béni Saf». Par ailleurs, En présence du Pb, les quatre provenances présentent des teneurs en tanins dans les feuilles plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(III) et Cr(VI) (**Tableau 37**).

IV-4-3-2- Dans les tiges

Les résultats de l'analyse de variance (**Tableau 130, Annexe 51**), permettent de conclure que les effets des facteurs "Provenance", "Métal" et "Concentration" et les effets d'interaction bifactorielle "Provenance-Métal", "Provenance-Concentration" et "Métal-Concentration" ainsi que l'interaction trifactorielle "Provenance-Métal-Concentration" influent de manière hautement significative avec ($P=0$) sur la teneur en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus*.

La comparaison des moyennes du facteur "Provenance", selon le test de **NEWMAN-KEULS à 5 % (Tableau 131, Annexe 51)**, fait ressortir quatre groupes homogènes : Le groupe A représenté par «Sig» avec des teneurs en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus* (1,301 mg EC/g MS) plus élevées que celles du second groupe B constitué par «Kharouba» avec une moyenne de 1,279 mg EC/g MS, ensuite un troisième groupe C représenté par «Oued'Rhiou» avec une moyenne de 1,267 mg EC/g MS et enfin le quatrième groupe D «Béni Saf» qui représente les teneurs en tanins les plus faibles de 1,207 mg EC/g MS.

Le test de **NEWMAN-KEULS à 5 %** pour le facteur "Métal" fait apparaître trois groupes homogènes (**Tableau 132, Annexe 51**) :

Groupe A constitué par le plomb avec une moyenne de 1,318 mg EC/g MS, qui est plus élevée que celle du second groupe B représenté par le Cr(III) avec une moyenne de 1,255 mg EC/g MS et enfin le groupe C représenté par le Cr(VI) avec la moyenne la plus faible de 1,219 mg EC/g MS.

La comparaison des moyennes du facteur "Concentration" (**Tableau 133, Annexe 51**), fait ressortir quatre groupes homogènes : Un groupe A constitué par les concentrations : 4000 ppm de Pb, 500 ppm de Cr(III) et 100 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 1,33 mg EC/g MS, le deuxième groupe B par les concentrations : 8000 ppm de Pb, 750 ppm de Cr(III) et 150 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 1,302 mg EC/g MS ensuite le 3^{ème} groupe C par les concentrations : 1000 ppm de Pb, 250 ppm de Cr(III) et 50 ppm de Cr(VI) avec une moyenne de 1,236 mg EC/g MS et enfin le 4^{ème} groupe D par le Témoin avec une moyenne de 1,187 mg EC/g MS.

Par comparaison aux témoins, l'application des métaux provoque une augmentation de la teneur en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus*, Cette augmentation est proportionnelle aux doses des métaux lourds appliquées (**Tableau 38**).

Tableau 38. Teneurs moyennes en tanins (en mg EC/g MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	1,281 ^F \pm 0,024	1,130 ^F \pm 0,018	1,186 ^F \pm 0,016	1,151 ^F \pm 0,008
Pb	1000	1,393 ^D \pm 0,022	1,086 ^D \pm 0,061	1,345 ^D \pm 0,041	1,268 ^D \pm 0,009
	4000	1,521 ^A \pm 0,049	1,422 ^A \pm 0,076	1,419 ^A \pm 0,017	1,309 ^A \pm 0,011
	8000	1,299 ^B \pm 0,045	1,355 ^B \pm 0,053	1,486 ^B \pm 0,014	1,434 ^B \pm 0,031
Cr(III)	250	1,129 ^E \pm 0,008	1,216 ^E \pm 0,020	1,301 ^E \pm 0,011	1,295 ^E \pm 0,019
	500	1,135 ^C \pm 0,015	1,359 ^C \pm 0,047	1,482 ^C \pm 0,024	1,467 ^C \pm 0,034
	750	1,384 ^E \pm 0,039	1,107 ^E \pm 0,013	1,213 ^E \pm 0,020	1,240 ^E \pm 0,008
Cr(VI)	50	1,098 ^F \pm 0,017	1,152 ^F \pm 0,007	1,193 ^F \pm 0,014	1,361 ^F \pm 0,020
	100	1,364 ^F \pm 0,028	1,131 ^F \pm 0,020	1,186 ^F \pm 0,016	1,163 ^F \pm 0,010
	150	1,188 ^D \pm 0,036	1,272 ^D \pm 0,018	1,426 ^D \pm 0,025	1,216 ^D \pm 0,011

Les teneurs moyennes en tanins dans les tiges des plantes d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations des métaux lourds, sont nettement plus élevées chez la provenance «Sig» que celles signalées chez les provenances «Kharouba, Oued'Rhiou et Béni Saf». Par ailleurs, En présence du Pb, les quatre provenances présentent des tanins dans les tiges plus élevées que celles notées chez les plantes témoins et celles traitées par le Cr(III) et Cr(VI) (**Tableau 38**).

Il faut noter également que le traitement avec le plomb présente le taux le plus élevé des tanins dans les parties aériennes des plantes d'*Atriplex halimus* : les feuilles qui appartiennent à la provenance «Sig» à la dose 8000 ppm (**Tableau 37**) et les tiges qui appartiennent à la provenance «Kharouba» à la dose 4000 ppm avec une valeur respectivement : 11,622 mg EC/g MS et 1,521 mg EC/g MS (**Tableau 38**).

Comparativement aux plantes non stressées, Les résultats des **tableaux 37** et **38** montrent que le taux des tanins dans les feuilles et les tiges d'*Atriplex halimus* est plus élevé chez les plantes traitées au plomb que chez les plantes témoins et celles stressées au Cr(III) et au Cr(VI) chez la plus part des provenances testées. On remarque que le taux des tanins augmente au fur et mesure que l'application des métaux lourds augmente. Ces résultats concordent avec ceux de **Ksouri et al. (2007)** ; **Ben Ahmed et al. (2010)**, qui ont démontré qu'il y a une augmentation des teneurs en polyphénols, en flavonoïdes et en tanins chez *Vicia faba* soumises à un stress salin. Les même résultats ont été trouvés par **Elfeel et Bakhawain (2012)**, qui ont reporté que la concentration des

tanins a augmenté avec l'augmentation de la salinité chez *Acacia saligna*. En outre, le stress hydrique induit aussi une augmentation de la teneur en tanins chez plusieurs plantes (**Anuraga et al., 1993**). Cependant, **Vaithyanathan et Singh (1989)**, rapportent que les feuilles de diverses espèces d'arbres ont répondu différemment aux variations du stress abiotique, tels que le stress thermique, par rapport à leur teneur en tanins. Certaines espèces montrent une augmentation de la teneur en tanins en été et d'autres en hiver. **Lees et al. (2002)**, ont observé une augmentation de la teneur en tanins chez le Lotier pédonculé (*Lotus uliginosus*) quand la température est de 30°C comparée à 20°C. En effet, plusieurs travaux ont montré une stimulation de la synthèse de polyphénols surtout chez les espèces tolérantes (**Navaro et al., 2006**).

Par ailleurs, les différences entre les valeurs observées et celles de la littérature, concernant les concentrations en tanins, pourraient résulter de la nature des tests utilisés, de la nature des tanins dosés dans les différentes espèces fourragères, du stade de croissance et, également, de l'influence des facteurs édaphiques et climatiques (**Rubanza et al., 2005**).

Il est bien admis que les contraintes abiotiques, tels que la sécheresse, la salinité, la température élevée l'ensoleillement (**De Abreu et Mazzaferra, 2005**) et les métaux lourds (**Navaro et al., 2006**) sont capables de stimuler la biosynthèse des polyphénols (**De Abreu et Mazzaferra, 2005**). Les tanins obtenus à partir des plantes d'*Atriplex halimus* stressées à différentes concentrations du Pb, Cr(III) et Cr(VI), ont connu une légère augmentation avec une importante accumulation de flavonoïdes chez la plus part des provenances testées. Selon **Tattini et al. (2006)**, les plantes stressées ont une tendance à synthétiser plus de flavonoïdes que les tanins hydrolysables ce qui corrèlent avec nos résultats. Nous avons trouvé que les plantes d'*Atriplex halimus* stressées aux métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) augmentent leurs teneurs en flavonoïdes et en tanins. L'accumulation des tanins pourrait être liée à la capacité des flavonoïdes à servir en tant que substrat pour les peroxydases classe III, qui réduit le peroxyde d'hydrogène dans les vacuoles (**Yamasaki et al., 1997 ; Takahama, 2004**).

Selon la littérature, les composés phénoliques s'avèrent comme de bons chélateurs des ions métalliques (**Morris, 1995 ; Brown et al., 1998**). Il a été rapportés que les agents chélateurs qui forment une liaison de type avec les métaux sont actifs comme antioxydants secondaires car ils réduisent le potentiel redox et stabilisent la forme oxydée de l'ion métallique (**Suresh-Kumar et al., 2008**).

Notre étude montre que le plomb et le chrome (trivalent et hexavalent) favorisent la synthèse des métabolites secondaires (phénols totaux, flavonoïdes et tanins) dans les parties aériennes d'*Atriplex halimus* chez la plus part des provenances testées, et que la synthèse des phénols totaux est plus importantes que celles des flavonoïdes et des tanins.

V- Localisation des métaux lourds dans les tissus des feuilles, tiges et des racines d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI)

Pour répondre au troisième objectif, nous avons analysé des feuilles, des tiges et des racines d'*Atriplex halimus* ayant poussé sur du sol pollué notamment au Pb, Cr(III) et au Cr(VI) en microscopie électronique à balayage afin de localiser les métaux au niveau tissulaire. Grâce à la technique MEB-EDX, on peut sélectionner des particules solides sur le champ étudié et obtenir un spectre qui traduit le profil élémentaire de la particule en question (grâce à l'émission de rayons X).

V-1- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI)

V-1-1- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Pb

Dans cette étude, les observations réalisées par microscopie électronique à balayage sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées à 8000 ppm de Pb (**Figure 29**), montrent la présence des cristaux piégés sur les surfaces des feuilles sans changement notable de l'aspect des feuilles (**Planche 04, Annexe 52**).

En revanche, bien que le taux de recouvrement des feuilles en cristaux semble identique, les observations réalisées sur les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au nitrate de plomb, révèlent la présence de plomb dans ces cristaux. L'observation de la surface des feuilles montre le positionnement des cristaux plus en profondeur dans les tissus, comme montré précédemment par **Uzu et al. (2010)** ; **Schreck et al. (2012)**. Il semblerait que l'épaisseur de la cuticule ne joue pas un rôle sur la quantité de cristaux retenues en surface mais, comme attendu, elle sert de barrière protectrice des tissus et limite le processus de formation de nécroses induit par les particules des métaux tels que le plomb.

La caractérisation des cristaux (**Figure 29.D**) provenant du milieu de culture traité par le nitrate de plomb a été effectuée grâce à la méthode EDX du MEB, qui apportent des informations complémentaires à différentes échelles et pour différents éléments. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 30**. Le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de silice, qui ont une importance primordiale pour le développement et la santé des plantes, accompagnée du calcium, qui est un élément nutritif majeur. Mais la particule semble majoritairement constituée de chlore perçu grâce aux deux pics correspondant aux deux raies de l'élément. On note aussi la présence de Pb, qui présente un pic moyennement élevé, dont l'origine est le traitement des plantes d'*Atriplex halimus* au nitrate de plomb.

Par ailleurs, des précipités riches en Cl, Ca, Si et Pb ont été mis en évidence dans des zones superficielles des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au plomb. Les résultats montrent la capture/l'immobilisation des métaux par la plante. Cependant, les mécanismes d'internalisation n'ont pu être clairement mis en évidence à partir des seules observations de microscopie. Toutefois, même si la majeure partie des particules restent piégées en surface, un travail récent a montré que les métaux contenus dans les particules étaient largement plus bioaccessibles lorsque les particules sont piégées par les feuilles (Xiong *et al.*, 2014). Les résultats semblent mettre en évidence la mise en place de mécanismes de compensation, voire de réparation, au sein des cellules.

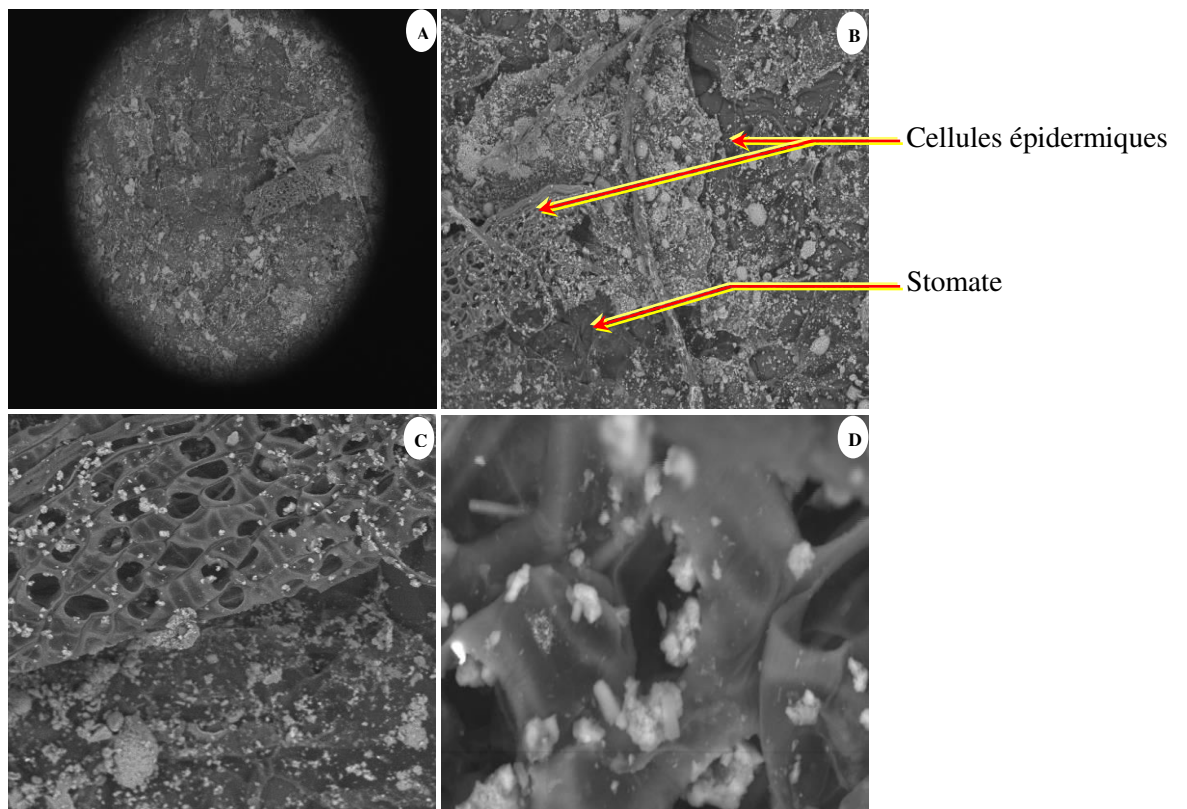


Figure 29. Observation microscopique de la surface d'une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Pb par le MEB (A) : (x100) ; (B) : (x400) ; (C) : (x600) ; (D) : Observation microscopique des cristaux sur la surface d'une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Pb par le MEB (x5000).

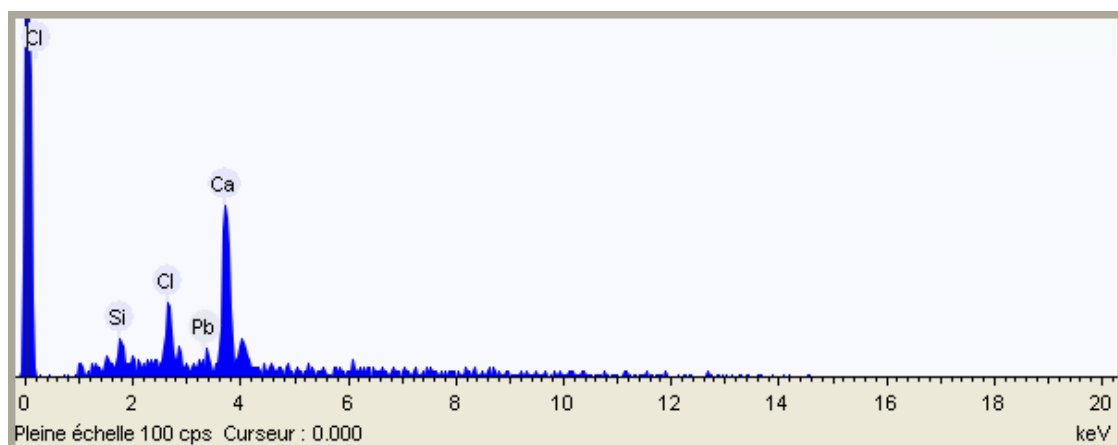


Figure 30. Spectres par EDX des métaux lourds dans une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Pb.

V-1-2- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Cr(III)

Dans cette étude, les observations réalisées par microscopie électronique à balayage sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées à 750 ppm de Cr(III) (**Figure 31**), montrent la présence des cristaux piégés sur les surfaces des feuilles sans changement notable de l'aspect des feuilles (**Planche 08, Annexe 53**).

En revanche, bien que le taux de recouvrement des feuilles en cristaux semble identique, les observations réalisées sur les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(III), révèlent la présence de chrome dans ces cristaux. L'observation de la surface des feuilles montre le positionnement des cristaux plus en profondeur dans les tissus.

La caractérisation des cristaux (**Figure 31.D**) provenant du milieu de culture traité par le chlorure de chrome a été effectuée grâce à la méthode EDX du MEB, qui apportent des informations complémentaires à différentes échelles et pour différents éléments. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 32**. Le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de calcium, on trouve aussi de magnésium, qui sont des éléments nutritifs majeurs. Mais la particule semble majoritairement constituée de chlore perçu grâce aux deux pics correspondant aux deux raies de l'élément. On note aussi la présence de Cr, qui présente un pic anormalement élevé, dont l'origine est le traitement des plantes d'*Atriplex halimus* au chlorure de chrome.

Par ailleurs, des précipités riches en Cl, Ca, Mg et Cr et ont été mis en évidence dans des zones superficielles des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(III). Les résultats montrent la capture/l'immobilisation des métaux par la plante. Cependant, les mécanismes d'internalisation n'ont pu être clairement mis en évidence à partir des seules observations de microscopie. Les résultats semblent mettre en évidence la mise en place de mécanismes de compensation, voire de réparation, au sein des cellules.

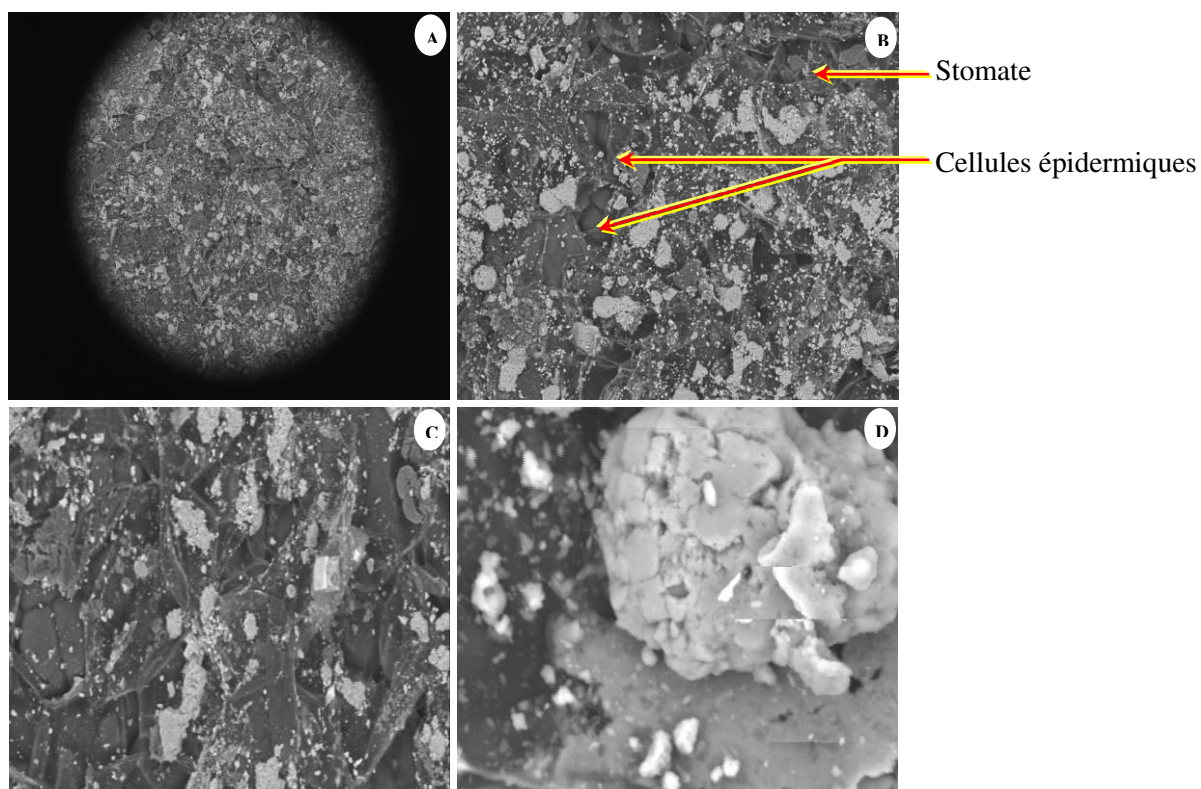


Figure 31. Observation microscopique de la surface d'une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III) par le MEB (A) : (x100); (B) : (x400); (C) : (x700) et (D) : Observation microscopique d'un cristal sur la surface d'une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III) par le MEB (x5000).

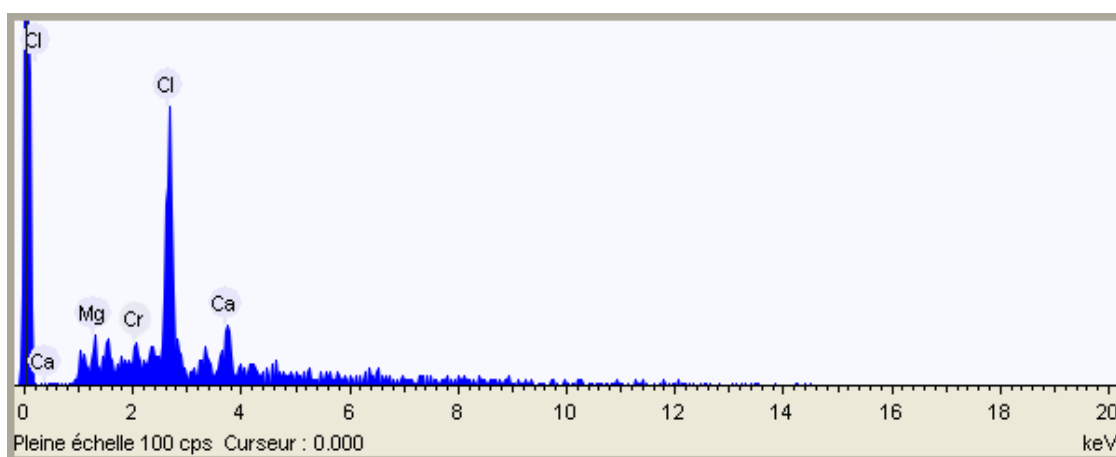


Figure 32. Spectres par EDX des métaux lourds dans une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III).

V-1-3- Localisation des métaux lourds sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Cr(VI)

Dans cette étude, les observations réalisées par microscopie électronique à balayage sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées à 150 ppm de Cr(VI) (**Figure 33**), montrent la présence des cristaux piégés sur les surfaces des feuilles sans changement notable de l'aspect des feuilles (**Planche 12, Annexe 54**).

En revanche, bien que le taux de recouvrement des feuilles en cristaux semble identique, les observations réalisées sur les feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI), révèlent l'absence de chrome dans ces cristaux. L'observation de la surface des feuilles montre le positionnement des cristaux plus en profondeur dans les tissus.

La caractérisation des cristaux (**Figure 33.D**) provenant du milieu de culture traité par le chlorure de chrome a été effectuée grâce à la méthode EDX du MEB, qui apportent des informations complémentaires à différentes échelles et pour différents éléments. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 34**.

Le premier pic du spectre le plus élevé correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de calcium, accompagné de magnésium et du phosphore, qui sont des éléments nutritifs majeurs. Cependant, l'élément le plus abondant est le chlore avec des concentrations importantes. Sur la surface des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au chlorure de potassium, nous ne notons aucune présence de métaux.

Par ailleurs, des précipités riches en Cl, Ca, Mg et en P et ont été mis en évidence dans des zones superficielles des feuilles d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI). Les résultats montrent la capture/l'immobilisation des métaux par la plante. Cependant, les mécanismes d'internalisation n'ont pu être clairement mis en évidence à partir des seules observations de microscopie. Les résultats semblent mettre en évidence la mise en place de mécanismes de compensation, voire de réparation, au sein des cellules.

Les ETM ne s'accumulent pas de manière homogène dans tous les tissus. Au niveau racinaire, les ETM absorbés sont stockés dans les vacuoles mais également acheminés vers les parties aériennes, ce qui génère une concentration assez similaire dans toutes les cellules (**Milner et Kochian, 2008**). Par contre, au niveau des feuilles, qui constituent un stockage final et non pas un organe de transit, il a été observé que les ETM s'accumulent préférentiellement dans les tissus épidermiques et beaucoup moins dans les parenchymes, probablement pour préserver les cellules photosynthétiques. Cette différence de compartimentation a été montrée par exemple chez *Thlaspi caerulescens*, une *Brassicacée* hyperaccumulatrice de zinc chez laquelle le zinc foliaire est en concentration 5 fois plus grande dans les cellules épidermiques que dans les cellules de parenchyme

(Küpper *et al.*, 1999). Plusieurs Brassicacées du genre *Alyssum*, identifiées comme hyperaccumulatrices de nickel, stockent également davantage de métal dans les cellules épidermiques, et plus particulièrement au niveau des trichomes (Broadhurst *et al.*, 2004).

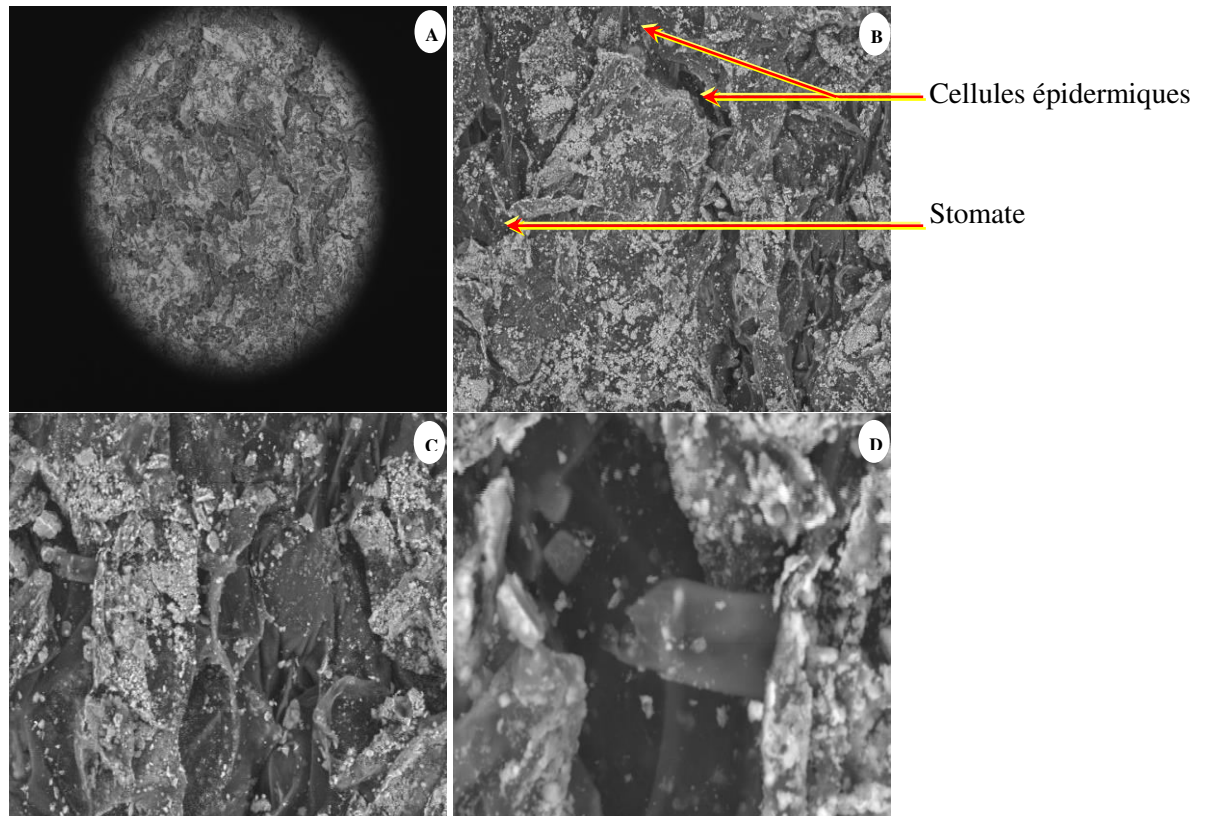


Figure 33. Observation microscopique de la surface d'une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI) par le MEB (A) : (x100) ; (B) : (x400) ; (C) : (x700) et (D) : Observation microscopique des cristaux sur la surface d'une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI) par le MEB (x4000).

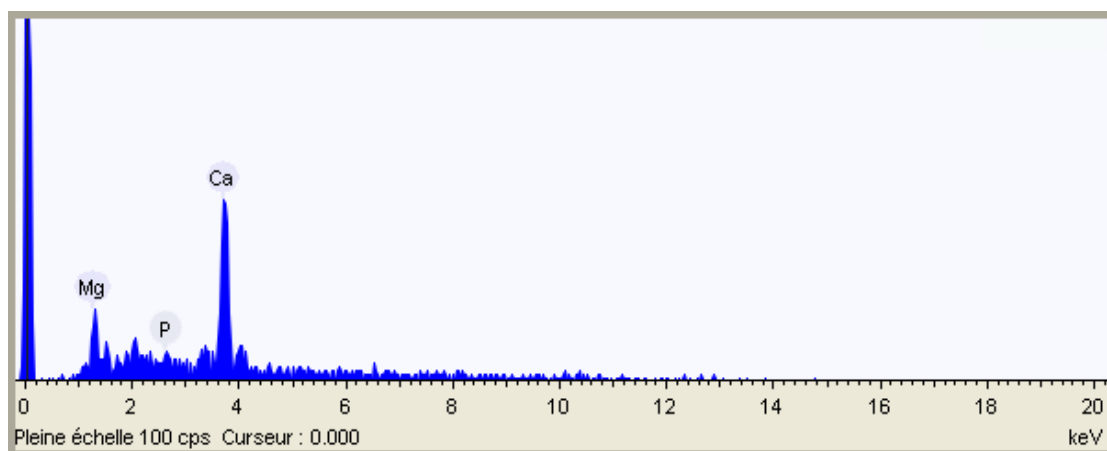


Figure 34. Spectres par EDX des métaux lourds dans une feuille d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI).

V-2- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI)

V-2-1- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Pb

Une étude préliminaire en microscopie électronique à balayage (MEB), en vue de localiser le métal lourd (Pb) sur des coupes transversales de tiges d'*Atriplex halimus* traitées à 8000 ppm de Pb à haute résolution ($\times 400$) (**Figure 35.C**), a été entreprise. La distribution des métaux au niveau des tiges, ont mis en évidence une accumulation du plomb dans le cylindre centrale des tiges. Cette accumulation est visible sous forme de cristaux, qui étaient principalement localisées à l'intérieur du cylindre centrale (Parenchyme médullaire) (**Figure 35**). Pour vérifier cela, on a sélectionné un cristal au niveau du parenchyme médullaire de tige et obtenu leur spectre élémentaire grâce à la méthode EDX du MEB. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 36**.

Le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de calcium, qui sont des éléments nutritifs majeurs. Mais la particule semble majoritairement constituée de chlore perçu grâce aux deux pics correspondant aux deux raies de l'élément. On note aussi la présence de Pb, qui présente un pic moyennement élevé, dont l'origine est le traitement des plantes d'*Atriplex halimus* au nitrate de plomb.

D'autre part, le Pb est présent à l'intérieur de la tige : il est distribué de façon homogène dans la région centrale correspondant aux cylindres vasculaires de la stèle, et localisé ponctuellement sous forme des cristaux dans les parenchymes médullaires.

Ces observations suggèrent que les cellules parenchymateuses à l'intérieur de la zone médullaire centrale des tiges piège une partie de Pb, mais n'empêche pas pour autant le prélèvement et le transfert du Pb à l'intérieur de la tige jusqu'à la feuille.

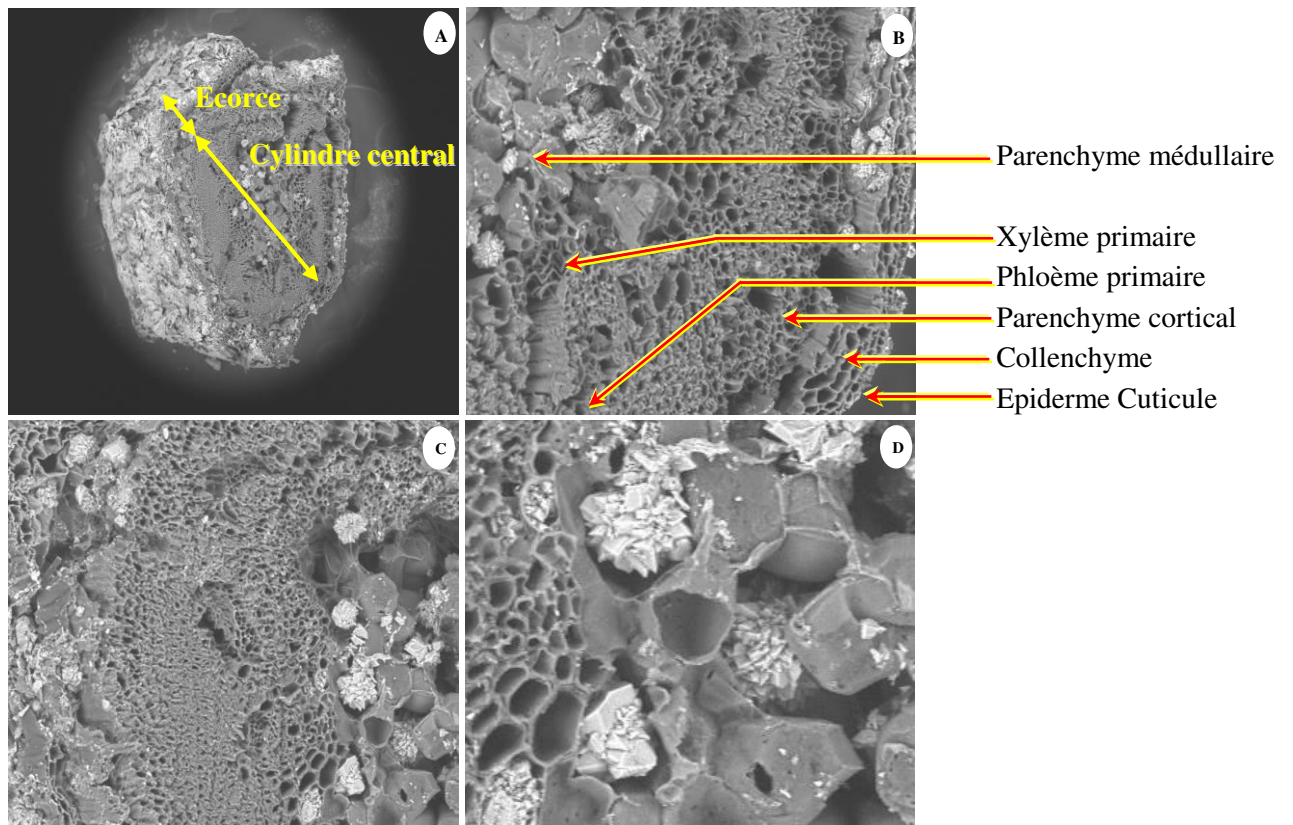


Figure 35. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une tige d'*Atriplex halimus* traitée au Pb par le MEB (A) : (x100); (B) : (x300); (C) : (x400) et (D) : Observation microscopique des cristaux au niveau de tige d'*Atriplex halimus* traitée au Pb par le MEB (x2500).

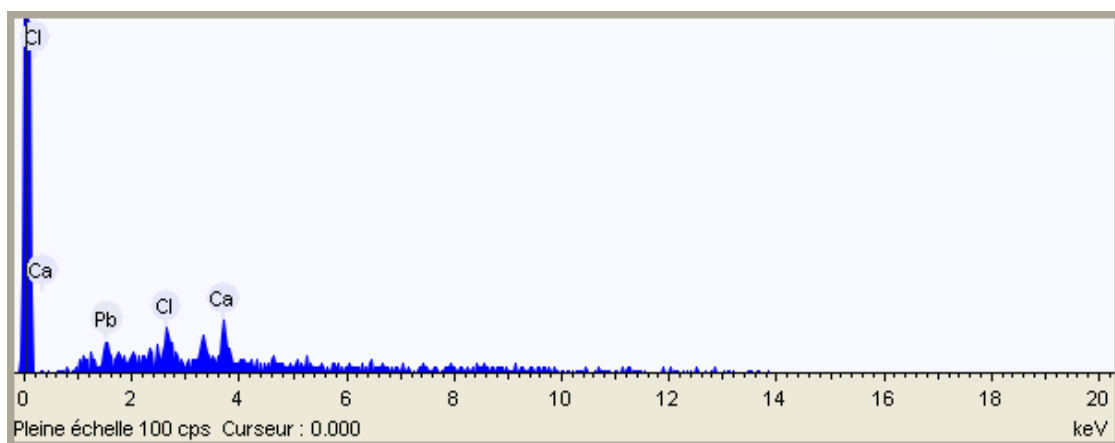


Figure 36. Spectres par EDX des métaux lourds dans une tige d'*Atriplex halimus* traitée au Pb.

V-2-2- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Cr(III)

Une étude préliminaire en microscopie électronique à balayage (MEB), en vue de localiser le métal lourd (Cr) sur des coupes transversales de tiges d'*Atriplex halimus* traitées à 750 ppm de Cr(III) à haute résolution ($\times 700$) (**Figure 37.C**), a été entreprise. La distribution des éléments minéraux au niveau des tiges, ont mis en évidence une accumulation du chlore, calcium et de soufre dans le cylindre centrale des tiges. Cette accumulation est visible sous forme de cristaux, qui étaient principalement localisées à l'intérieur du cylindre centrale (Parenchyme médullaire) (**Figure 37**). Pour vérifier cela, on a sélectionné un cristal au niveau du parenchyme médullaire de tige et obtenu leur spectre élémentaire grâce à la méthode EDX du MEB. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 38**.

Le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de calcium, accompagné de soufre, qui sont des éléments nutritifs majeurs. Cependant, l'élément le plus abondant est le chlore avec des concentrations importantes. Chez les tiges d'*Atriplex halimus* traitées au chlorure de chrome, nous ne notons aucune présence de métaux.

L'exposition des plantes d'*Atriplex halimus* au Cr(III) peut modifier leur aspect tissulaire. Le parenchyme médullaire est considéré comme réserve qui permet de stocker les glucides, les lipides et les protéines, le stress effectué peut détruire ou déformer les parois de ces cellules (**Dugé de Bernoville, 2009**). En effet, au niveau des tiges d'*Atriplex halimus* traitées à 750 ppm de Cr(III), nous avons remarqué qu'il y a une déformation des parois cellulaires du parenchyme médullaire. Ceci pourrait s'expliquer par la peroxydation des lipides membranaires par les ERO provoqué par l'excès de chrome.

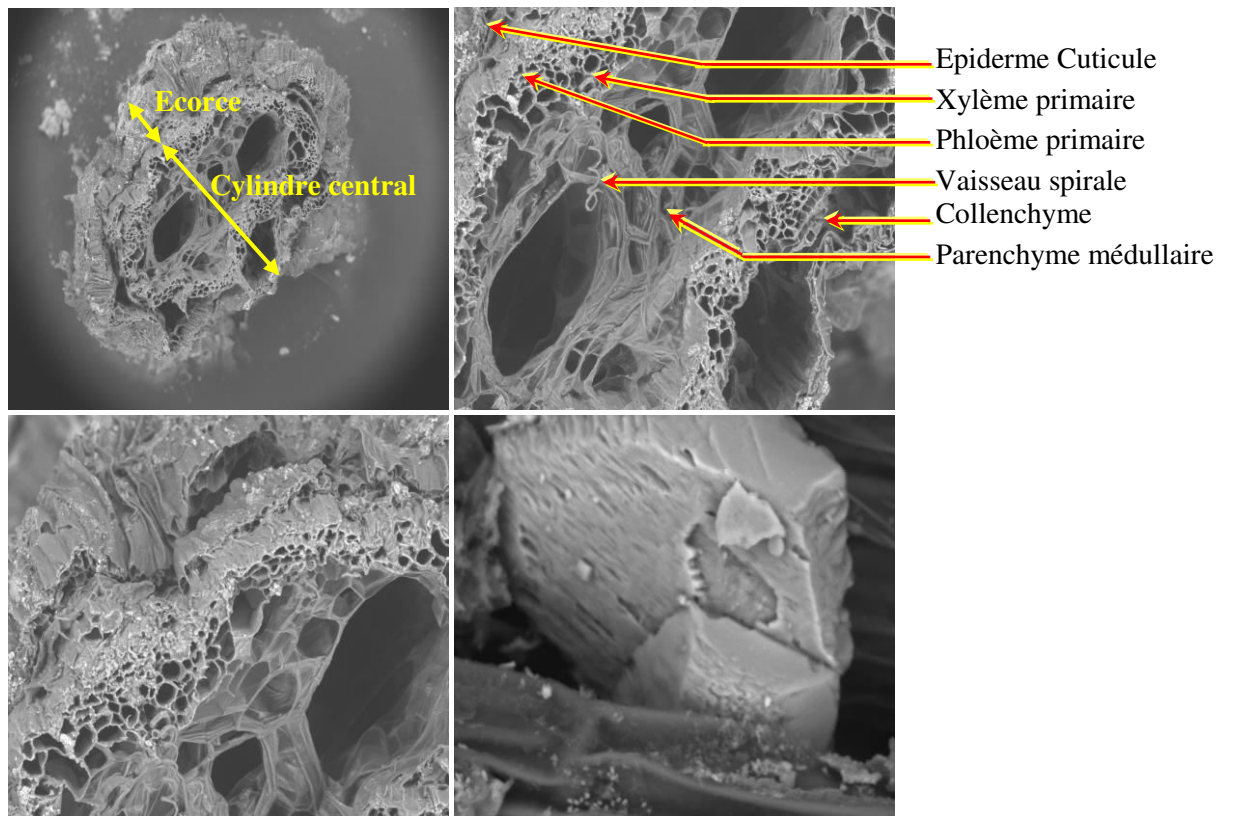


Figure 37. Observation microscopique d'une coupe longitudinale d'une tige d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III) par le MEB (A) : (x400) ; (B) : (x500) ; (C) : (x700) et (D) : Observation microscopique d'un cristal au niveau de tige d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III) par le MEB (x3000).

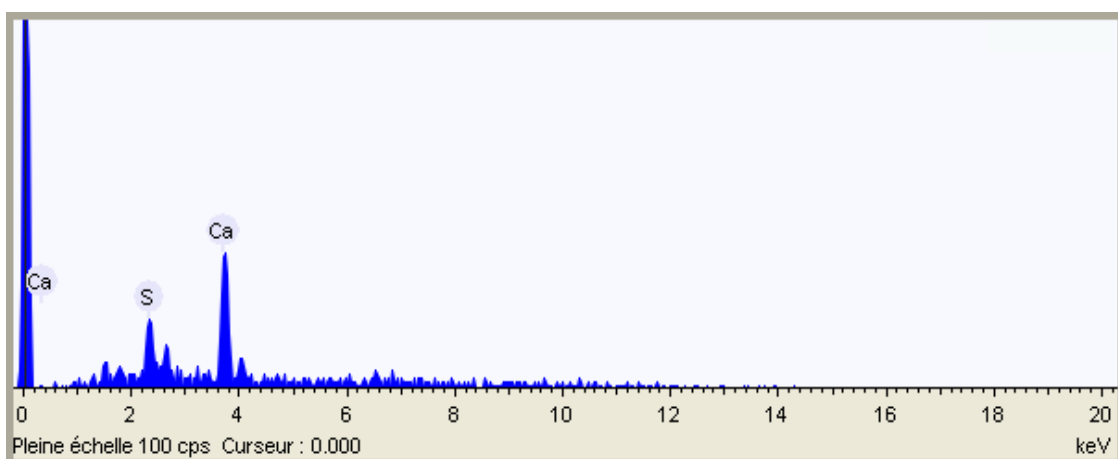


Figure 38. Spectres par EDX des métaux lourds dans une tige d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III).

V-2-3- Localisation des métaux lourds dans les tissus des tiges d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Cr(VI)

Une étude préliminaire en microscopie électronique à balayage (MEB), en vue de localiser le métal lourd (Cr) sur des coupes transversales de tiges d'*Atriplex halimus* traitées à 150 ppm de Cr(VI) à haute résolution ($\times 400$) (**Figure 39.C**), a été entreprise. La distribution des métaux au niveau des tiges, ont mis en évidence une accumulation du chrome dans le cylindre central des tiges. Cette accumulation est visible sous forme de cristaux, qui étaient principalement localisées à l'intérieur du cylindre centrale (Parenchyme médullaire) (**Figure 39**). Pour vérifier cela, on a sélectionné un cristal au niveau du parenchyme médullaire de tige et obtenu leur spectre élémentaire grâce à la méthode EDX du MEB. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 40**.

Le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de calcium, qui sont des éléments nutritifs majeurs. Cependant, la particule semble majoritairement constituée de chlore perçu grâce aux deux pics correspondant aux deux raies de l'élément. On note aussi la présence de Cr, qui présente un pic anormalement élevé, dont l'origine est le traitement des plantes d'*Atriplex halimus* au chromate de potassium.

D'autre part, le Cr est présent à l'intérieur de la tige : il est distribué de façon homogène dans la région centrale correspondant aux cylindres vasculaires de la stèle, et localisé ponctuellement sous forme des cristaux dans les parenchymes médullaires.

Ces observations suggèrent que les cellules parenchymateuses à l'intérieur de la zone médullaire centrale des tiges piège une partie de Cr, mais n'empêche pas pour autant le prélèvement et le transfert du Cr à l'intérieur de la tige jusqu'à la feuille.

L'ensemble de ces résultats indique que l'*Atriplex halimus* accumule préférentiellement le Cr(VI) que le Cr(III). Ces résultats Ces résultats concordent avec ceux de **Zayed et Terry (2003)** ; **Cohen et al. (2006)**, qui indiquent que c'est la forme Cr(VI) qui emprunte ces canaux membranaires alors que la forme Cr(III) diffuserait de manière passive à travers la membrane. **Bluskov et al. (2005)**, ont démontré que le chrome, présent sous forme Cr(III) ou Cr(VI), entrerait dans les cellules par complexation avec des acides organiques provenant d'exsudats racinaires. Des travaux réalisés sur le tabac (*Nicotiana tabacum*) suggèrent une absorption de ce métal par des transporteurs de sulfate ou de phosphate (**Kim et al., 2006**).

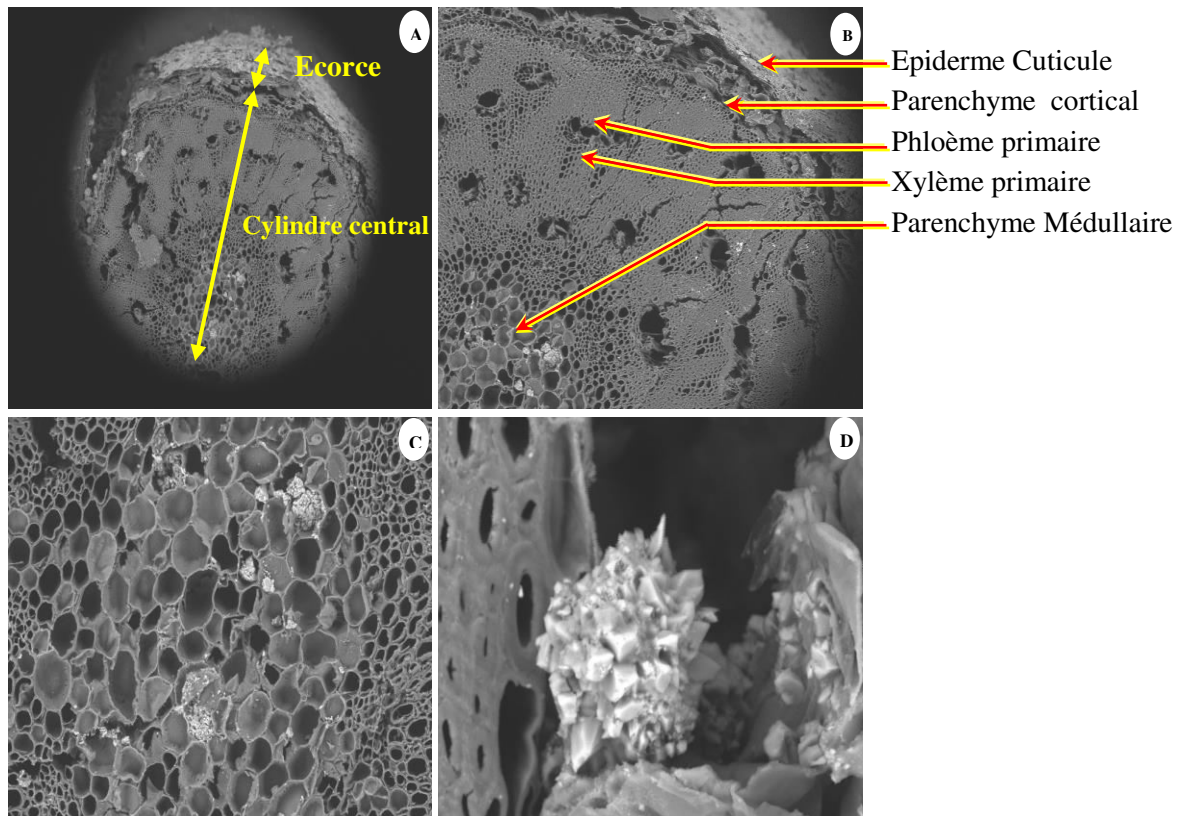


Figure 39. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une tige d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI) par le MEB (A) : (x100); (B) : (x400); (C) : (x400) et (D) : Observation microscopique des cristaux au niveau de tige d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI) par le MEB (x2500).

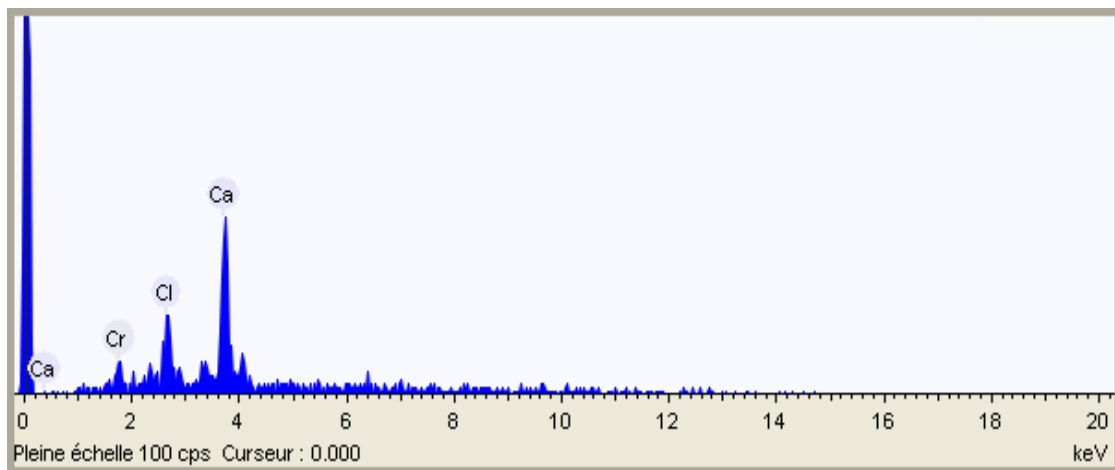


Figure 40. Spectres par EDX des métaux lourds dans une tige d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI).

V-3- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI)

V-3-1- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Pb

Une étude préliminaire en microscopie électronique à balayage (MEB), en vue de localiser le métal lourd (Pb) sur des coupes transversales de racines d'*Atriplex halimus* traitées à 8000 ppm de Pb, a été entreprise. Cet essai a été concluant car nous avons trouvé des particules riches en plomb. Sur l'échantillon de racine, nous avons constaté que ces particules étaient principalement localisées à la surface de l'écorce (Parenchyme cortical) (**Figure 41**). Pour vérifier cela, on a sélectionné un cristal au niveau de l'écorce (parenchyme cortical) de racine et obtenu leur spectre élémentaire grâce à la méthode EDX du MEB. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 42**.

Le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de silice, on trouve aussi de potassium et de fer qui ont une importance primordiale pour le développement et la santé des plantes, accompagnée de magnésium et du calcium, qui sont des éléments nutritifs majeurs. Mais la particule semble majoritairement constituée de chlore perçu grâce aux deux pics correspondant aux deux raies de l'élément. L'analyse par rayons X, nous a permis de détecter d'autres éléments tels que l'aluminium, qui présente un pic élevé, dont l'origine est ambiguë. On note aussi la présence de Pb, qui présente un pic moyennement élevé, dont l'origine est le traitement des plantes d'*Atriplex halimus* au nitrate de plomb.

Par ailleurs, la coupe transversale de la racine d'*Atriplex halimus* traitée au Pb (8000 ppm) à haute résolution ($\times 600$), montre que, le Pb est présent à la surface de la racine au niveau de l'écorce, et localisé ponctuellement sous forme des cristaux, qui sont localisés préférentiellement dans les parenchymes corticaux suggérant l'exclusion du plomb au niveau du cortex (**Figure 41.C**).

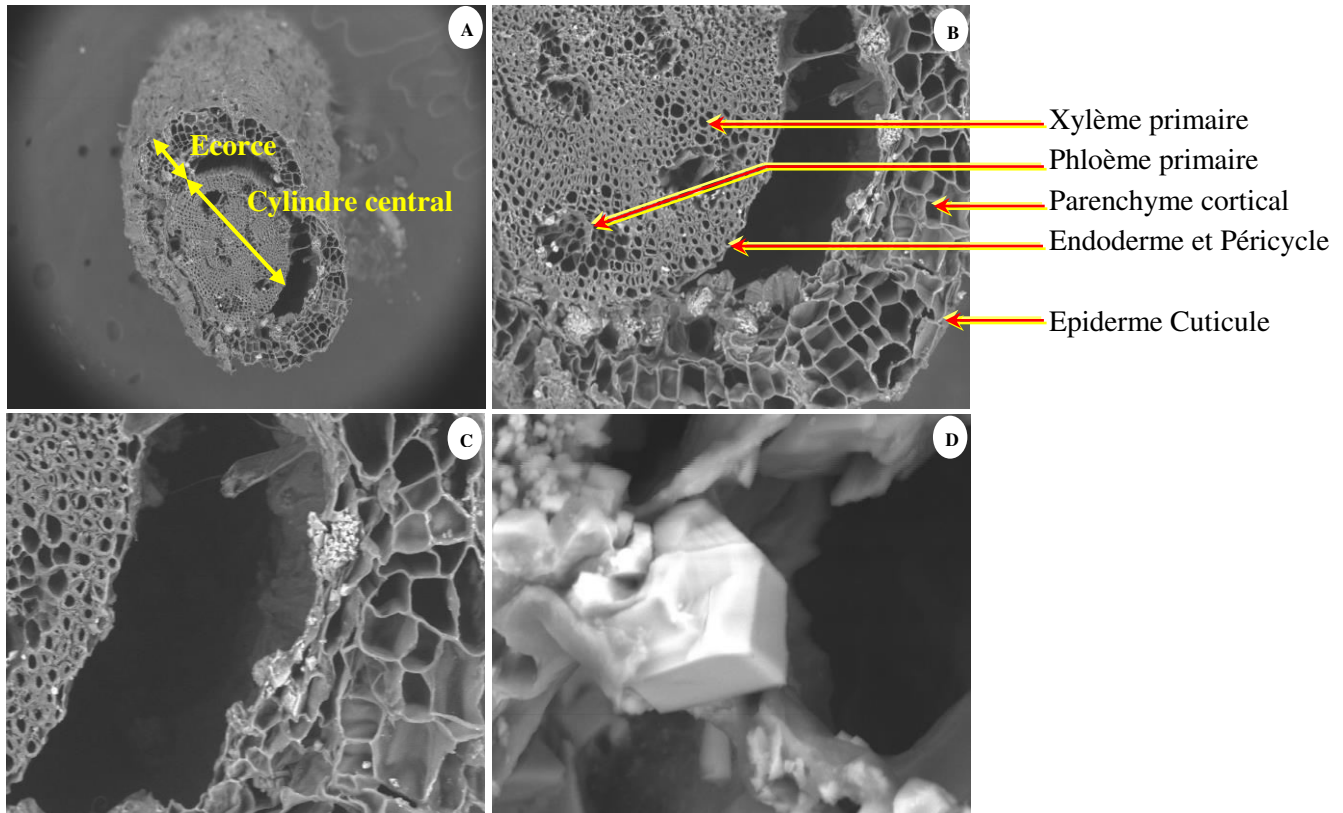


Figure 41. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une racine d'*Atriplex halimus* traitée au Pb par le MEB (A) : (x150); (B) : (x500); (C) : (x600) et D : Observation microscopique d'un cristal au niveau de racine d'*Atriplex halimus* traitée au Pb par le MEB (x6000).

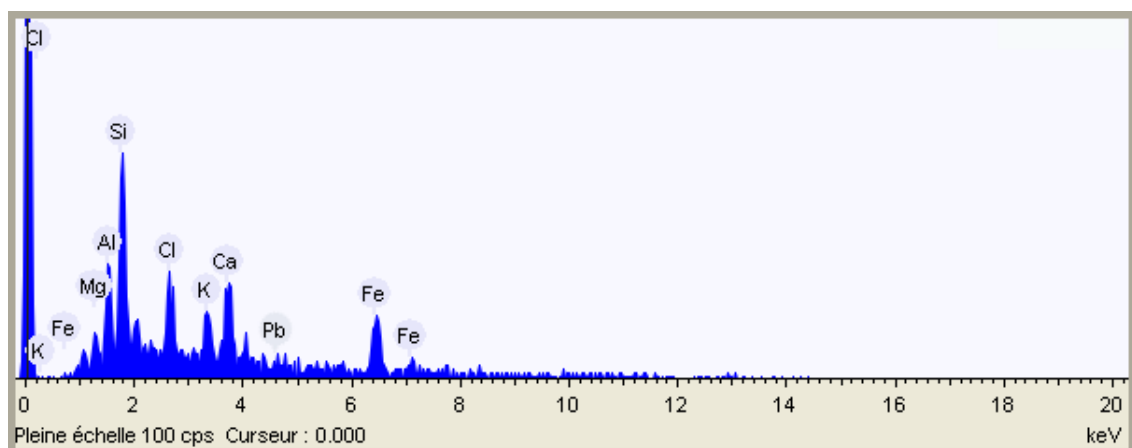


Figure 42. Spectres par EDX des métaux lourds dans une racine d'*Atriplex halimus* traitée au Pb.

V-3-2- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Cr(III)

Une étude préliminaire en microscopie électronique à balayage (MEB), en vue de localiser le métal lourd (Cr) sur des coupes transversales de racines d'*Atriplex halimus* traitées à 750 ppm de Cr(III), a été entreprise. Cet essai a été concluant car nous avons trouvé des particules riches en chrome. Sur l'échantillon de racine, nous avons constaté que ces particules étaient principalement localisées à la surface de l'écorce (Parenchyme cortical) (**Figure 43**). Pour vérifier cela, on a sélectionné un cristal au niveau de l'écorce (parenchyme cortical) de racine et obtenu leur spectre élémentaire grâce à la méthode EDX du MEB. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 44**.

Le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de silice, on trouve aussi de potassium qui sont des oligo-éléments très importants pour le développement et la santé des plantes, accompagnée du calcium, qui est un élément nutritif majeur. Mais la particule semble majoritairement constituée de chlore perçu grâce au pic de masse le plus élevé correspondant au raie de l'élément. L'analyse par rayons X, nous a permis de détecter d'autres éléments tels que le brome, qui présente un pic moyennement élevé, dont l'origine est ambiguë. On note aussi la présence de Cr, qui présente un pic anormalement élevé, dont l'origine est le traitement des plantes d'*Atriplex halimus* au chlorure de chrome.

Par ailleurs, la coupe transversale de la racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III) (750 ppm) à haute résolution ($\times 500$) montre que, le Cr est présent à la surface de la racine au niveau de l'écorce, et localisé ponctuellement sous forme des cristaux, qui sont localisés préférentiellement dans les parenchymes corticaux suggérant l'exclusion du plomb au niveau du cortex (**Figure 43.C**).

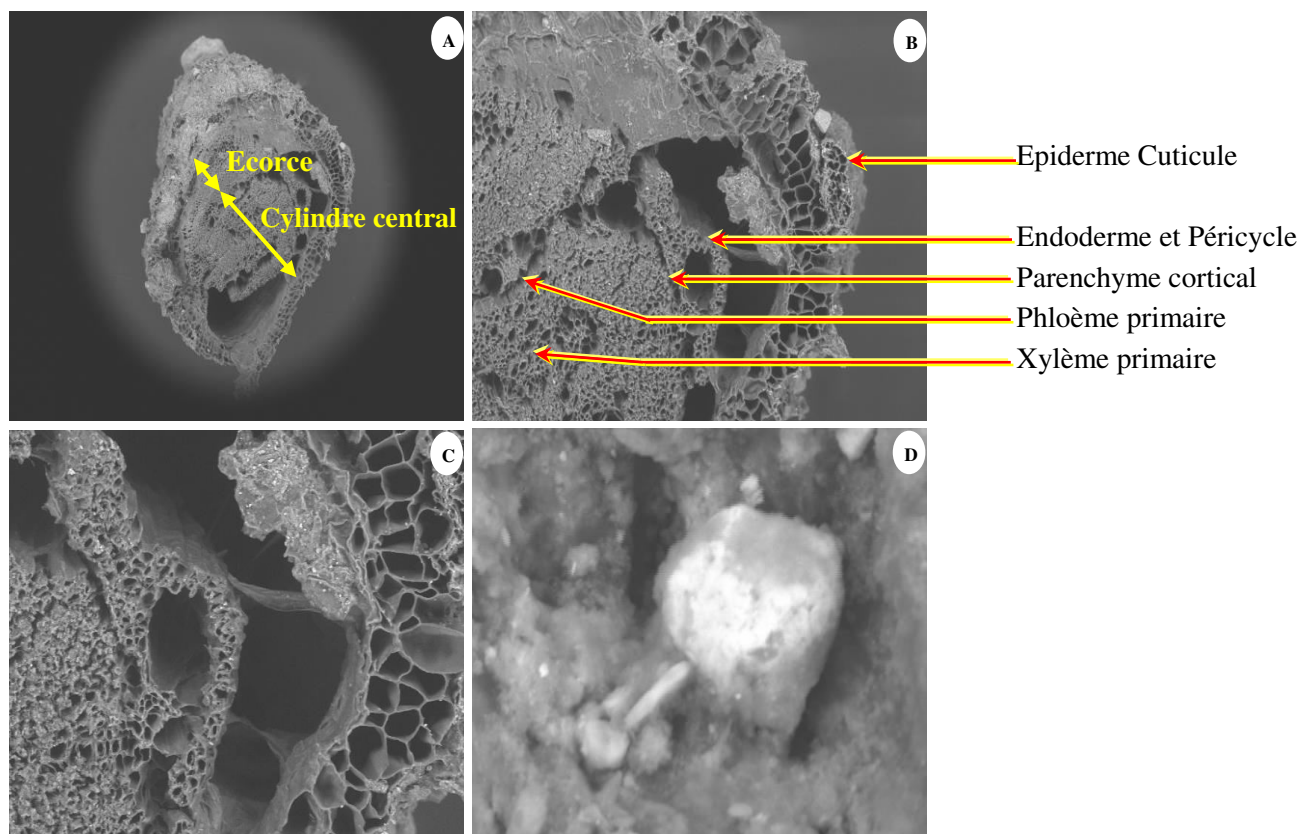


Figure 43. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III) par le MEB (A) : (x100) ; (B) : (x300) ; (C) : (x500) et (D) : Observation microscopique d'un cristal au niveau de racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III) par le MEB (x7000).

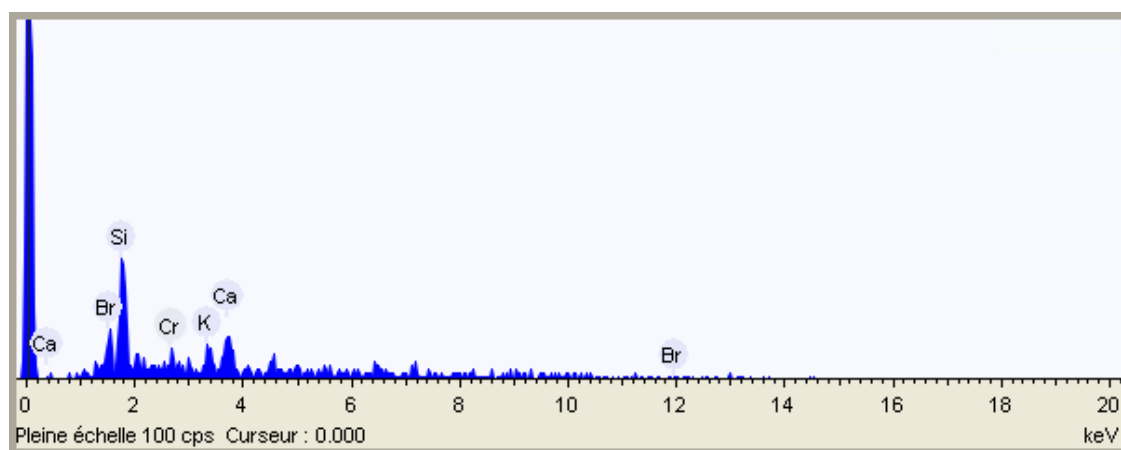


Figure 44. Spectres par EDX des métaux lourds dans une racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(III).

V-3-3- Localisation des métaux lourds dans les tissus des racines d'*Atriplex halimus* traitées à différentes concentrations de Cr(VI)

Une étude préliminaire en microscopie électronique à balayage (MEB), en vue de localiser le métal lourd (Cr) sur des sections de racines d'*Atriplex halimus* traitées à 150 ppm de Cr(VI), a été entreprise. Cet essai a été concluant car nous avons trouvé des particules riches en chrome. Sur l'échantillon de racine nous avons constaté que ces particules étaient principalement localisées à la surface de l'écorce (Parenchyme cortical) (**Figure 45**). Pour vérifier cela, on a sélectionné un cristal au niveau de l'écorce (parenchyme cortical) de racine et obtenu leur spectre élémentaire grâce à la méthode EDX du MEB. Nous avons retenu le spectre de cristal illustré dans la **figure 46**.

Les pics des masse élémentaires les plus élevés sont ceux de Cl et de Ca, le premier pic du spectre correspond au pic du chlore et le second correspond au pic de calcium, on trouve aussi de silice qui sont des oligo-éléments importants pour le développement et la santé des plantes, accompagnée de soufre, qui est un élément nutritif majeur. Mais la particule semble majoritairement constituée de chlore perçu grâce aux deux pics correspondant aux deux raies de l'élément. L'analyse par rayons X, nous a permis de détecter d'autres métaux tels l'Aluminium, qui présente un pic moyennement élevé, dont l'origine est ambiguë. On note aussi la présence de Cr, qui présente un pic anormalement élevé, dont l'origine est le traitement des plantes d'*Atriplex halimus* au chromate de potassium.

Par ailleurs, la coupe transversale de la racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI) (150 ppm) à haute résolution ($\times 600$) montre que, le Cr est présent à la surface de la racine au niveau de l'écorce, et localisé ponctuellement sous forme des cristaux, qui sont localisés préférentiellement dans les parenchymes corticaux suggérant l'exclusion du chrome au niveau du cortex (**Figure 45.C**).

Ces observations sont en accord avec les teneurs en plomb mesurées dans les tissus d'*Atriplex halimus* traitées à 8000 ppm de Pb et les teneurs en chrome mesurées avec un traitement de Cr(III) à 750 ppm.

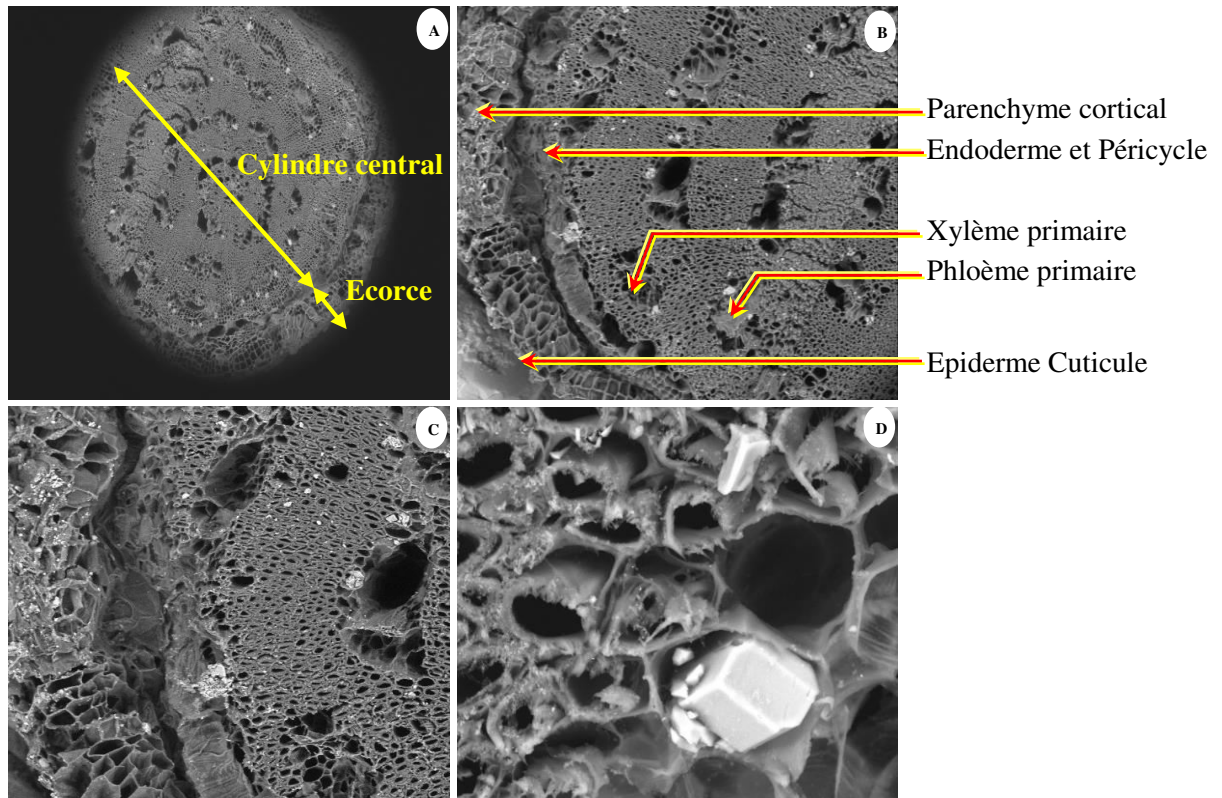


Figure 45. Observation microscopique d'une coupe transversale d'une racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI) par le MEB (A) : (x100) ; (B) : (x180) ; (C) : (x600) et (D) : Observation microscopique d'un cristal au niveau de racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI) par le MEB (x3000).

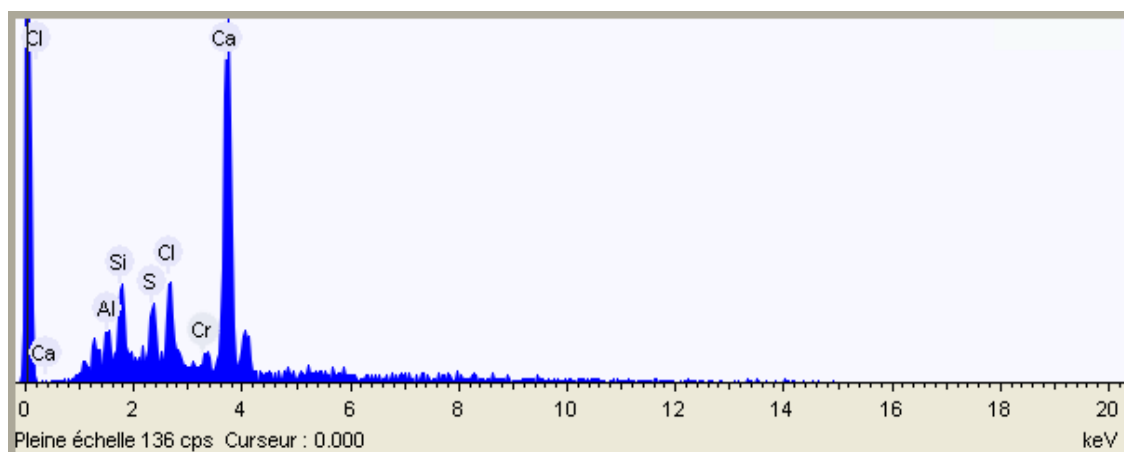


Figure 46. Spectres par EDX des métaux lourds dans une racine d'*Atriplex halimus* traitée au Cr(VI).

L'exposition des plantes d'*Atriplex halimus* aux différents polluants (Pb et Cr(III)) peut modifier leur aspect tissulaire. D'après les **figures (41, 43 et 45)** des coupes histologiques des racines d'*Atriplex halimus* nous avons remarqué que les plantes traitées au Cr(III) et au Pb présentent une diminution des cellules des faisceaux cribro-vasculaires (xylème et phloème) par rapport aux plantes traitées au Cr(VI). De nombreux travaux signalent que le stress provoque la modification du nombre et du diamètre des vaisseaux de xylème chez les halophytes (**Levigneron et al., 1995**). La diminution dans le diamètre des vaisseaux du xylème a été observée chez le coton et la tomate (**Reinoso et al., 2005**) et chez l'orge sauvage (**Huang et Redmann, 1995**), sous contraintes abiotiques.

L'appauvrissement des racines intoxiquées en cellules lignifiées du xylème est peut être expliqué par un phénomène d'occlusion des vaisseaux de ce dernier. Les phénomènes d'occlusion vasculaire ont déjà été décrits par le dépôt d'un matériel fibreux d'origine polysaccharidique pourrait être à l'origine de la formation de bouchons dans le xylème, empêchant l'alimentation en eau (**Dugé de Bernoville, 2009**), et par conséquent le diamètre de la lumière des vaisseaux se réduit, et cette obstruction peut être expliquée comme une réaction de défense de la plante d'*Atriplex halimus* pour l'empêchement d'alimentation en métaux (plomb et chrome) dans notre étude. L'occlusion des vaisseaux a été observé dans plusieurs travaux comme réponses des plantes telle que *Vicia sativa* sous contraintes biotiques où la résistance est associée à la production d'un mucilage riche en pectines et des substances polysaccharidiques d'origine végétale dans les vaisseaux du xylème (**Pérez-de-Luque et al., 2006**).

Tandis que, la formation de tyloses est un processus similaire d'occlusion vasculaire, impliquant le dépôt de substances pectiques dans les vaisseaux du xylème, par les cellules du parenchyme adjacent, et aboutissent à leur occlusion, sont notamment impliqués dans la résistance (**Benhamou et Nicole, 1999**). Dans cette même interaction, les tyloses peuvent également être enrichies en produits phénoliques. En effet, les plantes sont capables de mettre en œuvre plusieurs types de défenses au sein de leur système vasculaire, de manière à contrôler les facteurs de stress biotique et abiotique susceptibles d'envahir ces tissus (**Pearce, 1996**).

Les plantes d'*Atriplex halimus* stockent davantage le plomb et le chrome dans les racines que dans les parties aériennes. Ces résultats concordent avec ceux de **Singh et al. (1997)** ; **Shanker et al. (2005)**, qui ont démontré que le plomb et le chrome sont souvent présents en plus grande quantité dans les racines que dans les parties aériennes. Des travaux réalisés sur une Poacée hyperaccumulatrice de chrome, *Leersia hexandra*, indiquent ainsi que les racines sont plus riches en Cr(III) et en Cr(IV) que les feuilles (**Zhang et al., 2007**). Les plantes semblent aussi stocker le plomb plutôt au niveau racinaire. Par exemple, une espèce de tabac (*Nicotiana glauca*) accumule une quantité de plomb deux fois plus élevée dans les racines que dans les feuilles. De plus, le stockage des ETM s'effectue souvent de manière privilégiée dans les feuilles matures, ce qui permet probablement aux jeunes feuilles d'être protégées et donc d'investir davantage d'énergie pour la croissance (**Overall et Parry, 2004** ; **Tomé et al., 2009**). **Estrella-Gomez et al. (2009)**, reportent aussi une plus grande accumulation de plomb dans les racines de *Salvinia minima*, de l'ordre de 75 % par rapport aux feuilles. Dans cette étude, les auteurs mettent également en évidence une plus forte accumulation de phytochélatines dans les racines, ce qui tend à montrer que les vacuoles racinaires constitueraient le lieu de stockage préférentiel du plomb. **Meyers et al. (2008)**, suggèrent que ce phénomène pourrait être dû à une plus faible quantité ou efficacité de transporteurs racinaires pouvant exporter le plomb vers le xylème. L'efficacité de l'acheminement vers les parties aériennes est liée à la présence importante de transporteurs membranaires, qui permettent de transférer des ETM dans le xylème des tissus racinaires puis de les libérer dans les organes aériens (**Krämer et al., 2007**). Il a été reporté par exemple que l'aluminium est transporté dans le xylème sous forme liée à du citrate chez le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) (**Ma et al., 2001**).

Piechalak et al. (2002), explique que les plantes accumulent un taux important de métaux lourds, et sont capables de transférer des quantités importantes de métaux vers les parties aériennes (**Huang et Cunningham, 1996** ; **Arshad et al., 2008**). Néanmoins, la faible translocation de plomb et de chrome chez l'*Atriplex halimus*, semble être un phénomène assez commun aux autres espèces végétales. Comme précédemment évoqué, ce phénomène est en grande partie dû à la très grande quantité de Pb et de Cr qui se retrouve immobilisée sous forme insoluble. Cependant, cette explication n'est pas suffisante, et il semble que la barrière physique que constitue l'endoderme joue un rôle important dans ce phénomène.

En revanche, l'ensemble de ces résultats indique que l'*Atriplex halimus* adopte le mécanisme interne de détoxification du Pb et du Cr en les séquestrant sous forme métallique, préférentiellement au niveau du cortex racinaire. D'après les données de la littérature nos résultats suggèrent que l'*Atriplex halimus* tolère le plomb et le chrome en le précipitant dans l'apoplaste ou en l'accumulant dans les parois (**Pourrut, 2008**). Les mêmes résultats ont été obtenus au niveau du cortex racinaire chez la plante *Pelargonium* traité par le plomb (**Cecchi, 2008 ; Silvestre, 2008**).

En effet, des différentes études de localisation histologique du plomb ne font jamais état de la présence de ce métal dans les cellules endodermiques matures. Au niveau de la racine, les éléments métalliques peuvent être transportés par voie symplastique (à l'intérieur de la cellule) et apoplastique (à l'extérieur de la cellule) (**Barber, 1995**). Le transport apoplastique du Pb dans les racines jusqu'au cylindre central de la plante et son déplacement vers les parties aériennes est fortement inhibé par l'endoderme, et principalement la bande de Caspari, qui joue le rôle de barrière (**Seregin et Ivanov, 1997; Verma et Dubey, 2003**). En effet, à ce niveau les cellules sont recouvertes d'une substance lipidique imperméable (la subérine) (**Taiz et Zeiger, 2006**).

Le plomb absorbé par l'épiderme et par la région des poils absorbants pénètre dans tous les tissus corticaux, mais ne semble pas en mesure de franchir l'endoderme (**Seregin et al., 2004**). La poursuite du transport des éléments se fait donc par l'intérieur des cellules racinaires jusqu'à atteindre les vaisseaux conducteurs de la sève brute (**Taiz et Zeiger, 2006**), qui est le principal moyen de transport des métaux des racines vers les parties aériennes (**Meyer et al., 2008**). La circulation de la sève brute se fait par poussée racinaire et par appel foliaire lors de la transpiration (**Soltner, 1999**). Le métal emprunte alors le système vasculaire en suivant le flux d'eau jusqu'aux zones foliaires, où l'eau s'évapore et où il s'accumule (**Tung et Temple, 1996**). Les éléments sont alors distribués dans tous les organes de la plante. Lors du passage dans la sève xylémique, le plomb pourrait être complexé à des acides aminés, comme l'histidine, à des acides organiques, comme les acides citriques, fumariques et maliques (**Tatar et al., 1998**) ou bien aux PC. Cependant, il pourrait aussi être transféré majoritairement sous forme inorganique comme c'est le cas pour le cadmium (**Ueno et al., 2008**).

Tableau 39. Récapitulatif des données les plus marquantes obtenues au cours de cette thèse, concernant les mécanismes d'absorption, de transport, et de détoxification par stockage ou réactions biochimiques chez l'*Atriplex halimus* L. vis-à-vis les métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI).

Paramètres étudiés		Métal				
		Pb	Cr(III)	Cr(VI)		
Croissance	Survie		✓	✓	✓	
	Biométrie	Longueur des racines		↗	↗	↗
		Croissance des tiges		↘	↘	↘
		Nombre des feuilles		↗	↗	↗
		Matière sèche (MS)	R	↗	↗	↗
			T	↗	↗	↗
			F	↗	↗	↗
		Matière minérale (MM)	R	↗	↗	↗
			T	↗	↗	↗
			F	↗	↗	↗
		Matière organique (MO)	R	↘	↘	↘
	T		↘	↘	↘	
	F		↘	↘	↘	
	Teneur en eau relative (TRE)		↘	↘	↘	
Caractéristiques Biochimiques	Chlorophylle	Chl a		↘	↘	↘
		Chl b		↘	↘	↘
		Chl a+b		↘	↘	↘
	Sucres solubles	F	↗	↗	↗	
		T	↗	↗	↗	
	Proline	F	↗	↗	↗	
		T	↗	↗	↗	
		R	↗	↗	↗	
	Polyphénols	Phénols totaux	F	↗	↗	↗
			T	↗	↗	↗
		Flavonoïdes	F	↗	↗	↗
			T	↗	↗	↗
		Tanins	F	↗	↗	↗
			T	↗	↗	↗
Accumulation des métaux	Plomb	R	++++	++++	++++	
		T	+	+	+	
		F	++	++	++	
	Chrome	R	++++	++++	++++	
		T	+	+	+	
		F	++	++	++	

✓ : Survie de totalité des plantes ; ↗ : Augmentation ; ↘ : Réduction ; ++++ : Très grande quantité ; ++ : Petite quantité ; + : Traces.

Parmi les principaux polluants générés par les activités industrielles, les métaux lourds tels que le plomb et le chrome, qui sont présents dans l'environnement comme des éléments naturels ou résultant des activités anthropiques. Les rejets industriels et ménagers peuvent entraîner l'accumulation des éléments polluants dans les milieux récepteurs et leurs transferts éventuels aux plantes et aux cheptels, donc les risques d'altération de l'équilibre écosystémique et de la santé humaine sont présents.

La contamination des milieux naturels par ces éléments constitue des problèmes particulièrement préoccupants. Une partie des éléments métalliques dits «essentiels» (Zn et Cu) est indispensable pour le fonctionnement des systèmes biologiques, dans une gamme de concentrations extrêmement réduite. Alors que d'autres (Pb et Cr), par leur nature non biodégradable sont extrêmement néfastes, présentent une forte écotoxicité et pourraient être impliqués dans de nombreuses pathologies même à de faibles concentrations. En effet, il est apparu important de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors de l'extraction du chrome et du plomb, notamment le cas du chrome qui a été peu étudié, qui est présent dans le sol sous deux formes Cr(III) et Cr(VI).

Cependant, à l'heure actuelle, un manque des connaissances de base des mécanismes de tolérance et d'accumulation des métaux lourds, sur les communautés végétales, au niveau physiologique et biochimique retarde son développement. L'élucidation des processus biologiques de la tolérance et de l'accumulation est une étape indispensable pour l'avancement de la compréhension de ces mécanismes. Notre contribution se situe à ce niveau de la problématique. Ainsi, en se basant sur des approches et techniques variées on a étudié la toxicité, la tolérance et l'accumulation de deux métaux lourds : le plomb et le chrome, chez l'espèce *Atriplex halimus* L. (Saltbush méditerranéen), qui pourrait éventuellement être utilisée comme plante phytoremédiate.

L'étude a été faite sur quatre provenances : Kharouba (Mostaganem), Béni Saf (Ain Témouchent), Sig (Mascara) et Oued'Rhiou (Relizane).

L'évolution du taux de germination et de levée a été suivie. Les résultats obtenus nous ont montré que le facteur «Provenance» n'influe pas de manière significative sur le taux de germination et de levée des graines d'*Atriplex halimus*. La phase de germination-levée ne fait pas l'objet de travaux de sélection, qui se concentrent sur des variables plus globales telles que le rendement ou la qualité de la récolte ou sur les résistances aux différentes contraintes environnementales. Les conditions de culture ont un effet prépondérant sur la réussite de la levée, alors que les écarts entre provenances sont beaucoup plus réduits.

Cependant, la survie pour les plantes d'*Atriplex halimus* a été totale au bout de six mois, le fort taux de survie des plantes dans les conditions expérimentales de culture, confirme que cette espèce peut s'adapter à des milieux divers.

Quant à la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* se fait mieux aux températures comprises entre 20 et 35°C ; cette caractéristique permet aux plantes de se développer pendant les périodes fraîches et humides, comme une stratégie d'adaptation aux conditions arides ou semi-arides.

L'évaluation de la croissance des plantes a été faite sur la mesure de la longueur de la tige durant une période de 25 semaines. Pour la hauteur de la tige les résultats ont mis en évidence des effets significatifs. Nous avons enregistré la plus faible hauteur chez la provenance «Oued'Rhiou». En revanche, le caractère étudié est réparti de la même façon entre les autres provenances.

Dans cette étude, la différence constatée entre les quatre provenances d'*Atriplex halimus*, soumises aux mêmes conditions de culture, prouve le polymorphisme morphologique de cette espèce et que le comportement de chaque provenance est probablement lié à son génotype et son état physiologique. Toutefois, la caractérisation des peuplements représentatifs de la diversité totale doit être confirmée par l'étude du polymorphisme de marqueurs moléculaires neutres vis-à-vis de l'environnement.

La seconde étude vise à l'évaluation de la tolérance au stress métallique induit par le Pb, Cr(III) et Cr(VI) chez quatre provenances d'*Atriplex halimus* : Kharouba (Mostaganem), Béni Saf (Ain Témouchent), Sig (Mascara) et Oued'Rhiou (Relizane).

L'action du stress métallique sur les paramètres biométriques, physiologiques et biochimiques, considérés comme critères d'évaluation de la réponse des plantes en présence des métaux lourds dans leur milieu de culture, a été étudié chez l'espèce d'*Atriplex halimus* L. traitée au plomb à 1000, 4000 et 8000 ppm de $(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2)$, au Cr(III) à 250, 500 et 750 ppm de $(\text{Cr}(\text{Cl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}))$ et au Cr(VI) à 50, 100 et 150 ppm de (K_2CrO_4) .

Le présent travail, a permis d'étudier les variations des teneurs en chlorophylles, en sucres solubles, en proline et en polyphénols, ainsi que le contenu relatif en eau et la biomasse sèche, minérale et organique des parties aériennes et racinaires des plantes d'*Atriplex halimus* cultivées dans des substrats (Sol), en fonction de l'intensité du stress au plomb et au chrome, sous deux formes Cr(III) et Cr(VI), appliquées à la plante, et d'examiner l'absorption du Pb et du Cr et leur translocation vers les parties aériennes.

La mesure des paramètres biométriques a montré que le Pb, Cr(III) et le Cr(VI) n'induisent aucun effet sur la survie de la plante d'*Atriplex halimus*, la longueur des racines et des tiges, et sur le nombre des feuilles ainsi que sur le rendement en matière sèche et minérale. Or, la réponse des quatre provenances à la teneur dans le sol en plomb, en Cr(III) et en Cr(VI) peut entraîner des modifications morphologiques et physiologiques sur les différents organes de la plante. Il en ressort que les effets du plomb se répercutent davantage sur la croissance des parties aériennes (l'élongation des tiges) que sur celle des racines et qu'ils dépendent en outre du mode d'expression (matière organique) dans les parties aériennes ainsi que les racines.

L'implication des propriétés du substrat (Sol) sur l'accumulation des métaux par les plantes d'*Atriplex halimus* était parfois aussi importante. Par exemple, la comparaison des plantes traitées par le Pb et le Cr(VI) par rapport au pH montre que l'accumulation du Pb et du Cr par les plantes d'*Atriplex halimus* des substrats à pH moins élevés était plus importante, sauf pour les plantes de la provenance « Béni Saf », ou nous avons enregistré un pH légèrement basique non favorable à la biodisponibilité des métaux dans les plantes.

Par ailleurs, l'accumulation du Pb était fortement influencée par les concentrations du métal dans le substrat. Inversement le traitement au Cr(III), n'a pas montré une influence de la concentration du métal dans les plantes d'*Atriplex halimus*, sauf sur les plantes de la provenance «Kharouba».

En effet, nous avons mis en évidence une forte capacité d'absorption racinaire particulièrement du Pb et du Cr. Le faible taux de translocation des métaux, vers la partie aérienne, apparaît comme un mécanisme important qui limite la toxicité des métaux chez cette espèce. Cependant, les réponses physiologiques varient suivant les facteurs "Provenance, Métal et Concentration".

L'analyse de la teneur relative en eau (RWC), nous permet de décrire d'une manière globale le statut hydrique et d'évaluer l'aptitude des plantes à réaliser une bonne osmorégulation et maintenir une turgescence cellulaire. Lors de notre expérimentation, les résultats obtenus dénotent que l'application, de concentrations croissantes de Pb, Cr(III) et de Cr(VI), influe d'une manière négative sur l'augmentation de la teneur relative en eau des tissus d'*Atriplex halimus*. Toutefois, le maintien du RWC plus ou moins élevé en comparaison au témoin pour les plantes traitées au Cr(III) soumis à des niveaux de stress de 250 ppm, serait probablement dû à une osmorégulation active, suite à la mise en place d'un mécanisme de tolérance au stress métallique.

La réponse biochimique des plantes d'*Atriplex halimus* L. vis-à-vis le stress métallique par des concentrations croissantes en Pb, Cr(III) et en Cr(VI), aboutit aux résultats suivants :

Les différences d'accumulation de chlorophylle, de sucres solubles, de proline et des polyphénols, entre les plantes témoins et les plantes soumises au stress métallique sont très importantes.

L'étude de l'effet du Pb, Cr(III) et Cr(VI) sur l'*Atriplex halimus*, a permis de dégager les résultats essentiels suivants : La teneur en chlorophylle totale chez les plantes non stressées aux Pb, Cr(III) et Cr(VI) est la plus élevée par rapport à celle des plantes stressées. En effet, l'accumulation de la chlorophylle est liée à la teneur du milieu de culture en métal. Les teneurs en chlorophylle baissent en présence de Pb, Cr(III) et de Cr(VI), et augmentent en leur absence. Par ailleurs, la chlorophylle b est plus sensible que la chlorophylle a à l'intoxication. Ces métaux provoquent une perturbation de l'état physiologique des plantes traduite par une diminution de la teneur en chlorophylle totale d'*Atriplex halimus* L. chez la plus part des provenances testées.

Nos résultats indiquent que l'accumulation de la proline se manifeste dans les feuilles, les tiges et les racines, ce qui présume que cet acide aminé est synthétisé dans les feuilles et migre vers les racines à travers les tiges. En revanche, sous les différents traitements métalliques, la teneur en proline accumulée est très élevée par rapport aux plantes témoins. L'addition de Pb, Cr(III) et de Cr(VI) dans le milieu a un effet hautement significatif sur la synthèse de la proline chez les organes aériennes (feuilles et tiges) et souterraine (racines). Ainsi, les feuilles présentent des teneurs en proline élevées par rapport à celles des tiges et des racines.

Les sucres solubles semblent également s'accumuler dans les tissus d'*Atriplex halimus* L. en raison du stress métallique. La présente étude a montré que chez les plantes d'*Atriplex halimus* traitées au Pb, Cr(III) et au Cr(VI), les sucres s'accumulent davantage, au niveau des feuilles et des tiges, avec des concentrations élevées.

D'une manière générale, La relation entre le taux de proline et de sucres solubles accumulés et le RWC enregistré chez les plantes d'*Atriplex halimus* traitées au Pb, Cr(III) et au Cr(VI), est expliquée que le déficit hydrique marqué après le stress métallique provoque une augmentation de la synthèse des sucres solubles et de la proline chez la plus part des provenances testées.

Les polyphénols étudiés montrent un accroissement linéaire en fonction de l'intensité du stress métallique. La teneur en phénols totaux dans les parties aériennes d'*Atriplex halimus* croît significativement au fur et à mesure que la concentration des métaux lourds augmente dans le milieu et atteint des valeurs plus importantes que celles des flavonoïdes et des tanins, ou une légère augmentation a été signalée. Donc, on peut constater que les plantes d'*Atriplex halimus* exposées sous stress métallique, par différentes concentrations de Pb, Cr(III) et de Cr(VI), ont tendance à synthétiser les phénols totaux plus que les flavonoïdes et les tanins.

Concernant les polyphénols, une accumulation très importante est enregistrée chez les plantes stressées par le Pb par rapport aux Cr(III) et Cr(VI). En effet, le stress métallique induit par le Pb, Cr(III) et Cr(VI), provoque une augmentation en polyphénols au niveau des feuilles et des tiges d'*Atriplex halimus*. L'addition des métaux lourds dans le milieu a bien montré l'effet antiradicalaire, par l'augmentation des métabolites secondaires qui sont les phénols totaux, les flavonoïdes et les tanins. L'*Atriplex halimus*, est donc doué d'une activité antioxydante très prometteuse, d'où la nécessité de procéder à un fractionnement de l'extrait brut en vue de tester individuellement ses différents constituants.

En conclusion finale, cette étude montre que l'espèce *Atriplex halimus* semble tolérante aux métaux lourds : Pb, Cr(III) et Cr(VI) sous ces conditions expérimentales. Ceci est témoigné par l'accumulation de la proline, des sucres solubles et des polyphénols (phénols totaux, flavonoïdes et tanins) chez l'*Atriplex halimus* dans les feuilles et les tiges.

Les résultats obtenus ont confirmé que la concentration des éléments est un facteur important dans l'évaluation des effets et que la toxicité du plomb et du Cr(VI) est plus forte que celle du Cr(III) chez cette espèce. D'une manière générale, notre étude confirme que le Pb est plus toxique que le Cr et que les plantes d'*Atriplex halimus* traitées au Cr(VI) ont des seuils de tolérance différents, étant plus sensibles que celles traitées par le Cr(III).

Parallèlement à l'étude des réponses d'*Atriplex halimus* à une exposition métallique en plomb et en chrome, nous avons tenté de localiser les métaux au niveau tissulaire sur des plantes d'*Atriplex halimus* cultivés sur sol contaminé. L'analyse en microscopie électronique à balayage associée à la microanalyse par Energie Dispersive de rayons X (EDX) de racines a mis en évidence une accumulation de Pb et de Cr à la surface de l'écorce. Pour compléter ces analyses préliminaires, les parties aériennes (tiges et feuilles) d'*Atriplex halimus* ont été analysées. Ces analyses mettent en évidence de plus fortes concentrations de Pb et en Cr au niveau de l'épiderme des feuilles, et au niveau des cellules parenchymateuses à l'intérieur de la zone médullaire centrale des tiges, alors que le Cr n'a pas pu être détecté au niveau des tiges d'*Atriplex halimus* traitées stressées au Cr(III). Ces analyses en microscopie électronique à balayage ayant donné des résultats satisfaisants.

A l'échelle anatomique, aucune anomalie d'ordre structural n'a été décelée sur les coupes transversales d'organes de plantes traitées au Cr(VI). Les seuls changements anatomiques observés sont d'ordre dimensionnel: sous l'action d'une forte concentration de Pb et de Cr(III), les modifications au niveau de la tige d'*Atriplex halimus* sont les suivantes: une diminution de la taille des cellules parenchymateuses et une diminution du diamètre des vaisseaux de xylème et l'augmentation de leur nombre, qui s'accompagne avec une augmentation de surface des faisceaux cribro-vasculaires. Au niveau des racines des plantes d'*Atriplex halimus* traitées au Pb et au Cr, les cellules des faisceaux cribro-vasculaires (xylème et phloème) diminuent en diamètre et augmentent en nombre.

Les traitements avec des fortes concentrations en plomb (jusqu'à 8000 ppm), en Cr(III) (jusqu'à 750 ppm) et en Cr(VI) (jusqu'à 150 ppm), ont révélés une bonne aptitude d'adaptation des plantes d'*Atriplex halimus*. Ces données confirment donc qu'il existe très probablement chez l'*Atriplex halimus* un mécanisme efficace de tolérance à la surcharge métallique dans le milieu.

Les résultats trouvés suggèrent que les plantes d'*Atriplex halimus* peuvent être utilisées dans un système de dépollution des sols car elles possèdent des propriétés particulières de résistance naturelle à de nombreuses contraintes abiotiques.

En conclusion, les plantes de l'*Atriplex halimus* présentent une forte tolérance au plomb et au chrome sous ces deux formes Cr(III) et Cr(VI), car elles survivent à la présence de forte concentration de ces métaux dans le milieu de culture en restant vertes. De plus elles sont capables d'accumuler des quantités de plomb et de chrome comparables à celles retrouvées dans des plantes réputées pour leur forte capacité d'accumulation.

Tenant compte de la tolérance, de la capacité d'accumulation et de la productivité en biomasse, *Atriplex halimus* L. montre des potentialités réelles pour d'éventuelles applications dans les technologies de phytoremédiation des sols contaminés par du plomb et du chrome.

Au terme de cette étude, nous pouvons conclure que l'*Atriplex halimus* L. est une plante qui tolère, accumule le plomb et le chrome et résiste aux contraintes de ces métaux. Ceci est reflété par les changements physiologiques, biochimiques et anatomiques qui se sont produites lors de l'expérimentation. De ce fait, cette plante est peut être proposée comme un moyen épuratif (plante phytoremédiatrice) des sols contaminés par le Pb et le Cr.

Notre travail laisse entrevoir de nombreuses perspectives d'expérimentations. Dans un premier temps et dans la continuité directe de cette étude, il est donc intéressant de prospecter les possibilités d'utiliser des techniques basées sur la description du comportement, l'analyse génétique des caractères et la recherche des marqueurs moléculaires pour une amélioration de la tolérance au stress aux métaux lourds. Il serait aussi intéressant, de développer notre recherche par l'étude et l'analyse électrophorétique des enzymes impliquées dans la réponse au stress métallique telles que les peroxydases, la cinétique et la dynamique d'accumulation des métaux chez les cette espèce étudiée.

Par ailleurs, Il serait important de tester la capacité phytoremédiate de cette 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, de tenir compte de la durée du stress pour mieux valoriser la réponse de la plante et aussi d'augmenter les concentrations en Pb, Cr(III) et en Cr(VI) pour évaluer la réponse de cette espèce phytoremédiate vis-à-vis des sols très pollués.

Il sera important aussi de tester les capacités de tolérance d'*Atriplex halimus* L. à d'autres métaux (Hg, Al, Ni, etc.), car il est rare qu'un milieu soit pollué par un seul métal. Ceci permettrait d'étudier les réponses de la plante aux autres métaux mais aussi sa réaction face à la combinaison de plusieurs d'entres eux qui pourrait induire une contrainte différente. De plus un phénomène de compétition entre les différents éléments métalliques pourra se produire permettant de déterminer "les préférences" de la plante.

Références bibliographiques

- Abbad, A. et Benchaabane, A., 2004.** The phonological study of *Atriplex halimus* L. Afric. Journal of ecology, Vol. 42: 69-73.
- Abbad, A., Cherkaoui, M., Walid, N., El Hadrami, A. et Benchaabane, A., 2004.** Variabilités phénotypique et génotypique de trios populations naturelles d'*Atriplex halimus*. C.R. Biologies. Vol. 327: 371-380.
- Abdelly, C., 2006.** Bioremédiation/ Phytoremédiation. Université de Tunis. Institut supérieur de l'éducation et de la formation continue, Département des Sciences Naturelles, S.N, 232, 32 p.
- Abida, O., 2005.** Impact des complexes de fer et de la lumière solaire sur le devenir de polluants de l'environnement aquatique. Chimie-Physique. Ecole doctorale des sciences fondamentales. Université Blaise Pascal (U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique) N°477. These de doctorat, 2012. 52 p.
- Ablain, F., 2002.** Rôle des activités lombriciennes sur la redistribution des éléments traces métalliques issues de boue de station d'épuration dans un sol agricole. Thèse Doctorat, Univ. Renne, 148 p.
- Abou Auda, M.M., Symeonidis, L., Hatzistavrou, E. et Yupsanis, T., 2002.** Nucleolytic activities and appearance of a new DNase in relation to nickel and manganese accumulation in *Alyssum murale*. Journal of Plant Physiology, Vol. 159: 1087-1095.
- Aboura, A., 2005.** Comparaison phytoécologique des *Atriplexais* situé au nord et au sud de Tlemcen, Algérie. 181 p.
- Abrahams, P.W., 2002.** Soils: their implications to human health. The Science of the Total Environment, Vol. 291: 1-32.
- Adamo, P., Arienzo, M., Bianco, M.R., Terribile, F. et Violante, P., 2002.** Heavy metal contamination of the soil used for stocking raw materials in the former ILVA iron-steel industrial plant of Bagnoli (southern Italy). The Science of the Total Environment, Vol. 295: 17-34.
- Adhikari, T., Ajay, K., Singh, M.V. et Subba, A.R., 2010.** Phytoaccumulation of lead by selected wetland plant species. Soil Sci. Plant Anal., Vol. 41: 2623-2632.
- Adier, J.H., Lazarovici, G. et Marton, M., 1986.** The diabetic response of weanling sand rats (*Psammomys obesus*) to diets containing different concentrations of salt bush (*Atriplex halimus*). Diabète Res, Vol. 3: 169-171.
- Adriano, D.C., 2001.** Trace elements in terrestrial environments; Biochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.
- Adriano, D.C., 1986.** Trace elements in the terrestrial environment. New York (USA), Springer-Verlag.
- Aganga, A.A., Mthetho, J.K. et Tshwenyane, S., 2003.** *Atriplex nummularia* (Old Man Saltbush): A potential forage crop for Arid Regions of Botswana. Asian Network for Scientific Information. Pakistan Journal of Nutrition, Vol. 2 (2): 72-75.
- Aggangan, N.S., Dell, B. et Malajczuk, N., 1998.** Effects of chromium and nickel on growth of the *Ectomycorrhizal fungus Pisolithus* and formation of *Ectomycorrhizas* on *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Geoderma, Vol. 84: 15-27.
- Aguesse, P., 1975.** Clefs pour l'écologie. Seghers. 238 p.

- Ait Hamadouche, N., Aoumeur, H., Djedjai, S., Slimani, M. et Aoues, A.E.K., 2012.** Phytoremediation potential of *Raphanus sativus* L. for lead contaminated soil. *Acta Biologica Szegediensis*, Vol. 56 (1): 43-49.
- Akinci, I.E. et Akinci, S., 2010.** Effect of chromium toxicity on germination and early seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.). *Afr. J. Biotechnol.*, Vol. 9: 4589-4594.
- Alaoui-Sossé, B. et Badot, P.M., 2004.** Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents. *Plant Science. Elsevier*, Vol. 6796: 1-6.
- Alatou, D., 1990.** Recherches sur le déterminisme de la croissance rythmique du chene: *Quercus pedunculata* ehrh, *Quercus mirbeckii*, *Quercus suber* L. Etude morphologique, biochimique et écophysio-logique. Thèse de Doctorat d'état en sciences naturelles ISN., Université de Constantine, 109 p.
- Albouchi, A., Bejaoui, Z. et El Aouni, M.H., 2003.** Influence of moderate or severe water stress on the growth of *Casuarina glauca* Sieb. seedlings. *Sécheresse*, Vol. 14: 137-142.
- Aldoobie, N.F., Beltagi, M.S., 2013.** Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress. *African Journal of Biotechnology*, Vol. 12: 4614-4622.
- Alem, C. et 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 (1): 20-31.
- Ali, S.S., Kasoju, N., Luthra, A., Singh, A., Sharanabasava, H., Sahu, A. et Bora, U., 2008.** Indian medicinal herbs as sources of antioxidants. *Food Res Int*, Vol. 41: 1-15.
- Alia, C., Mohanty, P. et Matysik J., 2001.** Effect of proline on the production of singlet oxygen. *Amino Acids*, Vol. 21: 195-200.
- Alia, C., Prasad, K.V.S.K. et Pardha Saradhi, P., 1995.** Effect of zinc on free radical and proline in *Brassica juncea* and *Cajanus cajan*. *Phytochemistry*, Vol. 39: 45-47.
- Alicata, M.L, Amato, G., Bonanno, A., Giambalvo, D. et Leto, G., 2002.** In vivo digestibility and nutritive value of *Atriplex halimus* alone and mixed with wheat straw; *Alternative Medicine Review*, Vol 7, Number 1. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 139: 139-142.
- Alleman, B.C. et Leeson, A., 1997.** In situ and On-site Bioremediation. Vol 3, Fourth International In situ and On-site Bioremediation. *Symposium*, New Orléans, April 28-May 1, Buttelle Press, 301-366.
- Alloway, B.J. et Steinnes, E., 1999.** Anthropogenic additions of cadmium to soils. In: McLaughlin, M. J. and Singh, B. R., Eds. *Cadmium in soils and plants*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 97-123.
- Alloway, B.J., 1995.** Soil processes and the behaviour of heavy metals. In: *Heavy metals in soils*. Alloway, B. (Eds). Chapman & Hall, New York, 11-37.
- Almeida, C. M. R., Mucha, A. P. et Teresa Vasconcelos, M., 2011.** Role of different salt marsh plants on metal retention in an urban estuary (*Lima estuary*, NW Portugal). *Estuar Coast Shelf Sci.*, Vol. 91 (2): 243-249.
- Almeida, C.M.R., Mucha, A.P. et Vasconcelos, M.T.S.D., 2006.** Comparison of the role of the sea club-rush *Scirpus maritimus* and the sea rush *Juncus maritimus* in terms of concentration, speciation and bioaccumulation of metals in the estuarine sediment. *Environmental Pollution*, Vol. 142 (1): 151-159.

- Al-Shawi, A.W. et Dahl, R., 1999.** Determination of total chromium in phosphate rocks by ion chromatography. *Journal of Chromatography A.*, Vol. 850: 137-141.
- Alzieu, C., 1999.** Dragages et environnement marin. État des connaissances, Editions IFREMER, 223 p.
- Anderson, W.N.C., 2000.** Thesis: Practical Aspects of Phytoextraction. Palmerston North, New-Zealand, Massey University, 2000.
- Anderson, C.W.N., Brooks, R.R., Chiarucci, A., Lacoste, C.J., Leblanc, M., Robinson, B.H., Simcock, R. et Stewart, R.B., 1999.** Phytomining for nickel, thallium and gold. *Journal of Geochemical Exploration*, 9 p.
- André Belot, B., 1978.** Dictionnaire des arbres et arbustes de Jardin. édition Bordas, Paris 1978.
- Anonyme, 2017.** Google maps. <https://www.google.dz/maps/>. (page consultée le: 10/11/2016).
- Anonyme, 2000.** *Atriplex halimus*, family *Chenopodiaceae*. Tree species N° TTS4., 1-2.
- Antonovics, J., Bradshaw A.D. et Turner, R.G., 1971.** Heavy metal tolerance in plants. *Advances In: Ecological Research*, Vol. 7: 1-85.
- Anuradha, S. et Rao, S.S.R., 2007.** The effect of brassinosteroids on radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings growing under cadmium stress. *Plant Soil Environ.*, Vol. 5: 465–472.
- Anuraga, M., Duarsa, P., Hill, M.J. et Lovett, J.V., 1993.** Soil moisture and temperature affect condensed tannin concentration and growth in *Lotus corniculatus* and *Lotus pedunculatus*. *Australian Journal of Agricultural Research*, Vol. 44: 1667-1681.
- Aouissat, M., Sotomayor, J.A. et Correal, E., 1993.** Production fouragère d'une plantation d'*Atriplex halimus* exploitée deux fois par an (hiver-été). In: "Management of Mediterranean shrublands and related forage resources". REUR Technical Series 28, FAO, Rome, Italy, 104-107.
- Apel, K. et Hirt, H., 2004.** Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. *Annual Review of Plant Biology*, Vol. 55: 373-379.
- Arndt, S.K., Clifford, S.C., Wanek, W., Jones, H.G. et Popp, M., 2007.** Physiological and morphological adaptations of the fruit free *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress. *Tree Physiol.*, Vol. 21: 705 – 715.
- Aronson, J., 1985.** Economic halophytes: a global review. *Plants for arid lands.*, 12: 177-188.
- Arshad, M.J., Silvestre, E., Pinelli, J., Kallerhoff, M., Kaemmerer, A., Tarigo, M., Shahid, M., Guiresse, P., Pradere, C. et Dumat, C., 2008.** "A field study of lead phytoextraction by various scented *Pelargonium cultivars*." *Chemosphere*, Vol. 71 (11): 2187-2192.
- Ashraf, M., 2008.** Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotech Adv*, Vol. 27: 84–93.
- Ashraf, M. et Foolad, M.A., 2007.** Improving plant abiotic-stress resistance by exogenous application of osmoprotectants glycine betaine and proline *Environ. Exp. Bot.*, Vol. 59: 206-216.
- Ashraf, M., 2004.** Some important physiological selection criteria for salt-tolerance in plants. *Flora*, Vol. 199: 361-376.

- Attia, F., 2007.** Effet du stress salin sur le comportement écophysologique et la maturité phénologique de la vigne *Vitis vinifera* L. : Etude de cinq cépages autochtones midi-pyrénées. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 194 p.
- Aude, J.C., Gardarin, A., Chédin, S., Lagniel, G., Godat, E. et Catty, P., 2009.** Endoplasmic reticulum is a major target of cadmium toxicity in yeast. *Mol Microbiol.*, Vol. 76 (4): 1034-1048.
- Aurélie, M., 2009.** Réponses physiologiques de végétaux supérieurs aux stress métalliques. Caractérisation du rôle des parois cellulaires dans les stratégies défensives des cellules de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) face aux éléments traces métalliques. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université d'Artois, Faculté des Sciences Jean Perrin. Ecole Doctorale Biologie et Santé de Lille, France, 153 p.
- Aust, S.D., 1995.** Mechanisms of degradation by white rot fungi. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 103: 59-61.
- Azad, H.N., Shiva, A.H. et Malekpour, R., 2011.** Toxic Effects of Lead on Growth and Some Biochemical and Ionic Parameters of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Seedlings. *Current Research Journal of Biological Sciences*, Vol. 3 (4): 398-403.
- Azevedo, H., Glória Pinto, C.G., Fernandes, J., Loureiro, S. et Santos, C., 2005.** Cadmium Effects on Sunflower Growth and Photosynthesis. *J. Plant Nutr.* doi: 10. 1080/01904160500324782.
- Azza Mazher, A.M., Fatma El-Quesni, E.M. et Farahat, M.M., 2007.** Responses of ornamental plants and woody trees to salinity, *World Journal of Agricultural Science*, Vol. 3 (3): 386-395.
- Azzouz, F., 2011.** Effet de l'interaction plomb-salinité sur les réponses physiologiques et biochimiques d'une halophyte (*Atriplex halimus* L.) et d'une glycophyte (*Vicia faba* L.). Mémoire de magistère. Université Senia Oran Algérie, 65 p.
- Bagnouls, F. et Gausson, H., 1953.** Saison sèche et régime xérothermique. Documents pour les cartes des productions végétales Toulouse, Tome. III, Vol. 1 (8): 47-49.
- Baize, D. et Tercé, M., 2002.** Les éléments traces métalliques dans les sols (France), INRA. Editions, Paris, 565 p.
- Baize, D., 1997.** Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France), INRA. Editions, Paris, 408 p.
- Bajguz, A., 2011.** Suppression of *Chlorella vulgaris* growth by cadmium, lead, and copper stress and its restoration by endogenous brassinolide. *Arch Environ Contam Toxicol.*, Vol. 60: 406-416.
- Bajji, M., Kinet, J.M. et Lutts, S., 2002.** Osmotic and ionic effects of NaCl on germination, early seedling growth, and ion content of *Atriplex halimus* (*Chenopodiaceae*). *Can. J. Bot.*, Vol. 80: 297-304.
- Bajji, M., Kinet, J.M. et Lutts, S., 1998.** Salt stress effects on roots and leaves of *Atriplex halimus* L. and their corresponding callus cultures. *Plant Sci.*, Vol. 137: 131-142.
- Baker, A.J.M., 2000.** Metal-accumulating plants. In: Raskin I, Ensley, BD (Eds) *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. John Wiley & Sons, Inc, New York, 193-229.

- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D. et Smith, J.A.C., 2000.** Metal Hyperaccumulator Plants: A Review of the Ecology and Physiology of a Biological Resource for Phytoremediation of Metal Polluted Soils. In: N Terry, G Bañuelos (Eds.) Phytoremediation of Contaminated Soils and Waters. CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA, 85-107.
- Baker, A.J.M. et Walker, P.L., 1990.** Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In: Heavy metal tolerance in plants-Evolutionary aspects. Shaw, A. (Eds). CRC Press, 155-177.
- Baker, A.J.M. et Brooks, R.R., 1989.** Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology, 16 p.
- Baker, A.J.M., 1987.** Metal tolerance. *New Phytologist*, Vol. 106: 93-111.
- Baker, A.J.M., 1981.** Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, Vol. 3: 643-654.
- Balestrasse, K.B., Gallego, S.M., Benavides, M.P. et Tomaro, M.L., 2005.** Polyamines and proline are affected by cadmium stress in nodules and roots of soybean plants. *Plant and Soil*, Vol. 270: 343-353.
- Balsberg Pahlsson, A.M., 1989.** Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd and Pb) to vascular plants. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 47: 287-319.
- Banks, M., Schwab, A. et Henderson, C., 2006.** Leaching and reduction of chromium in soil as affected by soil organic content and plants. *Chemosphere*, Vol. 62: 255-264.
- Bañuelos, G.S., Shannon, M.C., Ajwa, H., Draper, J.H., Jordahl, J. et Licht, L., 1999.** Phytoextraction and accumulation of boron and selenium by poplar (*Populus*) hybrid clones. *Int. J. Phytoremediation*, Vol. 1 (1): 81-96.
- Bañuelos, G.S., Ajwa, H.A., Terry, N. et Zayed, A., 1997.** Phytoremediation of selenium laden soils: A new technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 52: 426-430.
- Banzet, N., Richaud, C., Deveaux, Y., Kazmaier, M., Gagnon, J. et Triantaphylides, C., 1998.** Accumulation of small heat shock proteins, including mitochondrial HSP22, induced by oxidative stress and adaptative response in tomato cells. *Plant Journal*, Vol. 13: 519-527.
- Baraud, F., 2002.** Interactive effect of cadmium and soil humates on metal acquisition and sequestration in wheat. *Environmental Chemistry*, Springer Publisher, 105-307.
- Barber, S.A., 1995.** Soil nutrient bioavailability, a mechanistic approach (2nd Ed.). Wiley-Interscience, New York, 414 p.
- Barceló, J., 1989.** Home-planta-medi ambient: una harmonia trencada (Model d'estudi planta metalls pesants). *Discurs d'Ingrés Reial Acadèmia de Farmàcia de Barcelona*. Servei Publicacions Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, 69 p.
- Barnea, M. et Ursu, P., 1974.** Pollution et protection de l'atmosphère. Ed. Eyrolles. Paris. 307 p.
- Barnhart, J., 1997.** Occurrences, uses, and properties of chromium. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Vol. 26: 53-57.
- Baroni, F., Boscagli, A., Protano, G. et Riccobono, F., 2000.** Antimony accumulation in *Achillea ageratum*, *Plantago lanceolata* and *Silene vulgaris* growing in an old Sb-mining area. *Environmental Pollution*, Vol. 109: 347-352.
- Barrow, J.R., 1997.** Natural asexual reproduction in fourwing saltbush *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. *Journal of aride environment*, Vol. 36: 267-270.

- Barrs, C. et Weatheley, P.E., 1968.** A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, Vol. 15: 413-428.
- Bartlett, R.J., 1991.** Chromium cycling in soils and water: links, gaps and methods. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 92: 17-24.
- Baszynski, T., Wajda, L., Krol, M., Wolinska, D., Krupa, Z. et Tukendorf, A., 1980.** Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants. *Physiol. Plant.*, Vol. 48: 365-370.
- Batanouny, K.H., 1993.** Eco physiology of halophytes and their traditional use in the Arab world. *Advanced Course on halophyte utilization in Agriculture*, 12 Sept., Agadir, Morocco.
- Baumer, M., 1991.** Trees as browse and to support animal production. *Proceedings of the FAO Expert Consultation-Legume trees and other fodder trees as protein sources for livestock. Held at the Malaysian Agricultural Research and Development Institute (MARDI) in Kuala Lumpur*, Edited by Andrew Speedy and Pierre-Luc Pugliese. Malaysia, October 1991, 14-18.
- Bazzaz, F.A., Carlson, R.W., et Rolfe, G.L., 1975.** "Inhibition of Corn and Sunflower Photosynthesis by Lead." *Physiologia Plantarum*, Vol. 34 (4): 326-329.
- Beaunier, L. Froment, M. Klein., J., 1990.** Surfaces, interfaces et films minces: Observation et analyse. *Dunod Bordas*, Paris, 65-107.
- Becker, W. et Kumplainen, J., 1991.** Contents of essential and toxic mineral Elements in Swedish Market-Baskets diets in 1987. *British Journal of Nutrition*, Vol. 66: 151-160.
- Belabass, D., 1994.** Essai comparatif de provenances de chene – Liège (*Quercus suber* L.): Etude des accroissements en hauteur. *Ann. Rech. For. Algérie*, 51-61.
- Belarbi, A., 2008.** Contribution à l'étude de l'absorption des métaux lourds (Plomb et Cuivre) par l'*Atriplex halimus* L. Mémoire de magister, option: Biotechnologies Végétales. Département d'Agronomie, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algérie, 96-105.
- Belfakih, M., Ibriz, M. et Zouahri, A., 2013.** Effet de la salinité sur les paramètres morphophysologiques de deux variétés de bananier (*Musa acuminata* L.). *Journal of Applied Biosciences*, Vol. 70: 5652-5662.
- Belkheiri, O., 2009.** Adaptabilité des espèces du Genre *Atriplex* aux conditions de Salinité Et d'aridité. Thèse de doctorat. *Universita Degli Studi Di Sassari*, 33-36.
- Belkhoudja, M. et Bidai, Y., 2004.** Réponse des graines d'*Atriplex halimus* L. à la salinité au stade de la germination. *Laboratoire de physiologie végétale, Université Senia Oran Algérie Sécheresse 2004*, Vol. 15 (4): 331-5.
- Belkhouja, M. et Benkabilia, M., 2000.** Proline of Faba bean (*Vicia faba*) under salt stress. *Egypt. J. Agric. Res.*, Vol. 78 (1): 185-195.
- Bellakhdar, J., 1997.** La pharmacopée marocaine traditionnelle. *Médecine arabe ancienne et savoirs populaires*. Ibis Press, ed., Paris.
- Bellows, A., 1999.** The praxis and production of food security: urban agriculture in Silesia, Thèse de doctorat. *Department of Geography. Pologne, New Brunswick (N-J, É-U), Rutgers University*, 61 p.
- Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., Sensoy, S., Boukhriss, S. et Abdullah, F., 2010.** Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree. *J. Agricult Food Chem.*, Vol. 58: 416-422.

- Ben Ahmed, H., Zid, E., El Gazzah, M. et Grignon, C., 1996.** Croissance et accumulation ionique chez *Atriplex halimus* L. Cahiers "Agricultures", Vol. 5 (5): 365-372.
- Ben Ayed, H., 1975.** Un outil pour l'aménagement pastoral des zones arides: les collections et les vergers à graines de plantes fourragères à El Grin. Bull infor INRF (Tunisie), Vol. 19: 1-9.
- Ben Khaled, L., Morte Gomez, A., Honrubia, M. et Oihaba, A., 2003.** Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le Rhizobium. Agronomie. Vol. 23 (7): 553-560.
- Ben M'hamed, M., 1990.** Forage shrubs in North Africa-Studies of the green Belt of North Africa, ALESCO, Tunis, Tunisie, 233 p.
- Ben Naceur, M., Ben Salem, M., Rouissi, M., El Berji, Z. et Rahmoune, C., 2001.** Influence du manque d'eau sur le comportement écophysiological de quatre variétés de blé dur. Annales de l'INRGEF., Vol. 5: 133-152.
- Ben Rebiha, F., 1987.** Contribution à l'étude de la germination de quelques espèces d'*Atriplex* locales et introduites. Thèse de Magister. Institut National d'Agronomie. Algérie. 119 p.
- Ben Salem, H., Abdouli, E.L., Nefzaoui, A., El-Mastouri, A. et Ben Salem, L., 2005.** Nutritive value, behaviour, and growth of Barbarine lambs fed on oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) and supplemented or not with barley grains or spineless cactus. Small Ruminant Research, Vol. 59: 229-237.
- Ben Salem, H., Nafzaoui, A. et Ben Saleni, L., 2002.** Supplementing spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) based diets with urea-treated straw or oldman saltbush (*Atriplex nummularia*). Effects on intake, digestion and sheep growth; Journal of Agricultural Science, Vol. 138: 85-92.
- Benabdeli, K. et Benmansour, S., 1998.** Protection de l'environnement. Quelques bases fondamentales. Appliquées et réglementaires. Université Djiïali Liabese de Sidi Bel-Abbes, Octobre 1998, 53-67.
- Benchâabane, A., 2000.** *Atriplex halimus* L. : source de bois de feu et de fourrage en milieu aride (cas de la région de Marrakech, Maroc). In: Gintzburger G., M. Bounejmate and A. Nefzaoui (Eds.). Fodder Shrub Development in Arid and Semi-arid Zones. Proceedings of the Workshop on Native and Exotic Fodder Shrubs in Arid and Semi-arid Zones, 27 October-2 November 1996, Hammamet, Tunisia. ICARDA, Aleppo (Syria), Vol. 2: 610-616.
- Benchâabane, A., 1997.** Biotechnologie et sécurité alimentaire. Cas de l'*Atriplex halimus* dans la production de viande de camelines et caprins dans la vallée de Drâa (Maroc). Dans: Actualité Scientifique: Biotechnologies, Amélioration des Plantes et Sécurité Alimentaire: Collection Universités Francophones. Ed. ESTEM, Paris, 169 p.
- Bendkhil, B. et Denden, M., 2012.** Effect of salt stress on growth, anthocyanins membrane permeability and chlorophyll fluorescence of okra (*Abelmoschus esculentus*) seedlings. American Journal of Plant Physiology, Vol. 7 (4): 174-183.
- Benhammou, N., Atik Bekkara, F. et Kadifkova Panovska, T., 2008.** Antioxidant and antimicrobial activities of the *Pistacia lentiscus* and *Pistacia atlantica* extracts. Afr. J. Pharm Pharmacol, Vol. 2 (2): 022-028.
- Benhamou, N. et Nicole, M., 1999.** Cell biology of plant immunization against microbial infection: the potential of induced resistance in controlling plant diseases. Plant Physiol Biochem, Vol. 37: 703-719.

- 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.
- Benrebaha, 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, Algérie, 5-20.
- Bensaid, S., 1985.** Contribution à la connaissance des espèces arbore-escentes, germination et croissance d'*Acacia radians*, thèse de magister. Ed institut national agronomique (I.N.A) EL Harrach Algérie, 70 p.
- Benton Jones, J., 1998.** Plant Nutrition Manual. CRC Press, 2000 Corporate Blvd., Boca Raton., 149 p.
- Berland, B. et Lassus, P., 1997.** Efflorescences toxiques des eaux côtières françaises: écologie, écophysiologie, toxicologie. Ifremer, 32-33.
- Berrow, M.L. et Burrige, J.C., 1991.** Inorganic Pollution and Agriculture ; MAFF reference book, N° 326, HMSO, London, 343-365.
- Bert, V., 2000.** Tolérance aux métaux lourds et accumulation chez *Arabidopsis halleri* (*Brassicaceae*). Thèse: Université des Sciences et Technologies de Lille, UFR de Biologie.
- Bert, V., Macnair, M.R., de Laguérie, P., Saumitou-Laprade, P. et Petit, D., 2000.** Zinc tolerance and accumulation in metallicolous and non metallicolous populations of *Arabidopsis halleri* (*Brassicaceae*). New Phytol., Vol. 146: 225–233.
- 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, 154 p.
- Berthelin, J. et Leyval, C., 2000.** Contamination des milieux par les éléments en traces. Les conséquences sur les sols les eaux superficielles. Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France, Vol. 86: 25-37.
- Berti, W.R. et Cunningham, S.D., 2000.** Phytostabilization of metals, || in Phytoremediation of Toxic Metals—Using Plants to Clean Up the Environment, I. Raskin and B. D. John Wiley & Sons, New York, NY, USA. Ensley, Eds, 71–88.
- Bertrand, P., 2008.** Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba*. Thèse de doctorat, Ecotoxicologie. Institut National Polytechnique de Toulouse. Ecole doctorale: Sciences Ecologiques Vétérinaires Agronomiques et Bioingénieries. 2008, 156-158.
- Bhardwaj, P., Chaturvedi, A.K. et Prasad, P., 2009.** Effect of enhanced lead and cadmium in soil on physiological and biochemical attributes of *Phaseolus vulgaris* L. Nature and Science, Vol. 7 (8): 63-75.
- Bhattacharjee, S., De B Mukherjee, A.K. et Charles, G., 1996.** Lead and cadmium mediated membrane damage in rice. I. Elec-trolyte leakage, injury index, membrane lipid peroxydation and lipoxygenase activity. J. ecotoxic. env. monit., Vol. 6 (1): 3-6.
- Biocchi, S., 1998.** Les polluants et techniques d'épuration des fumées: Cas des unités de destruction thermique des déchets. RECORD. Paris (France) Tch et Doc, 188 p.

- Bidel, L.P.R., Coumans, M., Baissac, Y., Doumas, P. et Jay-Allemand, C., 2010.** Biological Activity of Phenolics in Plant Cells, Recent Advances in Polyphenol Research, Wiley-Blackwell, 163-205.
- Birley, M.H. et Lock, K., 1999.** Health and peri-urban natural resource production. Environment and Urbanisation, Vol. 10 (1): 89-106.
- Biteur, N., 2012.** Essais d'utilisation du radis (*Raphanus sativus*) dans la phytoremédiation (biodépollution) au niveau du sol contaminé par les métaux lourds (plomb): Etude du stress oxydatif et quelques paramètres enzymatiques. Thèse de Doctorat. Laboratoire de Biotoxicologie Expérimentale, Biodépollution et de phytoremédiation, Vol. 18: 19-79.
- Biteur, N., Aoues, A., Kharoubi, O. et Sliman, M., 2011.** Oxidative Stress Induction by Lead in Leaves of Radish (*Raphanus sativus*) Seedlings University of Science and Technology Mohamed BOUDIAF Oran (USTOMB), Department of Molecular Genetic Applied, Laboratory of Biochemistry and Molecular Biology; Algeria. Not Sci Biol, Print ISSN 2067-3205; Electronic 2067-32642011, Vol. 3 (4): 93-99.
- Bizily, S.P., Rugh, C.L., Summers, A.O. et Meagher, R.B., 1999.** Phytoremediation of methylmercury pollution: merb expression in *Arabidopsis thaliana* confers resistance to organomercurials. Proc Natl Acad Sci USA, Vol. 96: 808-813.
- Blaauboer, B.M., 1996.** Biotransformation: detoxication and bioactivation. In: Toxicology: Principles and Applications, M. A. Hollinger, Eds (Boca Raton, Florida: CRC Press), 41-61.
- Blaize Denis, D., 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols de France, éd. INRA.
- Blake G., Kaigate, B., Fourcy, A. et Boutin, C., 1987.** Incorporation of cadmium by water hyacinth. Wat. Sci. Tech., Vol. 9: 123-128.
- Blanchard, C., 2000.** Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Thèse: Ecole Doctorale de Chimie de Lyon.
- Blaylock, M. et Huang, J., 2000.** Phytoextraction of Metals. In: Raskin I, Ensley B (Eds) Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. Wiley Interscience, New York, 53-70.
- Blaylock, M.J., Salt, D.E., Dushenkov, S., Zakharova, O. et Gussman, C., 1997.** Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents; Environ. Sci. Technol., Vol. 31: 860-65.
- Bluskov, S., Arocena, J.M., Omotoso, O.O. et Young, J.P., 2005.** Uptake, distribution, and speciation of chromium in *Brassica Juncea*. International Journal of Phytoremediation, Vol. 7: 153-155.
- Bock, B., 2009.** *Atriplex halimus* L: épinards de mer; Tela Botanica, 3 p.
- Boloniaz, J. et Bulinski, R., 1984.** Effect of dust emission in the area of steel and electric power plants on various trace elements contents of selected vegetables and fruit In: lead, cadmium, zinc, nickel and iron contents of vegetables. Rocznik Panstw Zakl Hig., Vol. 35: 29-35.
- Bonnet, M., Camares, O. et Veisseire, P., 2000.** Effect of Zinc and influence of *Acremonium lolli* on growth parameters, chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activity of ryegrass. Exp Bot., Vol. 51: 945-953.
- Bonnier, G. et Douin, R., 1996.** La grande flore en couleur. In: *Atriplex* In Vivo: Bulletin de Liaison du Réseau de Coopération sur l'*Atriplex*, N°2, octobre 1996.

- Booth, D.T., Gores, J.K., Schumlan, G.E. et Olson, R.A., 1999.** Shrub densities on prereclaimed mine lands in Wyoming. *Restoration Ecology*, Vol. 7: 24-32.
- Borovik, A.J., 1990.** Characteristics of metals in biological systems. In AJ Shaw (Ed.), *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects: 3-5*. CRC Press: Boca Raton, Floride, USA.
- Boublenza, F., 2012.** Etude du stress osmotique chez des lactocoques isolés de lait de chamelle de Timimoun. Thèse de Doctorat. Laboratoire de Microbiologie appliquée, 150-154.
- Bouchoukh, I., 2010.** Comportement éco-physiologique de deux *Chénopodiacées* des genres *Atriplex* et *Spinacia* soumises au stress salin. Mémoire de magistère en Ecophysiologie et Biotechnologie Végétale. Université Mentouri – Constantine, Algérie, Vol. 103 (38): 91-92.
- Bouhadi, M., 2002.** Contribution à l'étude phytochimique d'*Atriplex halimus* L. (*Chénopodiacées*). Thèse de Magister en écophysiologie végétale. Université d'Oran Es-Senia, 98 p.
- Bourel, P.H. et Berthelin, J., 1998.** Contamination des sols par les éléments en traces: les risques et leur gestion. Académie des sciences, Lavoisier Technique et Documentation, Paris, 440 p.
- Bouzi, S., 2009.** Étude de l'effet de la salinité et de la présence du molybdène sur le comportement éco-physiologique de deux variétés de plantes de l'espèce *Phaseolus vulgaris* L. . Mémoire de Magistère. Ecophysiologie et Biotechnologie Végétale. Université Mentouri Constantine, 108 p.
- Bouzoubaa, Z., El Mourid, M., Karrou, M. et El Gharous M., 2001.** Manuel d'analyse chimique et biochimique des plantes. Eds INRA Maroc.
- Boyajian, G.E. et Carreira, L.H., 1997.** Phytoremediation: a clean transition from laboratory to marketplace Na. *Biotechnol.*, Vol. 15: 127-128.
- Boyd, R.S., 1998.** Hyperaccumulation as a plant defensive strategy. In BROOKS, R. R. *Plant that hyperaccumulate heavy metals*. Wallingford: CAB International, 181-201.
- Boyd, R.S. et Martens, S.N., 1998.** The significance of metal hyperaccumulation for biotic interactions. *Chemoecology*, Vol. 8: 1-7.
- Brady, K.U., Krukeberg, R. et Bradshaw, J.R.H.D., 2005.** Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, Vol. 36: 243-266.
- Breckle, S.W. et Kahle, H., 1992.** Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.). doi: 10. 1007/BF00031914. *Vegetatio*, Vol. 101: 43–53.
- Brett, H.,R., Marc L., Daniel P., Robert R.B., John H.K. et Paul E.H.G., 1998.** The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils. *Plant and soils*, 10 p.
- Briat, J.F. et Lebrun, H., 1999.** Plant responses to metal toxicity. *C. R. Acad. Sci. III*, Vol. 322: 43-54.
- Broadhurst, C.L., Chaney, R.L., Angle, J.S., Erbe, E.F. et Maugel, T.K., 2004.** Nickel localization and response to increasing Ni soil levels in leaves of the Ni hyperaccumulator *Alyssum murale* "kotodesh". *Plant and Soil Journal*, Vol. 265: 225-242.
- Broda, P., Birch, P., Brooks, P., Copa-Patinio, J.L., Sinnott, M.L., Tempelaars, C., Wang, Q., Wyatt, A. et Sims, P., 1994.** *Phanerochaete chrysosporium* and its natural substrate. *FEMS Microbiology Reviews*, Vol. 13: 189-195.

- Brooks, R.R., 1998.** Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. (ed.) CAB International, Wallingford, UK, 380 p.
- Brooks, R.R., Chambers, M.F., Nicks, L.J. et Robinson, B.H., 1998.** Phytomining. Trends in Plant Science, Vol. 3: 359-362.
- Brosché, M., Merilo, E., Mayer, F., Pechter, P., Puzõrjova, I., Brader, G., Kangasjärvi, J. et Kollist, H., 2010.** Natural variation in ozone sensitivity among *Arabidopsis thaliana* accessions and its relation to stomatal conductance. Plant Cell Environ, Vol. 33: 914–925.
- Brown, G.G., Barois, I. et Lavelle, P., 2000.** Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. Eur. J. Soil Biol., Vol. 36: 177–198.
- Bruce, E. et Pivetz, A., 2001.** Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. Ground Water Issue. Office of Solid Wasteand Emergency Response. Office of Research and Development United States Environmental Protection Agency. EPA/540/S-01/500 February 2001, 1-5.
- Brugnoli E. et Lauteri M., 1991.** Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity and carbon isotope discrimination of salt tolerant (*Gossypium birsutum* L.) and salt sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C3 non halophytes. Plant physiol., Vol. 95: 628-635.
- Brunet, J., Repellin, A., Varrault, G., Terryn, N. et Zuily-Fodil Y., 2008.** Lead accumulation in the roots of grass pea (*Lathyrus sativus* L.): a novel plant for phytoremediation systems? C. R. Biol., Vol. 331: 859–864.
- Buffle, J., 1988.** Complexation reactions in aquatic systems: An analytical approach. New York, Ellis Horwood, John Wiley and Sons, 692 p.
- Cabello-Hurtado, F. et Ramos, J., 2004.** Isolation and functional analysis of the glycerol permease activity of two nodulin-like intrinsic proteins from salt stressed roots of the halophyte *Atriplex nummularia*. Plant Science, Vol. 166: 633–640.
- Cakmak, I., Welch, R.M., Hart, J., Norvell, W.A., Oztirk, L. et Kochian. L.V., 2000.** Uptake and translocation of leaf-applied cadmium (¹⁰⁹Cd) in diploid, tetraploid and hexaplois wheats. J. Exp. Bot., Vol. 51: 221–226.
- Calgaroto, N.S., Castro, G.Y., Cargnelutti, D., Pereira, L.B., Gonçalves, J.F., Rossato, L.V., Antes, F.G., Dressler, V.L., Flores, E.M.M., Schetinger, M.R.C. et Nicoloso, F.T., 2010.** Antioxidant system activation by mercury in *Pfaffia glomerata* plantlets. Biometals, Vol. 23: 295-305.
- Callot, G., Chamayou, H., Bullock, P. et Murphy, C.P., 1984.** Observations de concentrations argileuses dans les structures racinaires au cours des transformations pédologiques. C. R. Acad. Sc. Paris, Vol. 299 (12): 825-830.
- Cannon, H., 1960.** Botanical prospecting for ore deposits. Science, Vol. 132: 591-598.
- Carreira, L.H. et Wolfe, N.L., 1996.** Isolation of a sediment nitroreductase, antibody production, and identification of possible plant sources. Presented at IBC international symposium phytomedicine, Arington, V Phytoremediation Protocols: An Overview. Environmental Chemistry and Toxicology. Paper in Internal Review.
- Cary, E.E. et Kubota, J., 1990.** Chromium concentration in plants: effect of soil chromium concentration and tissue contamination by soil. J. Agric. Food Chem., Vol. 25 (2): 300-304.

- Cary, E.E., Allaway, W.H. et Olson, O.E., 1977.** Control of chromium concentrations in food plants. 1. Absorption and translocation of chromium by plants. *Journal of Agricultural Food and Chemistry*, Vol. 25: 300-304.
- Castroviejo, S., Lainz, M., Lopez Gonzalez, G., Montserrat, P., Munoz Garmendia, F., Paiva, J. et Villar, L., 1990.** In: *Flora Iberica Plantanaceae-Plumbaginaceae (partim)*, vol. 2, Real Jardin Botanico, Ed, CSIC, Madrid, 503-513.
- Cataldo, D.A., Harvey, S.D., Fellows, R.J., Bean, R.M. et McVetty, B.D., 1989.** An evaluation of the environmental fate and behavior of munitions materiel (TNT, RDX) in soil and plant systems. U. S. Army Medical Research and development Command. Fort Detrick, MD.
- Cecchi, M., 2008.** Devenir du plomb dans le système sol-plante. Cas d'un sol contaminé par une usine de recyclage du plomb et de deux plantes potagères (Fève et Tomate). Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. 2008, Vol. 215: 12-35.
- Cemagref, A., 1983.** Régénération artificielle des chênes, note Technique N°50.
- Cervantes, C., Campos-Garcia, J., Devars, S., Gutierrez-Corona, F., Loza-Tavera, H., Torres-Guzman, J.C. et Moreno-Sanchez, R., 2001.** Interactions of chromium with microorganisms and plants. *FEMS Microbiology Reviews*, Vol. 25: 335-347.
- Chaar, H. et Colin, F., 1999.** Impact of late on leight growth in yong sessile oak regenerations. *Ann. For. Sci.*, Vol. 56: 417-429.
- Chaignon, V., 2001.** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse: Ecole doctorale, Sciences de l'Environnement: Système Terre, Université d'Aix-Marseille.
- Chaîneau, C.H., Morel, J.L. et Oudot, J., 2000.** Biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize, *Journal of environmental quality*, Vol. 29: 569-578.
- Chaîneau, C.H., Morel, J.L. et Oudot, J., 1995.** Microbial degradation in soil microcosms of fuel oil hydrocarbons from drilling cuttings. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 29: 1615-1626.
- Chalbi, N., Bezzaouia, M.A. et El Gazzah, M., 1997.** Résultats préliminaires sur le polymorphisme morphogénétique et la répartition des populations naturelles de l'espèce *Atriplex halimus* en Tunisie, in: *Étude de la diversité biologique de l'Atriplex halimus pour le repérage in vitro et in vivo d'individus résistants à des conditions extrêmes du milieu et constitution de clones*, Rapport annuel du projet STD3 no TS 3 CT 940264, Paris, 12 p.
- Chamard, P., 1993.** Environnement et développement. Références particulières aux états sahéliens membres du CCILS. *Rev. Sécheresse*, 4 p.
- Chandra, R., Yadav, S., Bharagava, R.N. et Murthy, R.C., 2008.** Bacterial pretreatment enhances removal of heavy metals during treatment of post-methanated distillery effluent by *Typha angustata* L. *J Environ Manage.*, Vol. 88 (4): 1016-1024.
- Chaney, R.L., Angle, J.S., Baker, A.J.M. et Li, Y.M., 1998.** Method for phytomining of nickel, cobalt and other metals from soil. U. S. Patent, Vol. 5: 711-784.
- Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S. et Baker, A.J.M., 1997.** Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 8: 279-284.
- Chanwitheesuk, A., Teerawutgulrag, A. et Rakariyatham, N., 2005.** Screening of antioxidant activity and antioxidant compounds of some edible plants of Thailand. *Food Chemistry*, Vol. 92: 491-497.

- Chapman, V.J., 1954.** The influence of salts upon the terrestrial halophytes. VII conger Int. Bot. Rappports et communications, Vol. 7 (8): 1994-2000.
- Chappuis, P., 1991.** Les oligoéléments en médecine et biologie. Lavoisier Tee & Doc Palis.
- Chardonens, A.N., Koevoets, P.L.M., Van Zanten, A., Schat, H. et Verkleij, J.A.C., 1999.** Properties of enhanced tonoplast zinc transport in naturally selected zinc-tolerant *Silene vulgaris*. Plant Physiology, Vol. 120: 779-785.
- Charles, M.T., Goulet, A. et Arul, J., 2008.** Physiological basis of UV-C induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit IV. Biochemical modification of structural barriers. Postharvest Biol Tec., Vol. 47: 41-53.
- Chatterjee, C., Dube, B.K., Sinha, P. et Srivastava, P., 2004.** Detrimental effects of lead phytotoxicity on growth, yield, and metabolism of rice. Commun Soil Science Plant Anal., Vol. 35 (1-2): 255-265.
- Chatterjee, J. et Chatterjee, C., 2000.** Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower Environmental Pollution, Vol. 109: 69-74.
- Cheikh M'hamed, H., Abdellaoui, R., Kadri, K., Ben naceur, M. et Bel hadj, S., 2008.** Evaluation de la tolerance au stress salin de quelques accessions D'orge (*Hordium vulgare* L.) Cultivees en tunisie. Sciences & Technologie, Vol. 28: 30-37.
- Chen, L., Long, X.H., Zhang, Z.H., Zheng, X.T., Rengel, Z. et Liu, Z.P., 2011.** Cadmium Accumulation and Translocation in Two Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) Cultivars. Pedosphere, Vol. 21: 573-580. doi:10.1016/S1002-0160(11)60159-8.
- Chen, J., Zhu, C., Li, L.P., Sun, Z.Y. et Pan, X.B., 2007.** "Effects of exogenous salicylic acid on growth and H₂O₂-metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress. " Journal of Environmental Sciences, Vol. 19 (1): 44-49.
- Chen, Y.X., Lin, Q., Luo, Y.M., He, Y.F., Zhen, S.J., Yu, Y.L., Tian, G.M. et Wong, M.H., 2003.** The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil, Chemosphere, Vol. 50: 807-811.
- Cheng, S., 2003.** Effects of heavy metals on plants and resistance mechanisms. Environmental Science and Pollution Research, Vol. 10 (4): 256-264.
- Cheng, J. et Wong, M.H., 2002.** Effects of earthworms on Zn fractionation in soils. Biol Fertil Soils, Vol. 36: 72-78.
- Chisci, G.C., Bazzoffi, P., Pagliai, M., Papini, R., Pellegrini, S. et Vignozzi, N., 2001.** Association of *Sulla* and *Atriplex* shrub for the physical improvement of clay soils and environmental protection in central Italy. Agricultural Ecosystems and Environment, Vol. 84, 45-53.
- Chisci, G., Stringi, L., Martinez, V., Amato, G. et Gristina, L., 1991.** Rúala degli arbusto foraggeri nell' ambiente semi árido siciliano: 2-Funzione protectiva contero l'erosione idrometeorica. Riv. Di. Agron., Vol. 25: 332-340.
- Chlopecka, A. et Adriano, D.C., 1997.** Influence of zeolite, apatite and Fe-oxide on Cd and Pb uptake by crops. Science of The Total Environment, Vol. 207: 195-206.
- Chon, H.T., Ahn, J.S. et Jung, M.C., 1998.** Seasonal variations and chemical forms of heavy metals in soils and dusts from the satellite cities of Seoul, Korea. Environ. Geochem. Health, Vol. 20: 77-86.

- Choudhury, B., Mitra, S. et Biswas, A.K., 2010.** Regulation of sugar metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings under arsenate toxicity and its improvement by phosphate. *Physio Mol Bio Plants*, Vol. 16 (1): 59-68.
- Choukr Allah, R., Hamdy, A. et Lahmer, F.Z., 1997.** Germination d'*Atriplex halimus* dans des milieux salés. International Conference on Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the mediterranean region, IAM Valenzano Bari (Italy), 22-26 September 1997, 209 p.
- Choukr-Allah, R., 1991.** Agricultural management of salt-affected areas. Ed: Proc. Int. Conf. Morocco, 377-386.
- Chugh, I.K. et Sawhney, S.K., 1999.** Effect of cadmium on activities of some enzymes of glycolyse and pentose phosphate pathway in pea. *Biol. Plant*, Vol. 42: 401-407.
- Chunyang, L., 2003.** Differences in drought responses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muell. populations. Uni of Helsinki. Finland. *Forest Ecology and Management*, Vol. 179: 377-385.
- Cibils, A.F., Swift, D.M. et McArthur, E.D., 1998.** Plant-herbivore interactions. In: *Atriplex: current state of knowledge*. US Department of Agriculture, Forest Service General Report RMRS-GTR-14, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins CO, USA.
- Clemens, S., Palmgren, M.G. et Kramer, U., 2002.** A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends. Plant. Sci.*, Vol. 7: 309-315.
- Clemens, S., Kin, E. J., Newman, D. et Schroeder, J. I., 1999.** Tolerance to toxic metals by a gene family of phytochelatin synthases from plants and yeast. *EMB. J.*, Vol. 18: 3325-3333.
- Clifford, S.C., Arndt, S.K., Corlett, J.E., Joshi, S., Sankhla, N., Popp, M. et Jones, H.G., 1998.** The role of solute accumulation, osmotic adjustment and changes in cell wall elasticity in drought tolerance in *Ziziphus mauritiana* (Lamk.). *J Exp Bot.*, Vol. 49: 967-977.
- Cohen, M.D., Prophete, C., Sisco, M., Chen, L. et Zelikoff, J.T., 2006.** Pulmonary immunotoxic potentials of metals are governed by select physicochemical properties: chromium agents. *Journal of Immunotoxicology*, Vol. 3: 69-81.
- Coic, Y. et Coppenet, M., 1989.** Les oligo-elements en agriculture et élevage. INRA, Paris, 114 p.
- Colinet, G., 2003.** Eléments traces métalliques dans les sols. Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge. Thèse de doctorat FUSAGX, 412 p.
- Côme, D., 1970.** Les obstacles de la germination. Ed Masson et Cie Paris, 162 p.
- Corgie, S.C., Beguiristain, T. et Leyval, C., 2004.** Spatial distribution of bacterial communities and phenanthrene degradation in the rhizosphere of *Lolium perenne* L. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 70: 3552-3557.
- Cornish, J.E., Goldberg, W.C., Levine, R.S. et Benemann, J.R., 1995.** Phytoremediation of soils contaminated with toxic elements and radionuclides. In R. E., Hinchee, J. L. Means, and D. R. Burris (Eds.), *Bioremediation of Inorganics*. Battelle Press, Columbus, OH., 55-63.
- Correal, E., Otal, J. et Sotomayor, J.A., 1990.** Utilization of sheep on oldman saltbush (*Atriplex nummularia*): palatability, browse efficiency, voluntary intake and chemical composition. In: "6th Meeting of FAO European Sub-network on Mediterranean Pastures and Fodder Crop". October, 17-19, Bari (Italy), 148-152.

- Cosio, C., Martinoia, E. et Keller, C., 2004.** Hyperaccumulation of cadmium and zinc in *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri* at the leaf cellular level. *Plant Physiol.*, Vol. 134: 716-725.
- Costa, G. et Spitz, E., 1997.** Influence of cadmium on soluble carbohydrate, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus*. *Plant Sci.*, Vol. 128: 131-140.
- Coullery, P., 1997.** Gestion des sols faiblement pollués par des métaux lourds. *Revue Suisse d'Agriculture*, Vol. 29: 299-305.
- Crid, A., 1992.** Environnement et développement. Les nouvelles synergies, 80 p.
- Cunningham, S.D., Shann, J.R., Crowley, D.E. et Anderson, T.A., 1997.** Phytoremediation of contaminated water and soil. In E. L. Kruger, T. A. Anderson, & J. R. Coats (Eds.), *Phytoremediation of soil and water contaminants*. ACS Symposium series 664 Washington, DC: American Chemical Society, 2-19.
- Cunningham, S.D. et Ow, D.W., 1996.** Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiology*, Vol. 110: 715-719.
- Dabouineau, L., Lamy, Y. et Collas, P., 2005.** phytoremediation et phytorestauration ou l'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. *Rôle d'eau*, Vol. 124: 8-15.
- Dahmani-muller, H., Van Oort, F., Gelie, B. et Balabane, M., 1999.** Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. *Environmental Pollution*, Vol. 109: 1-8.
- Dajoz, R., 1985.** Précis d'écologie. BORDAS, Paris, 130-132.
- Dameron, C. et Howe P.D., 1998.** Copper Environmental Health criteria N°200, World Health Organization. Geneva.
- Dan wang, D., Heckathorn, S.A., Wang, X.Z. et Philpott, S.M., 2012.** A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO₂. *Oecologia*, Vol. 169: 1-13. doi:10.1007/s00442-011-2172-0.
- Das, P., Samantaray, S. et Rout, R., 1998.** Studies on cadmium toxicity in plants: A review. *Environ. Pollut.*, 98 (1): 29-31.
- Davies, F.T., Puryear, J.D., Newton, R.J., Egilla, J.N. et Grossi, J.A.S., 2002.** *Mycorrhizal fungi* increase chromium uptake by sunflower plants: influence on tissue mineral concentration, growth, and gas exchange. *J. Plant Nutr.*, Vol. 25: 2389-2407.
- Davis, L.C., Vanderhoof, S., Dana, J., Selk, K., Smith, K., Goplen, B. et Erickson, L.E., 1998.** Movement of chlorinated solvents and other volatile organics through plants monitored by Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry. *J Hazardous Subst Research*, Vol. 1: 4-26.
- De Abreu, I.N. et Mazzafera, P., 2005.** Effect of water and temperature stress on the content of active constituents of *Hypericum brasiliense* Choisy. *Plant Physiol Biochem*, Vol. 43: 241-248. doi:10.1016/j.plaphy.2005.01.20.
- De Knecht, J.A., Koevoets, P.L.M., Verkleij, J.A.C. et Ernst, W.H.O., 1992.** Evidence against a role for phytochelatins in naturally selected increased cadmium tolerance in *Silene Vulgaris* (Moench) Garcke. *New Phytologist*, Vol. 122: 681-688.

- De Souza, M.P., Chu, D., Zhao, M., Zayed, A.M., Ruzin, S.E., Schichnes, D. et Terry. N., 1999.** “Rhizosphere Bacteria Enhance Selenium Accumulation and Volatilization by Indian Mustard”. *Plant Physiol.*, Vol. 119: 565-574.
- De, B. et Mukherjee, A.K., 1998.** Mercury induced metabolic changes in seedlings and cultured cells of tomato. *Geobios.*, Vol. 23: 83-88.
- Dec, J. et Bollag, J.M., 1994.** Use of plant material for the decontamination of water polluted with phenols. *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 44: 1132-1139.
- Del Rio-Celestino, M., Font, R., Moreno-Rojas, R. et De Haro-Bailon, A., 2006.** Uptake of lead and zinc by wild plants growing on contaminated soils. *Industrial Crops and Products*, Vol. 24: 230-237.
- Demiral, T. et Türkan, I., 2005.** Exogenous glycinebetaine affects growth and proline accumulation and retards senescence in two rice cultivars under NaCl stress. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 14: 151-156.
- Denaeyer-De Smet, S. et Duvigneaud, P., 1974.** Accumulation de métaux lourds toxiques dans divers écosystèmes terrestres pollués par des retombées d’origine industrielle. *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique*, Vol. 107: 147–156.
- Denden M., Bettaieb, T., Salhi, A. et Mathlouthi, M., 2005.** Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales, *Tropicultura*, Vol. 23 (4): 220-225.
- Deneux-Mustin, S., Roussel-Debet, S., Mustin, C., Henner, P., Munier-Lamy, C., Colle, C., Berthelin, J., Garnier-Laplace, J. et Leyval, C., 2003.** Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces: influence des micro-organismes du sol. *TEC & DOC*, Paris.
- Deng, H., Ye, Z.H. et Wong, M.H., 2006.** Lead and zinc accumulation and tolerance in populations of six wetland plants. *Environmental Pollution*, Vol. 141 (1): 69-80.
- Deng, H., Ye, Z.H. et Wong, M.H., 2004.** Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental Pollution*, Vol. 132 (1): 29-40.
- Derefeye, P., Edelin, C. et Jaeger, M., 1989.** La modélisation de la croissance des plantes, la recherche N° 207, 159-167.
- Desjardin, V., Bayard, R., Huck, N., Manceau, A. et Gourdon R., 2002.** Effect of microbial activity on the mobility of chromium in soils. *Waste Management*, Vol. 22: 195-200.
- Devi, S.R. et Prasad, M.N.V., 1999.** Membrane lipid alterations in heavy metal exposed plants. In: Prasad, M. N. V. & Hagemayer, J. (Eds.). *Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, 99-116.
- Di Benedetto, M., 1997.** Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation. Dossier SAM 1997. Les métaux lourds. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 49 p.
- Di Cagno, R., Guidi, L., Stefani, A. et Soldatini, G.F., 1999.** Effects of cadmium on growth of *Helianthus annuus* seedlings: Physiological aspects. *New Phytol.*, Vol. 144: 65–71. doi:10.1046/j.1469-8137.1999.00497.x.

- Diego, A., Morenoa, A., Gemma V., Maria, T., Sorianob, S., Nicolas C. et Luis R., 2004.** Sulfur, chromium, and selenium accumulated in Chinese cabbage under direct covers a Departamento de Fisiologia Vegetal, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Fuentenueva S/N, E-18071, Granada, Spain Departamento Horticultura, C.I.F.A. Camino de Purchil S/N-Apdo. 2027, 18004 Granada, Journal of Environmental Management, Vol. 74: 89–96.
- Dietz, K.J., Schramm, M., Lang, B., Lanzl-Schramm, A., Dürr, C., et Martinoia, E., 1999.** Characterization of the epidermis from barley primary leaves. II. The role of the epidermis in ion compartmentation. *Planta*, Vol. 187: 431-437.
- Dinakar, N., Nagajyothi, P.C., Suresh, S., Udaykiran, Y. et Damodharam, T., 2008.** Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedlings. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 20: 199-206.
- Dixon, R.A. et Paiva, N.L., 1995.** Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *Plant Cell*, Vol. 7: 1085–1097.
- Djeddi, H., 2006.** Utilisation des eaux d'une station d'épuration pour l'irrigation des essences forestières urbaines. Mémoire de Magistère. Laboratoire d'Ecologie végétale. Université Mentouri Constantine, 92 p.
- Djerroudi-Zidane, O., Belkhodja, M., Bissati, S. et Hadjadj, S., 2010.** Effet du Stress Salin sur l'accumulation de proline chez deux espèces d'*Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. *European Journal of Scientific Research.*, Vol. 41 (2): 248-259.
- Dong, H., Gao, W., Yan, F., Ji, H. et Ju, H., 2010.** Fluorescence resonance energy transfer between quantum dots and graphene oxide for sensing biomolecules. *Anal. Chem.*, Vol. 82: 5511-5517.
- Dong, J., Wu, F. et Zhang, G., 2006.** Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere*, Vol. 64: 1659–1666. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.01.030.
- Dong, Y., Ma, L.Q. et Rhue, R.D., 2000.** Relation of enhanced Pb solubility to Fe partitioning in soils. *Environmental Pollution*, Vol. 110: 515-522.
- Dou, Z.X., 1988.** Lead pollution in soil and its effect on plants. *Agro Environ Protect.*, Vol. 7 (3): 38-39.
- Douglas, H. et Lee, K., 1972.** Metallic contaminants and human health. Academic press New York and London.
- Dreier, W. et Goring, M., 1974.** Dereim slushoher solz kongentrasion en aies verschideu physiologcshe parametr van-mais wrzeln wiss. Z. Drh. Berlin Nath. Natur wiss R., Vol. 23 : 641-4.
- Dubey, R.S. et Singh, A.K., 1999.** Salinity induces accumulation of soluble sugars and alters the activity of sugar metabolizing enzymes in rice plants. *Biol. Plant.*, Vol. 42: 233-239.
- Dugé de Bernville, T., 2009.** Caractérisation histologique, moléculaire et biochimique des interactions compatible et incompatible entre *Erwinia amylovora*, agent du feu bactérien, et le pommier (*Malus x domestica*). Thèse de Doctorat. Univ d'Angers, 2016 p.
- Duh, P.D., 1999.** Antioxidant activity of water extract of four Harng Jyur (*Chrysanthemum morifolium* Ramat) varieties in soybean oil emulsion. *Food Chem*, Vol. 66: 471–476.

- Dumat, C., Quenea, K., Bermond, A., Toinen, S. et Benedetti, M.F., 2006.** A study of the trace metal ion influence on the turn-over of soil organic matter in various cultivated contaminated soils. *Environmental Pollution*, Vol. 142: 521-529.
- Dupont, F. et Guignard, J.L., 2007.** Abrèges botanique systématique moléculaire. 14ème édition révisée, Masson.
- Dushenkov, S. et Kapulnik, Y., 2000.** Phytofiltration of metals. In: RASKIN, I. and Ensley, B. D. eds. *Phytoremediation of toxic metals-using plants to clean-up the environment*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 89-106.
- Dushenkov, V., Kumar, P.B.A.N., Motto, H. et Raskin, I., 1995.** Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science and Technology*, Vol. 29: 1239-1245.
- Duthil, A., 1973.** Elément d'écologie et d'agronomie, Tome III. Edition, J. B. Ballière, Paris, 635p.
- Dutuit, P., 1999.** Etude de la diversité biologique de l'*Atriplex halimus* par le repérage in vitro et in vivo d'individus résistants à des conditions extrêmes du milieu et constitution de clones. Université de Paris-Sud. CTA. Contrat TS3. CT94., Vol. 264: 138-141.
- Dutuit, P., Pourrat, Y. et Dodeman, V. L., 1991.** Stratégie d'implantation d'un système d'espèces adaptées aux conditions d'aridité du pourtour méditerranéen. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, 65-73.
- Ebbs, S., Lau, I., Ahner, B. et Kochian, L., 2002.** Phtochelatin synthesis is not responsible for Cd tolerance in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (J. & C. Presl). *Planta*, Vol. 214: 635-640.
- Edward, G., Rene, T., Seiichi, M., Kevin, F. et John, B., 1997.** Water use, productivity and forage quality of the halophyte *Atriplex nummularia* grown on saline waste water in a desert environment. *Journal of Arid Environments*, Vol. 38 (1): 45-62.
- Edwards, N.T., 1986.** Uptake, translocation and metabolism of anthracene in bush bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Environ. Toxicol. Chem.*, Vol. 5: 659-65.
- Ekmecki, Y., Tanyolac, D. et Ayhan, B., 2008.** Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. *Journal of Plant Physiology*, Vol. 165: 600-611.
- El Jaafari, S., 2000.** Durum wheat breeding for abiotic stresses résistance: defining physiological traits and criteria. *Options méditerranéennes*, Vol. 40: 251-256.
- El Midaoui, M., Benbella, M., Aït Houssa, A., Ibriz, M. et Talouizte, A., 2007.** Contribution à l'étude de quelques mécanismes d'adaptation a la salinité chez le tournesol cultivé (*Helianthus annuus* L.). *Revue Hommes Terre et Eaux*, Vol. 136: 29-34.
- Elfeel, A.A. et Bakhashwain, A.A., 2012.** Salinity effects on growth attributes mineral uptake, forage quality and tannin contents of *Acacia saligna* (Labill.) H. Wendl. *Res. J. Environ. Earth Sci.*, Vol. 4: 990-995.
- El-Shatnawi, M.J. et Turuk, M., 2002.** Dry matter accumulation and chemical content of saltbush (*Atriplex halimus*) grown in Mediterranean desert shrublands. *The Royal Society of New Zealand 2002. New Zealand Journal of Agricultural Research*, Vol. 45: 139-144.

- El-Shatnawi, M.J. et Mohawesh, Y., 2000.** Seasonal chemical composition of saltbush in semi arid grassland of Jordan. *Journal of Range Management*, Vol. 53: 211-214.
- Ensley, B.D., 2000.** Rationale for use of phytoremediation. In I. Raskin, & B. D. Ensley (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean-up the environment*. New York: Wiley, 3-12.
- Epelde, L., Becerril, J. M., Hernandez-Allica, J., Barrutia, O. et Garbisu, C., 2008.** Functional diversity as indicator of the recovery of soil health derived from *Thlaspi caerulescens* growth and metal phytoextraction. *Applied Soil Ecology*, Vol. 39: 299-310.
- Ercal N, Gurer-Orhan, H. et Aykin-Burns, N., 2001.** "Toxic Metals and Oxidative Stress Part I: Mechanisms Involved in Metal-induced Oxidative Damage." *Current Topics in Medicinal Chemistry*, Vol. 1: 529-539.
- Ernst, W.H.O., 2000.** Evolution of metal hyperaccumulation and phytoremediation hype. *New Phytol.*, Vol. 146: 357-358.
- Ernst, W.H.O., 1998.** Effects of heavy metals in plants at the cellular and organismic level. *Ecotoxicology*. G. Schuurman and B. Markert, J Wiley and Sons Inc and Spectrum Akademisher Verlag, 587-620.
- Ernst, W.H.O., 1988.** Decontamination of mine sites by plants: an analysis of the efficiency. In *Environmental Contamination 3rd Int. Conf. Venice* (ed. A. A. Orio.). CEP Consultants, Edinburgh, 305-310.
- Eshghi Malayeri, B., 1995.** Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes. Thèse de doctorat d'état, 83 p.
- Estrella-Gómez, N., Mendoza-Cózatl, D., Moreno-Sánchez, R., González-Mendoza, D., Zapata-Pérez, O., Martínez-Hernández, A. et Santamaría, J.M., 2009.** The Pbhyperaccumulator aquatic fern *Salvinia minima* Baker, responds to Pb²⁺ by increasing phytochelatin synthesis via changes in SmPCS expression and in phytochelatin synthase activity. *Aquat. Toxicol.*, Vol. 91: 320-328.
- Eun, S.O., Shik Youn, H. et Lee, Y., 2000.** "Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*." *Physiologia Plantarum*, Vol. 110: 357-365.
- Evans, G. et Furlong, J., 2003.** *Environmental biotechnology. Theory and application*. Ed. Wiley, 302 p.
- Evans, L.J., 1989.** The Chemistry of metal retention by soils. *Environmental sciences Technology*, Vol. 23: 1046-1056.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. et Clark, R.B., 2002.** Micro nutrients in crop production. *Adv. Agron.*, Vol. 77: 185-268.
- Falandysz, J., Lipka, K., Kawano, M., Brzostowski, A., Dadej, M., Jedrusiak, A. et Puzyn, T., 2003.** Mercury content and its bioconcentration factors in wild mushrooms at Lukta and Morag, northeastern Poland. *J Agric Food Chem.*, Vol. 51: 2832-2836.
- Falandysz, J., 1993.** Some toxic and essential trace metals in cattle from the northern part of Poland. *The Science of the Total Environment*, Vol. 136: 177-191.
- Fargašová, A., 2001.** Phytotoxic effects of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis Alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots. *Biologia Plantarum*, Vol. 44: 471-473.

- Fatarna, L., 2007.** Culture in vitro d'*Atriplex halimus* L. et étude de l'impact des éléments traces métalliques (plomb, zinc et cuivre) sur la germination et la croissance. Thèse de Magister en Biotechnologie végétale. Université de Mostaganem, 86-52.
- Fendorf, S.E., 1995.** Surface reactions of chromium in soils and waters, *Geoderma*, Vol. 67: 55-71.
- Ferchichi, O.H., 2005.** Effect of mineral concentration of culture media without growth substances on the callogenesis of *Atriplex halimus* L. *African journal of biotechnology*, Vol. 4 (9): 960-962.
- Ferchichi, O.H., Harzallah, H., Bouzid, S. et Rejeb, N., 1997.** Contribution à l'étude de la biologie florale chez *Atriplex halimus*: influence des facteurs environnementaux sur la phénologie de la floraison, in: Étude de la diversité biologique de l'*Atriplex halimus* pour le repérage in vitro et in vivo d'individus résistants à des conditions extrêmes du milieu et constitution de clones, rapport annuel du projet STD 3 no TS 3 CT 940264, Paris, 6 p.
- Ferchichi, A. et Periploca L.A., 1990.** Ecologie, biologie et aptitudes germinatives. DEA Ecole végét., Faculté des Sciences de Tunis, 108 p.
- Field, J.A. et Thurman, E.M., 1996.** The role of glutathione conjugation in the detoxification of xenobiotic compounds in the environment: *Environmental Science Technology*, Vol. 30: 1413-1417.
- Fishesser, A. et Dupuitate, C., 1996.** Le guide de l'écologie. Ed de la Martinières, 319 p.
- Flagella, Z., Trono, D., Pompa, M., Di Fonzo, N. et Pastore, D., 2006.** Seawater stress applied at germination affects mitochondrial function in durum wheat (*Triticum durum*) early seedlings. *Funct. Plant Biol.*, Vol. 33: 357-366.
- Floret, C. H. et Pontonier R., 1982.** L'aridité en Tunisie présaharienne: climat, sol, végétation et aménagement. *Trov Docum Orsfom*, 150-544.
- Flowers, T., Troke, P. et Yeo, A., 1977.** The mechanism of salt tolerance in halophyte. *Plant physiol.*, Vol. 28: 89-121.
- Foy, C.D., Chaney, R.L. et White, M.C., 1978.** The Physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Vol. 29: 511-566.
- Foyer, C.H. et Noctor, G., 2000.** Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling. *New Phytol.*, Vol. 146: 359-388.
- Francis, F.J., 1970.** Anthocyanins in pears. *HortScience* 5:42. Hong, V. and R.E. Wrolstad. 1990. Use of HPLC separation/photodiode array detection for characterization of anthocyanins. *J. Agr. Food Chem.*, Vol. 38: 708-715.
- Frankel, O.H., 1984.** Genetic perspectives of germplasm conservation. Arber, W., Llimensee, K. et Peac W. J. In: *Genetic Manipulation: Impact on Man and Society*, 161-170.
- Franklet, O.H. et le Houérou, H.N., 1971,** les *Atriplex* en Tunisie et en Afrique du Nord, *Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)*. Rome, 249-271.
- Freeman, J.L., Persans, M.W., Nieman, K., Albrecht, C., Peer, W.A., Pickering, I.J. et Salt, D.E., 2004.** Increased glutathione biosynthesis plays a role in nickel tolerance in *Thlaspi* nickel hyperaccumulators. *Plant Cell*, Vol. 16: 2176-2191.

- Freitas, H., Prasad, M.N.V. et Pratas, J., 2004.** Plant community tolerant to trace elements growing on the degraded soils of Sao Domingos mine in the south east of Portugal: environmental implications. *Environment International.*, Vol. 30: 65-72.
- Freitas, H. et Breckle, S.W., 1993.** Accumulation of nitrate in bladder hairs of *Atriplex* species. *Plant Physiol. Biochem.*, Vol. 31: 887-892.
- Friedland, A.J., 1990.** Movement of metals through soils and ecosystems. In AJ Shaw (Ed.), *Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects.* CRC Press: Boca Raton, Floride, USA.
- Frolov, L., 1983.** L'approche marxiste du problème écologique. *Collection Problèmes du Monde contemporain*, Vol. 88: 25-36.
- Froment, D., 1972.** Etablissement des cultures fourragères d'*Atriplex* en Tunisie central. *Bull recherche Agro. C. E. M. L.*, Vol. 2: 590-600.
- Gajewska, E. et Sktodowska, M., 2007.** Relations between tocopherol, chlorophyll and lipid peroxides content in shoots of Ni-treated wheat. *J Plant Physio.*, Vol. 164: 364-366.
- Galaris, D. et Evangelou, A., 2002.** The role of oxidative stress in mechanisms of metal-induced carcinogenesis. *Crit Rev Onco Hemato.*, Vol. 42 (1): 93-103.
- Gale, J., Naaman, R. et Poljakopp-Mayber, A., 1970.** Growth of *Atriplex halimus* L. in sodium chloride salinated culture solutions as affected by the relative humidity of the air. *Ausf. J. Biol. Sci.*, Vol. 23: 947-952.
- Gallet, C. et Lebreton, P., 1995.** Evolution of phenolic patterns in plants and associated litters and humus of a mountain forest ecosystem. *Soil Biol. Biochem.*, Vol. 27: 157-165.
- Garcia, G., Faz, A. et Cunha, M., 2004.** Performance of *Piptatherum miliaceum* (*Smilo grass*) in edaphic Pb and Zn phytoremediation over a short growth period. *Int Biodeter & Biodeg.*, Vol. 54: 245-250.
- Garcia, L.V., Maranon, T., Ojeda, F., Clemente, L. et Redondo, R., 2002.** Seagull influence on soil properties, chenopod shrub distribution, and leaf nutrient status in semi-arid Mediterranean islands. *OIKOS*, Vol. 98: 75-86.
- Garcia-Camarero, J., Ingelmo, F. et Sotomayor, M., 1996.** Implantation de *Arbustos pascícolas* como integracion ganadera en los agrosistemas. *Agricultura ecologica y Desarrollo rural. II congreso de la sociedad Espanola de agriculture ecologica.* Pamplona-Iruna. Septiembre de 1996, 477-488.
- Garg, V.K., Gupta, R., Kumar, R. et Gupta, R.K., 2004.** Adsorption of chromium from aqueous solution on treated sawdust. *Bioresour Technol.*, Vol. 92: 79-81.
- Garnier, F., Carpin, S., Label, P., Creche, J., Rideau, M. et Hamdi, S., 1996.** Effect of cytokinin on alkaloid accumulation in periwinkle callus transformes with a ligh-inducible ipt gene. *Plant Sci.*, Vol. 120: 47-55.
- Garnier, C., Albouy, V., Bailly, C., Beauvir, J., Corbin, D., Doyen, P.H., Martin, M.C., Morize, M., Ron, Y. et Théroutte, T., 1995.** Le guide 31^{ème} édition, *Traité pratique de jardinage.* édition Copedit/Clause Jardin 1995.
- Gartside, D.W. et McNeilly, T.B., 1974.** The potential for evolution of heavy metal tolerance in plants. II: Copper tolerance in normal populations of different plant species. *Heredity*, Vol. 32: 335-348.

- Gaughofer, J., 1991** "Chromium" In: Metals and Their Compounds in the Environment. VCH Weinheim, New York, Basel, Cambridge, 853-878.
- George, P., 1973.** L'environnement. PRESSES Universitaires de France, 108, SAIN-GERMAIN, Paris, 22-117 p.
- Gerritse, R.G., Vriesema, R., Dalenberg, J.W. et De Roos, H.P., 1982.** Effect of sewage sludge on trace element mobility in soils. J. Environ. Qual., Vol. 11: 359-364.
- Ghosh, M. et Singh, S.P., 2005.** A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. – Environment Pollution, Vol. 133: 365-371.
- Glebert, C., Ros, R., De Haro, A., Walker, D.J., Pilar Bernal, M. et Serrano, R., 2003.** A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. Biochem Biophys Res Commun, Vol. 303: 440-5.
- Glenn, E.P., Waugh, W.J., Moore, D., McKeon, C. et Nelson, S.G., 2001.** Revegetation of an abandoned uranium millsite on the Colorado Plateau, Arizona. J. Environm. Qual., Vol. 30: 1154-1162.
- Glenn, E.P, Brown, J.J. et Blumwald, E., 1999.** Salt tolerance and crop potential of halophytes. Crit Rev Plant Sci., Vol. 18: 227–55.
- Glenn Edward, P. et Brown Jed, J., 1998.** Effects of soil salt levels on the growth and water use efficiency of *Atriplex canescens* (*Chenopodiaceae*) varieties in drying soil Environmental Research Laboratory, University of Arizona, 2601 E. Airport Drive, Tucson, Arizona 85706. American Journal of Botany, Vol. 85 (1): 10-16.
- Gold, C., 2002.** Etude des effets de la pollution métallique (Cd/Zn) sur la structure des communautés de diatomées périphytiques des cours d'eau. Approches expérimentales in situ et en laboratoire. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 175 p.
- Goel, A., Kumar, G., Payne, G.F. et Dube, S.K., 1997.** Plant cell biodegradation of a xenobiotic nitrate ester, nitroglycerin; Nat. Biotechnol., Vol. 15: 174-77.
- Gomez, J.M., 2003.** Herbivory reduces the strength of pollinator-mediated selection in the Mediterranean herb *Erysimum mediohispanicum*: consequences for plant specialization. *The American Naturalist*, Vol. 162: 242–256.
- Gopal, R. et Rizvi, A.H., 2008.** Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. Chemosphere, Vol. 70 (9): 1539-1544.
- Grantz, D.A., Vaughn, D.L., Farber, R.J., Kim, B., Ashbaugh, L., VanCuren, T., Campbell, R., Bainbridge, D. et Zink T., 1998.** Transplanting native plants to revegetate abandoned farmland in the western Mojave Desert. J. Environm. Qual., Vol. 27: 960-967.
- Greenway, H. et Munns, R., 1980.** Mechanism of salt tolerance in non-halophytes. Annual Review of Plant Physiology, Vol. 3: 149-190.
- Greger, M., 1999.** Metal availability and bioconcentration in plants. In: Prasad, M. N. V. & Hagemayer, J. (Eds.). Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems. Springer-Verlag, Berlin, 1-27.
- Gremion, F., 2003.** Analysis of microbial community structures and functions in heavy metal-contaminated soils using molecular methods Institut des sciences et technologies de l'environnement section des sciences et ingénierie de l'environnement Thèse N^o 2862 (2003) World Health Organization (WHO), 1999, Monographs on Selected Medicinal Plants, vol. 1, WHO, Geneva, 1999.

- Grenet, A., 1997.** Aspects microscopiques de la dégradation microbienne des tissus végétaux dans le rumen. INRA Prod. Anim., Vol. 10: 241-249.
- Groppa, M.D. et Benavides, M.P., 2008.** Polyamines and abiotic stress: recent advances. Amino Acids, Vol. 34: 35-45.
- Groppa, M.D., Ianuzzo, M.P., Tomaro, M.L. et Benavides, M.P., 2007.** Polyamine metabolism in sunflower plants under long-term cadmium or copper stress. Amino acids 2007, Vol. 32: 265-75.
- Julkunen-Titto, R., 1985.** Phenolic constituents in the leaves of northern willows: methods for the analysis of certain phenolics. J. Agric. Food Chem., Vol. 33: 213-217.
- Gumaelius, L., Lahner, B, Salt, D. E. et Banks, J. A., 2004.** Arsenic hyperaccumulation in gametophytes of *Pteris vittata*. A new model system for analysis of arsenic hyperaccumulation. Plant Physiol., Vol. 136: 3198-3208.
- Gupta, R. et Abrol, P., 1990.** Salts affected soils: their reclamation and management for crop production. Adv Soil Science, 273-87.
- Gussarsson, M., 1994.** Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of *Betula pendula* seedlings: the significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity. J. Plant Nutr., Vol. 17: 2151-2163.
- Haddioui, A. et Baaziz, M., 2001.** Genetic diversity of natural populations of *Atriplex halimus* L. in Morocco: An isoenzyme-based overview. Euphytica., Vol. 121: 99-106.
- Hadjadj, S., Djerroudi, O. et Bissati, S., 2011.** Etude comparative des mécanismes biochimiques de tolérance au stress salin de deux espèces d'*atriplex*: *Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* (Purch) Nutt. Algerian journal of arid environment, Vol. 1 (2): 3-10.
- Hadjiliadis, N. D., 1997.** Cytotoxicity, mutagenicity and carcinogenic potential of heavy metals related to human environment. Ed. NATO-ASI Ser. 2. Environment. Vol. 26. Dordrecht.
- Hagemeyer, J. et Waisel, Y., 1988.** Excretions of ions (Cd^{2+} , Li^+ , Na^+ and Cl^-) by *Tamarix aphylla*. Physiol. Plant., Vol. 73: 541-546.
- Haghir, F., 1973.** Cadmium uptake by plants. J. Environ. Qual., Vol. 2: 93-96.
- Hajhashemi, S., Kiarostami, K., Enteshari, S. et Sabbora, A., 2006.** The effects of salt Stress and Paclobutrazol on Some Physiological of two salt-tolerant and salt sensitive cultivars of wheat. Pakista J. Biol., Vol. 9: 1370-1374.
- Halimi, A., 1997.** Les plantes médicinales en Algérie I. U. C. N A. N. N, 68 p.
- Hall, J.L. et Williams, L.E., 2003.** Transition metal transporters in plants. Journal of Experimental Botany, Vol. 54: 2601-2613.
- Hall, J.L., 2002.** Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. Journal of Experimental Botany, Vol. 53: 1-11.
- Han, F.X., Sridhar, B.B.M., Monts, D.L. et Su, Y., 2004.** Phytoavailability and toxicity of trivalent and hexavalent chromium to *Brassica juncea*. New Phytologist, Vol. 162: 489-499.
- Handique, G.K. et Handique, A.K., 2009.** Proline accumulation in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* Stapf.) due to heavy metal stress. J. Environ. Biol., Vol. 30 (2): 299-302.

- Hanen, F., Ksouri, R., Megdiche, W., Trabelsi, N., Boulaaba, M. et Abdelly, C., 2008.** Effect of salinity on growth, leaf phenolic content and antioxidant scavenging activity in *Cynara cardunculus* L. In: biosaline agriculture and high salinity tolerance. Abdelli C, Ozturk M, Ashraf M, Grignon YC, (Eds.). Birkhauser Verlag, Switzerland, 335-343.
- Hare, P.D., Cress, W.A. et Van Stadem, J., 1998.** Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant cell and Environment*, Vol. 21: 535-553.
- Harper, F.A., Smith, S. et Macnair, M.R., 1998.** Can an increased copper requirement in copper-tolerant *Mimulus guttatus* explain the cost of tolerance? II. Reproductive phase. *New Phytol.*, Vol. 140: 637-654.
- Harrington, C.F., Roberts, D.J. et Nickless, G., 1996.** The effect of cadmium, zinc and copper on growth, tolerance index, metal uptake, and production of malic acid, in two strains of the grass *Festuca rubra*. *Canadian Journal of Botany*, Vol. 74: 1742-1752.
- Hassani, A., Dellal, A., Belkhouja, M. et Kaid, M., 2008.** Effet de la Salinité sur l'eau et certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). *European Journal of scientific Research*, Vol. 23 (1): 61-69.
- Hassnaoui, B., 1992.** Les chaînes du Nord de la Tunisie, écologie et régénération, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Provence Aix – Marseille I, 402 p.
- He, Z.L., Yang, X.E. et Stoffella, P.J., 2005.** Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Biology and Medicine of Trace Elements*, Vol. 19: 125-140.
- Heller, R., 1990.** *Physiologie végétale. 1. Nutrition.* Tome I Ed. Dunod., 314 p.
- Hernández, N.E., Tereschuk, M.L. et Abdala, L.R., 2000.** Antimicrobial activity of flavonoids in medicinal plants from Tafti del Valle (*Tucumán, Argentina*). *Journal of Ethnopharmacology*, Vol. 73: 317-322.
- Hesterberg, D., 1998.** Biogeochemical cycles and processes leading to changes in mobility of chemicals in soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 67: 121-133.
- Higazy, M.A., Shehata, M.M. et Allam, A.I., 1995.** Free proline relation to salinity tolerance of three sugar beet varieties. *Egypt. J. Agric. R.*, Vol. 73 (1): 175-189.
- Hinsinger, P., 1998.** How do plant roots acquire mineral nutrients. Chemical processes involved in the rhizosphere. *Adv. Agron.*, Vol. 24: 225–265.
- Hiram, A., Castillo M., Jason, P., Jose, R., Peralta, V., Alejandro, M., et Jorge, L., 2006.** Gardea-Torresdey. Proceeding 231st ACS National Meeting, Atlanta GA, March 26-30, 2006.
- Hoagland, D.R. et Arnon, D.I., 1950.** The Water Culture Method for Growing Plants Without Soil. California Agricultural Experiment Station, Berkeley. Circular, Vol. 347: 1-32.
- Hopkins, G.W., 2003.** *Physiologie végétale.* 1^{ère} ed. Ed. De Boeck, 514 p.
- Horne, A.J., 2000.** Phytoremediation by constructed wetlands. In: N Terry, G Bañuelos (Eds.) *Phytoremediation of Contaminated Soils and Waters.* CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA, 13-39.
- Hough, R.L., Young, S.D. et Crout, N.M.J., 2003.** Modelling of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn uptake, by winter wheat and forage maize, from a sewage disposal farm. *Soil Use Manage*, Vol. 19: 19-27.

- Houmani, M., 1997.** Evolution des terres de parcours et bilan fourrager dans les zones arides algériennes. Dans: Actualité Scientifique: Biotechnologies, Amélioration des Plantes et Sécurité Alimentaire: Collection Universités Francophones. Ed, ESTEM, Paris, 175-176.
- Houshmand, S., Arzanib, A., Maibodyb, S.A.M. et Feizic, M., 2005.** Evaluation of salttolerant genotypes of durum wheat derived from in vitro and field experiments. *Field Crops Res.*, Vol. 91: 345–354.
- Howe, J.A., Loeppert, R.H., Deroose, V.J., Hunter, D.B. et Bertsch, P.M., 2003.** Localization and speciation of chromium in subterranean clover using XRF, XANES and EPR spectroscopy. *Environmental Science and Technology*, Vol. 37: 4091–4097.
- Howell, J. et Gawthorne, J.M., 1987.** Copper in animals and man. CRC press, New York, 125 p.
- Howot, K. et Tarallo, L., 1991.** Le cuivre In: les oligo-éléments en médecine et biologie. Coord, Chappuis, Ed. SFERETE, Lavoisier Tec et Doc & Ed Médicales Internationales, 459-458.
- Huang, J.W., Chen, J., Berti, W.R. et Cunningham, S.D., 1997.** Phytoremediation of leadcontaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction, *Environmental Science and Technology*, Vol. 31: 800-805.
- Huang, J.W. et Cunningham, S.D., 1997.** Phytoremediation of lead contaminated soils. Role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 31: 800-805.
- Huang, J.W. et Cunningham, S.D., 1996.** Lead phytoextraction: Species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologists*, Vol. 134: 75-84.
- Huang, J. et Redmann, R.S., 1995.** Salt tolerance of *Hodeum* and *Brassica* species during germination and early seedling grow. *Can. J. Plant Sci.*, Vol. 75: 515-519.
- Huang, C.Y., Bazzaz, F.A. et Vanderhoef, L.N., 1974.** The Inhibition of Soybean Metabolism by Cadmium and Lead. *Plant Physiology*, Vol. 54: 122-124.
- Huffman, J.R.E.W.D. et Allaway, W.H., 1973.** Chromium in plants: distribution in tissues, organelles and extracts and availability of bean leaf Cr to animals. *J. Agric. Food Chem.*, Vol. 21: 982-986.
- Hunsen, D., Duda, P.J., Zayed, A. et Terry, N., 1998.** Selenium removal by constructed wetlands: Role of biological volatilization. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 32: 591-597.
- Ighilhariz Z., 1990.** Etude du comportement physiologique, biochimique et structurale du *Retama retam* (R'tam) vis-à-vis du chlorure de sodium. Mémoire Magister, Université Es-Senia, Oran, 120 p.
- Ildiko, K. et Gabor, G., 2000.** Osmotic and salt stress induced alteration in soluble carbohydrate content in wheat seedlings. *Crop Sciences*. Vol. 40: 482-487.
- Imlay, J.A. et Linn, S., 1986.** Bimodal pattern of killing of DNA-repair-defective or anoxically grown *Escherichia coli* by hydrogen-peroxide. *Journal of Bacteriology*, Vol. 166: 519-527.
- Impens, R., Fagot, J. et Avril. C., 1991.** Gestion des Sols Contaminés par les Métaux Lourds. Association Francaise Interprofessionnelle du Cadmium, Paris, France.
- Iqbal, J. et Mushtaq, S., 1987.** Effect of lead on germination, early seedling growth, soluble protein and acid phosphatase content in *Zea mays*. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 30: 853-856.

- Iretskaya, S.N. et Chien, S.H., 1999.** Comparison of cadmium intake by five different food grain crops grown on three soils of varying pH. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, Vol. 30: 441-448.
- Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A. et Alyemeni, M.N., 2013.** Soil cadmium enrichment: Allocation and plant physiological manifestations. *Saudi J. Biol. Sci.*, Vol. 20: 1–10. doi:10.1016/j.sjbs.2012.11.004.
- Irfan Qureshi, M., Israr, M., Abdin, M.Z. et Iqbal, M., 2005.** "Responses of *Artemisia annua* L. to lead and salt-induced oxidative stress. " *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 53 (2): 185-193.
- Irtelli, B., Baker, A.J.M., Alan J.M., Quartacci Mike, F., Navari I.Z. et Flavia, Z.O., 2001.** Dipartimento di Chimica e Biotecnologie Agrarie, Università di Pisa, 56124 Pisa, Italy., School of Botany, The University of Melbourne, Parkville, VIC 3010, Australia.
- Islam, E., Yang, X., Li, T., Liu, D., Jin, X. et Meng, F., 2007.** Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 147: 806-816.
- Jackson, L.J., Rasmussen, J.B., Peters, R.H. et Kalff, J., 1991.** Empirical relationships between the element composition of aquatic macrophytes and their underlying sediments. *Biogeochem.*, Vol. 12: 71-86.
- Jain, M., Pal, M., Gupta, P. et Gadre, R., 2007.** Effect of cadmium on chlorophyll biosynthesis and enzymes of nitrogen assimilation in greening maize leaf segments: Role of 2-oxoglutarate. *Ind J Experim Bio.*, Vol. 45: 385-389.
- Janmohammadi, M., Bihamta, M.R. et Ghasemzadeh, F., 2013.** Influence of rhizobacteria inoculation and lead stress on the physiological and biochemical attributes of wheat genotypes. *Cercetări Agronomice în Moldova*, Vol. 46 (1): 153-155.
- Jarvis, M.D. et Leung, D.W.M., 2002.** Chelated lead transport in *Pinus radiata*: an ultrastructural study. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 48: 21-32.
- Jean, L., 2007.** Mobilisation du chrome et du nickel à partir de sols contaminés, en présence de complexants: Transfert et accumulation de ces métaux chez *Datura innoxia*". Thèse de doctorat, Université de Limoges, 38-115.
- Jean Louis, M. et Qi-Tang, W.U., 2007.** Essais de phytoremédiation en parcelles lysimétriques sur le site du GISFI (Groupe d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles) Association Franco-Chinoise pour la Recherche Scientifique & Technique *Revue bilingue: Sciences et Techniques*.
- Jeffers, P.M., Wolfe, N.L. et Nzungu, V., 1998.** Green plants: A terrestrial sink for atmospheric CH₃Br. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25: 43-46.
- Jha, A.B. et Dubey, R.S., 2004.** Carbohydrate metabolism in growing rice seedlings under arsenic toxicity. *Plant Physiol.*, Vol. 123: 1029-1036.
- Jiang, L.Y., Yang, X.E. et He, Z.L., 2004.** Growth response and phytoextraction of copper at different levels in soils by *Elsholtzia splendens*. *Chemosphere*, Vol. 55: 1179-1187.
- Jiang, X.J., Luo, Y.M., Zhao, Q.G., Baker, A.J.M., Christie, P. et Wong, M.H., 2003.** Soil Cd availability to Indian mustard and environmental risk following EDTA addition to Cd-contaminated soil. *Chemosphere*, Vol. 50: 813-818.

- Jithesh, M.N., Prashanth, S.R., Sivaprakas, K.R. et Parida, A.K., 2006.** Antioxidative response mechanisms in halophytes: their role in stress defense. *Journal Of Genetics*, Vol. 85 (3): 237-254.
- Johnson, J.M., Pritchard, J., Gorham, J. et Tomos, A.D., 1996.** Growth, water relations and solute accumulation in osmotically stressed seedlings of the tropical tree *Colophospermum mopane*. *Tree. Physiol.*, Vol. 16: 713-718.
- Joner Erik, J. et Leyval C., 2003.** Phytoremediation of organic pollutants using mycorrhizal plants: a new aspect of rhizosphere interactions INRA, EDP Sciences, Agronomie, Vol. 495: 495–502.
- Jordan, F.L., Robin-Abbott, M., Maier, R.M. et Glenn, E.P., 2002.** A comparison of chelator-facilitated uptake by a halophyte and a glycophyte. *Environ Toxic Chem.*, Vol. 21: 704-2698.
- Jovanovic, S.V., Steenken, S., Tasic, M., Marjanovic, B. et Simic, M.G., 1994.** Flavonoids as antioxidants. *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 116: 4846–4851.
- Jowett, D., 1958.** Populations of *Agrostis* ssp. tolerant to heavy metals. *Nature*, Vol. 182: 816-817.
- Jung, M.C., 1995.** Environmental contamination of heavy metals in soils, plants, waters and sediments in the vicinity of metalliferous mine in Korea. Unpubl. PhD thesis, Univ, London, 189-317.
- Just, C.L. et Schnoor, J.L., 2004.** Phytodegradation of Hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX) in leaves of Reed Canary Grass. *Environmental Science & Technology*, Vol. 38: 290-295.
- Juste, C., Chassin, P. et Gomez, A., 1995.** Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines, ADEME-INRA, 208 p.
- Kabata-Pendias, A. et Pendias, H., 2001.** Trace elements in soils and plants. CRC Press, London.
- Kabata-Pendias, A., 1992.** Trace metals in soils in Poland-occurrence and behaviour. *Soil Science*, Vol. 140: 53-70.
- Kabata-Pendias, A. et Pendias, H., 1992.** Trace elements in soils and plants. London (UK)CRC Press, Boca Raton, Florida, 2nd Edition, 209 p.
- Kabata-Pendias, A. et Pendias, H., 1984.** Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Kadem, D.E.D., 2005.** Evaluation et comportement des métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn et Mn) dans les sols à vocation agricole et à végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique. (El-Hadjar – Annaba – Est Algérien). Influence de la végétation sur la dynamique de ces métaux. Thèse de Doctorat en écologie. Université Mentouri de Constantine. 02/07/2005, 107 p.
- Kadukova, J., Papadontonakis, N., Naxakis, G. et Kalogevakis, N., 2004.** Lead accumulation by the salt-tolerant plant *Atriplex halimus*. *Protection*.
- Kaminski, M.D. et Landsberger, S., 2000.** Heavy metals in urban soils of East St. Louis, IL, part I: total concentration of heavy metals in soils. *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 50: 1667-1679.

- Kamnev, A.A. et Van der Lelie, D., 2000.** Chemical and biological parameters as tools to evaluate and improve heavy metal phytoremediation. *Bioscience Reports*, Vol. 20 (04): 239-258.
- Karavangeli, M., Labrou, N.E., Clonis, Y.D. et Tsaftaris, A., 2005.** Development of transgenic tobacco plants overexpressing maize glutathione S-transferase I for chloroacetanilide herbicides phytoremediation. *Biomolecular Engineering*, Vol. 22: 121-128.
- Karenlampi, S., Schat, H., Vangronsveld, J., Verkleij, J.A.C., Van der Lelie, D. et Mergeay, M., 2000.** Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soils. *Environ Pollut.*, Vol. 107: 225-31.
- Karimi, N., Khanahmadi, M. et Moradi, B., 2012.** Accumulation and Phytotoxicity of Lead in *Cynara scolymus*. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 5 (11): 451-456.
- Kavi Kishor, P.B., Sangam, S., Amrutha, R.N., Sri Laxmi, P., Naidu, K.R., Rao, K.R.S.S., Rao, S., Reddy, K.J., Theriappan, P. et Sreenivasulu N., 2005.** Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Curr. Sci.*, Vol. 88: 424-438.
- Kavuličová, J., Kaduková, J. et Ivánová, D., 2012.** The Evaluation of Heavy Metal Toxicity in Plants Using the Biochemical Tests. *Nov. Biotechnol. Chim.*, Vol. 11: 101-110. doi:10.2478/v10296-012-0011-2.
- Kawahigashi, H., Hirose, S., Ohkawa, H. et Ohkawa, Y., 2006.** Phytoremediation of the herbicides atrazine and metolachlor by transgenic rice plants expressing human CYP1A1, CYP2B6, and CYP2C19. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 54: 2985-2991.
- Kayouli, 2001.** Country Pasture-Forage Resource Profiles. Tunisia. FAO.
- Keller, F. et Ludlow, M.M., 1993.** Carbohydrate metabolism in drought-stressed leaves of Pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Journal of Experimental Botany*, Vol. 44 (265): 1351-1359.
- Kelley, B.D., Goodin, J.R. et Miller, D.R., 1982.** Biology of *Atriplex*. In: Contribution to the ecology of Halophytes. Ed. Dr W. Junk, London, 79-107.
- Kerkeb, L. et Kramer, U., 2003.** The role of free histidine in xylem loading of nickel in *Alyssum lesbiacum* and *Brassica juncea*. *Plant Physiol.*, Vol. 131: 716-24.
- Khadre, F., 1994.** An ecological study on the regulation of seed germination of *Atriplex halimus*. *Egyptian Journal of Botany*, Vol. 34: 49-59.
- Khan, M.A., Ungar, I.A. et Showalte, A.M., 2000.** Effects of salinity on growth water relations and ions accumulation of the subtropical perennial halophyte *Atriplex griffithii*, Var Stocksir. *Ed Ann. Bot.*, Vol. 85: 225-232.
- Kibria, M.G., Islam, M. et Osman, K.T., 2009.** Effects of lead on growth and mineral nutrition of *Amaranthus gangeticus* L. et *Amaranthus oleracea* L. University of Chittagong, Bangladesh. *Soil & Environ.*, Vol. 28 (1): 1-6.
- Killian, C., 1953.** La végétation autour de chott Hodna indicatrice des possibilités culturelles et son milieu édaphique. *A. n. Inst. Agro.*, Vol. 9: 51-80.
- Kim, D.Y., Bovet, L., Kushnir, S., Noh, E.W., Martinoia, E. et Lee, Y., 2006.** "AtATM3 Is Involved in Heavy Metal Resistance in *Arabidopsis*." *Plant Physiology*, Vol. 140 (3): 922-932.

- Kim, S.R., Chang, A.C., Page, A.L. et Warneke, J.E., 1988.** Relative concentrations of cadmium and zinc in tissue of selected food plants grown on sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.*, Vol. 17: 568-573.
- Kinet, J.M., 1998.** Etude de la biodiversité chez *Atriplex halimus* et la découverte in vivo des plantes résistantes aux conditions de l'environnement. *Cahier d'agriculture*, Vol. 7: 505-509.
- Kinet, J.M., Ben Rebiha, F., Bouzid, S., Laihakar, S. et Dutuit, P., 1998.** Le réseau *Atriplex*. Allier biotechnologies et écologie pour une sécurité alimentaire accrue en régions arides et semi arides. *Cah. Agric.*, Vol. 7 (6): 505-509.
- Kinniburgh, D.G., Milne, C., Benedetti, M., Pinheiro, J., Filius, J., Koopal, L. et Van Riemsdijk, W.H., 1996.** Metal ion binding by humic acid: application of the NICA Donnan model. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 30: 1687-1698.
- Kleiman, I.D. et Cogliatti, D.H., 1998.** Chromium removal from aqueous solutions by different plant species, *Environmental Technology*, Vol. 19: 1127-1132.
- Koch, K.E., 1996.** Carbohydrate-modulated gene expression in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Vol. 47: 509-540.
- Komives, T. et Gullner, G., 2005.** Phase I xenobiotic metabolic systems in plants. *Zeitschrift fur Naturforschung*, Vol. 60: 179-185.
- Komoşa, D., Langebartels, C. et Sandermann, H., 1995.** Metabolic processes for organic chemicals in plants. In: *Plant contamination-Modeling and stimulation of organic chemical processes*, J. C. Mc Farlane, Eds (Boca Raton, Florida: Lewis Publishers), 69-106.
- Kopittke, P.M., Asher, C.J., Kopittke, R.A. et Menzies, N.W., 2007.** Toxic effects of Pb^{2+} on growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Environmental Pollution*, Vol. 150: 280-287.
- Kosobrukhov, A., Knyazeva, I. et Mudrik, V., 2004.** Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis. *Plant Growth Regulation*, Vol. 42: 145-151.
- Kozlowski, R., Kozloxska, J., Grabouska, L., Mankowski, J. et Szpakowska, B., 2003.** Métaux lourds dans l'environnement; menaces et possibilités de riposte. Institut des fibres naturelles. Pologne.
- Kozlowski, R., Kozlowska, J., Grabowska, L., Mankowski, J. et Szpakowska, B., 2001.** Métaux lourds dans l'environnement, menaces et possibilités de riposte Institut des Fibres Naturelles, Poznan, Pologne Centre de Recherche pour l'Agriculture et la Forêt Académie des Sciences Polonaise, Poznan, Pologne.
- Kramer, U., 2005.** Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. *Current opinion in Biotechnology*, Vol. 16: 133-141.
- Krämer, U., Talke, I.N. et Hanikenne, M., 2007.** Transition metal transport. *FEBS Lett.*, Vol. 581: 2263-2272.
- Kramer, U., Cotter-Howells, J.D., Charnock, J.M., Baker, A.J.M. et Smith, J.A.C., 1996.** Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. *Nature*, Vol. 373: 635-638.
- Kratovalieva, S. et Cvetanowska, L., 2001.** Influence of different lead concentrations to some morpho-physiological parameters at tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in experimental conditions. *Maced. Agric. Rev.*, Vol. 48 (1): 35-38.

- Ksouri, R., Megdiche, W., Debez, A., Falleh, H., Grignon, C. et Abdely. C., 2007.** Salinity effects on polyphenol content and antioxidant activities in leaves of the halophyte *Cakile maritima*. *Plant. Physiol Bioch.*, Vol. 45: 244-249.
- Kuleff, I. et Djingova, R., 1984.** The dandelion (*Taraxacum officinale*)-A monitor for environmental pollution? *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 21: 77-85.
- Kumar, A., Prasad, M.N.V. et Sytar, O., 2012.** Lead toxicity, defense strategies and associated indicative biomarkers in *Talinum triangulare* grown hydroponically. *Chemosphere*, Vol. 89: 1056-1065.
- Kumar, P., Dushenkov, V., Motto, H. et Raskin, I., 1995.** Phytoextraction-the use of plants to remove heavy-metals from soils. *Environ Sci Technol.*, Vol. 29: 1232-1238.
- Kupper, H., Lombi, E., Zhao, F.J. et McGrath, S.P., 2000.** Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Planta*, Vol. 212: 75-84.
- Küpper, H., Zhao, F.J. et McGrath, S.P., 1999.** Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiology*, Vol. 119: 305-311.
- Kyung-Min L., Sujin K., Ji-Yoon N., Keunyoung K., Won-Hee J., Ok-Nam B., Seung-Min C.H. et Jin-Ho C., 2010.** Low-level Mercury Can Enhance Procoagulant Activity of Erythrocytes: A New Contributing Factor for Mercury-related Thrombotic Disease. *Environmental Health Perspectives*. National Institutes of Health U.S. Department of Health and Human Services, College of Pharmacy, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea, 32 p.
- Laing, W.A., 2002.** Protein interactions in plants. McManus MT, Laing WA and Allan AC eds. *Sheffield Academic Press.*, Vol. 7: 77-119.
- Lamy, I., 2002.** Réactivité des matières organiques des sols vis-à-vis des métaux. *Journées nationales de l'étude des sols*, 22 p.
- Lang, F. et Kaupenjohann, I., 2001.** The limitations of solubility constants to calculate Pb mobility at high polluted sites. In: *ICOBTE 56th Guelph*.
- Larcher, W., 2003.** *Physiological plant ecology*. 4^{ème} éd. Springer, 513 p.
- Larsson, E.H., Bornman, J.F. et Asp, H., 1998.** Influence of UV-radiation and Cd²⁺ on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus*. *J. Exp. Bot.*, Vol. 323: 1031-1039.
- Lasnier-Lachaise, L., 1973.** *Agronomie nouvelle*, Pris Flammarion, Agr. Nab. Fol. 59r (Agr. Nab. F), 307-308.
- Lauchli, L. et Epstein, E., 1990.** Plant response to saline conditions. In *Tanji KK (Ed), Agricultural Salinity Assessment and Management*, 113137.
- Lavado, R.S., Porcelli, C.A. et Alvarez, R., 2001.** Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*, Vol. 62: 55-60.
- Lawlor, D.W., 2002.** Limitations to Photosynthesis in water-stressed leaves: stomatal vs metabolism and the role of TP. *Annals of Botany*, Vol. 89: 871-885.
- Laxman, R.S. et More, S., 2002.** Reduction of hexavalent chromium by *Streptomyces griseus*. *Minerals Engineering*, Vol. 15: 831-837.

- Le Houérou, H.N., 2000.** Use of fodder trees and shrubs (trubs) in the arid and semi-arid zones of West Asia and North Africa: history and perspectives. In: Gintzburger.
- Le Houérou, H.N., 1992.** The role of saltbushes (*Atriplex* spp) in arid lands rehabilitation in the Mediterranean basin. A review. Agroforestry systems, Vol. 18: 107-148.
- Le Houérou, H.N., 1989.** Grazing lands of Mediterranean basin. Journal of arid environments, Vol. 5 (1): 321-334.
- Le Houérou, H.N. et Pontanier, C., 1987.** Les plantations sylvo pastorales dans la zone aride de Tunisie, extrait de revue, pastoralisme et développement. «Montpellier » France.
- Le Houérou, H.N., 1980.** Background and justification. In: H. N. Le Houérou (ed.). "Browse in Africa. The current state of knowledge". International Livestock Center for Africa, Addis Abeba (Ethiopia): 491 p.
- Lebohec, J. et Gîraud, M., 1999.** Désinfecter les sols autrement. Juin 1999, ISBN, 2-87911-134-X., 59 p.
- Lee, J.H., Hossner, L.R., Attrep, M. et Kung, K.S., 2002.** Uptake and translocation of plutonium in two plant species using hydroponics. Environmental Pollution, Vol. 117: 61-68.
- Lees, A.K., Cullen, D.W., Sullivan, L. et Nicolson, M.J., 2002.** Development of conventional and quantitative real-time PCR assays for the detection and identification of *Rhizoctonia solani* AG-3 in potato and soil. Plant Pathology, Vol. 51: 293–302.
- Lefèvre, I., Marchal, G., Meerts, P., Correal, E., et Lutts, S., 2009.** Chloride salinity reduces Cd accumulation by the Mediterranean halophyte species *Atriplex halimus* L. Environmental and Experimental Botany, Vol. 65: 142–152.
- Lefevre, L., 1998.** Traitement des eaux usées urbaines. Tome I, Chapitre 3: le lagunage. Mars 1998. Lyonnaise des Eaux (C. I. R. S. E. E), 239-245.
- Lefèbvre, C., 1974.** Note sur la génétique de la tolérance au zinc chez *Armeria maritima* Mill. Willd. Bull. Soc. R. Bot. Belgique, Vol. 107: 217-222.
- Lei, Z.Y., Zhao, P., Cao, M.J., Cui, R., Chen, X., Xiong, L.Z., Zhang, Q.F., Oliver, D.J., et Xiang, C.B., 2007.** High-throughput Binary Vectors for Plant Gene Function Analysis. J. Integr. Plant Biol., Vol. 49: 556-567.
- Leprince, A.S., Lefebvre, D., Ghars, M.A., Parre, E., Thiery, L., Bordenave, M., Richard, L. et Savouré, A., 2004.** Signalling pathways involved in proline metabolism regulation under hyperosmotic stress in *Arabidopsis thaliana*. Bull. biot., Vol. 134: 69-74.
- Lespagnol, G., 2003.** Lixiviation du Chrome, du Cuivre et de l’Arsenic (CCA) à partir de sols contaminés sur des sites de traitement du bois. Thèse: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jean Monnet.
- Levent-Tuna, A., Kaya, C., Dicitilas, M. et Higgs, D., 2008.** The combined effects of gibberellic acid and salinity on some antioxidant enzyme activities, plant growth parameters and nutritional status in maize plants. In Environmental and Experimental Botany, Vol. 62: 1–9. doi:10.1016/j.envexpbot.2007.06.0070.
- Levigneron, A., Lopez, F., Vansuyt, G., Berthomieu, P., Fourcroy P. et Casse-Delbart, F., 1995.** Les plantes face au stress salin. Cahiers agricultures, Vol. 04: 263-273.

- Li, X., Zhao, M., Guo, L. et Huang, L., 2012.** Effect of cadmium on photosynthetic pigments, lipid peroxidation, antioxidants, and artemisinin in hydroponically grown *Artemisia annua*. *J. Environ. Sci. (China)*, Vol. 24: 1511–8. doi:10.1016/S1001-0742(11)60920-0.
- Li, M., Welti, R. et Wang, X., 2006.** Quantitative profiling of Arabidopsis polar glycerolipids in response to phosphorus starvation: roles of phospholipases D ζ 1 and D ζ 2 in phosphatidylcholine hydrolysis and digalactosyldiacylglycerol accumulation in phosphorus-starved plants. *Plant Physiol.*, Vol. 142: 750-761.
- Lima, A.I.G., Pereira, S.I.A., de Almeida Paula Figueira, E.M., Caldeira, G.C.N. et de Matos Caldeira, H.D.Q., 2006.** Cadmium detoxification in roots of *Pisum sativum* seedlings: relationship between toxicity levels, thiol pool alterations and growth. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 55 (1-2): 149-162.
- Liu, S., Yang, C., Xie, W., Xia, C. et Fan, P., 2012.** The Effects of Cadmium on Germination and Seedling Growth of *Suaeda salsa*. *Procedia Environ. Sci.*, Vol. 16: 293–298. doi:10.1016/j.proenv.2012.10.041.
- Liu, T., Liu, S., Guan, H., Ma, L., Chen, Z., Gu, H. et Qu, L.J., 2009.** Transcriptional profiling of *Arabidopsis* seedlings in response to heavy metal lead (Pb). *Environ. Exp. Bot.*, Vol. 67: 377-386.
- Liu, J.X., Zu, Y.G., Shi, X.G., Ai, Y.Z., Du, Y.J., Fu, Y.J. et An, Z.G., 2007.** BjMT2, a metallothionein type-2 from *Brassica juncea*, may effectively remove excess lead from erythrocytes and kidneys of rats. " *Environmental Toxicology and Pharmacology*, Vol. 23 (2): 168-173.
- Liu, D., Jiang, W., Liu, C., Xin, C. et Hou, W., 2000.** Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard [*Brassica juncea* (L.)]. *Bioresource Technology*, Vol. 71 (3): 273-277.
- Lock, K., 2000.** Health and peri-urban natural resource production. *Environment and Urbanisation*, Vol. 10 (1): 89-106.
- Logan, B.A., 2005.** Reactive oxygen species and photosynthesis, in *Antioxidants and Reactive Oxygen Species in Plants*, ed. Smirnoff N., editor. (Oxford: Blackwell), 250–267.
- Lombi, E., Zhao, F.J., Dunham, S.J. et McGrath, S.P., 2001.** Phytoremediation of heavy metalcontaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. *J Environ Qual.*, Vol. 30: 1919-1926.
- Longuo, H.F., Chelma, A. et Ouled Belkher, A., 1989.** Quelques aspects botaniques et nutritionnels des pâturages des dromadaires en Algérie. *Option Méditerranéennes Série Séminaires*, Vol. 2: 47-53.
- Losi, M.E., Amrhein, C. et Frankenberger, W.T.J.R., 1994.** Factors affecting chemical and biological reduction of hexavalent chromium in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1994, Vol. 13 (11): 1727-1735.
- Lukkari, T., Aatsnki, M., Vaisanen, A. et Haimi, J., 2005.** Toxicity of copper and zinc assessed with three different earthworm tests. *Applied Soils Ecology*, Vol. 30: 133-146.
- Luna, C.M., Gonzalez, C.A. et Trippi, V.S., 1994.** Oxydative damage caused by an excess of copper in oat leaves. *Plant Cell Physiology*, Vol. 35: 11-115.

- Lutts, S., Lefevre, I., Delperee, C., Kivits, S., Dechamps, C., Rebledo, A. et Correal, E., 2004.** Heavy metal accumulation by the halophyte species Mediterranean Saltbush. *J. Environ. Qual.*, Vol. 33 (4): 1271-1279.
- Lutts, S., Martinez, J.P., Bajji, M. et Kinet, M., 2001.** Sodium implication in the response of the halophyte species *Atriplex halimus* L. to various abiotic stresses. *Botany*.
- Lutts, S., Kinet, J.M. et Bouharmont, J., 1996.** Effects of various salts and mannitol on ion and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in *Rice callus* cultures. *J. Plant physiol.*, Vol. 149: 186 – 195.
- Lytle, C., Lytle, F.W., Yang, N., Qian, J.H., Hansen, D., Zayed, A. et Terry, N., 1998.** Reduction of Cr (VI) to Cr (III) by wetland plants: potential for in-situ metal detoxification. *Environmental Science and Technology*, Vol. 32: 3087-3093.
- Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y. et Kennelley, E.D., 2001.** A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 409-579.
- Ma, J.F., Zheng, S.J., Hiradate, S. et Matsumoto, H., 1997.** Detoxifying aluminium with buckwheat. *Nature*, Vol. 390: 569-570.
- Maalem, S., 2002.** Etude écophysiological de trois espèces halophytes du genre *atriplex* (*A. canescens*, *A. halimus* et *A. nummularia*) soumises à l'enrichissement phosphaté. Mémoire de Magistère en Physiologie Végétale et Applications Biotechnologiques. Université Baji Mokhtar, Annaba, Algérie, 76 p.
- MacFarlane, G.R. et Burchett, M.D., 1999.** Zinc distribution and excretion in the leaves of grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Environ Exp Bot.*, Vol. 41: 167–175.
- MacKenzie, A. et Sball, A., 2000.** L'essentiel en Ecologie, Berty édition.
- Macnair, M.R., 2003.** The hyperaccumulation of metals by plants. *Adv. Bot. Res.*, Vol. 40: 63-105.
- Macnair, M.R., 1993.** The genetics of metal tolerance in vascular plants. *New Phytologist*, Vol. 124: 541-559.
- Macnair, M.R., 1983.** The genetic control of copper tolerance in the yellow monkey flower, *Mimulus guttatus*. *Heredity*, Vol. 50: 283-293.
- Mahajan, S., Pandey, G.K. et Tuteja, N., 2008.** Calcium-and salt-stress signaling in plants: Shedding light on SOS pathway. *Arch Biochem Biophys*, Vol. 471: 146-158.
- Maire, R., 1962.** Flore de l'Afrique du Nord. Vol VI I. Ed Paul Le Chevalier. Paris, 81 p.
- Malkowski, E., Kita, A., Galas, W., Karcz, W. et Kuperberg, J.M., 2002.** Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium. *Plant Growth Regulation*, Vol. 37: 69-76.
- Mandak, B., 2003.** Germination requirements of invasive and non-invasive *Atriplex* species: a comparative study. *Flora*, Vol. 198: 45-54.
- Mane, A.V., Deshpande, T.V., Wagh, V.B., Karadge, B.A. et Samant, J.S., 2011.** A critical review on physiological changes associated with reference to salinity. *International Journal of Environmental Sciences*, Vol. 6: 1192-1216.

- Maneva, S., Vatchev, T. et Miteva, E., 2013.** Effect of lead excess in soil on the accumulation of P, K and Na in infected by *Fusarium oxysporum* F. sp. *Radicis-lycopersici* in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants. Bulgarian Journal of Agricultural Science, Vol. 19 (5): 972-980.
- Mangabeira, P.A., Gavrilov, K.L., Furtado de Almeida, A.A., Oliveira, A.H., Sever, M.I., Rusa, T.S., da Costa Silva, D., Labejof, L., Escaig, F., Levi-Setti, R., Schramm Mielke, M., Loustalot, F.G. et Galle, P., 2006.** Chromium localization in plant tissues of *Lycopersicon esculentum* Mill using ICP-MS and ion microscopy (SIMS), Applied Surface Sciences, Vol. 252: 3488-3501.
- Manousaki, E. et Kalogerakis, N., 2009.** Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): Metal uptake in relation to salinity. Environ. Sci. Pollut. Res., Vol. 16: 844–854. doi:10.1007/s11356-009-0224-3.
- Marc Verloo, V., 2003.** Les métaux lourds dans les denrées alimentaires: origine et évolution des teneurs faculté des sciences agronomiques et biologiques appliquées universiteit gent.
- Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P. et Zerbi, G., 2004.** Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. Environ Pollu., Vol. 132: 21–27. doi:10.1016/j.envpol.2004.04.001.
- Marles, R.J. et Farnsworth, N.R., 1995.** Antidiabetic plants and their active constituents. Phytomedicine, In American Botanical Council. Hefb Clip. File: Diabetes Mellitus; Antidiabetic plants HC 6-14-6-1, August, 1996, Vol. 2 (2): 137-165.
- Marouf, A. et Reynaud, J., 2007.** La botanique de A à Z. 1662 définitions. Ed Dunod, 286 p.
- Marouf, A., 2003.** les saponines et flavonoïdes de trois plantes médicinales: (*Achyranthes bidentata* BL; *Atriplex halimus* L. et *Zyziphus mucronata* Wild.) détermination structurale et approche biologique. Thèse de doctorat. Université d'Oran, 121-124.
- Márquez-García, B., Márquez, C., Sanjosé, I., Nieva, F.J.J., Rodríguez-Rubio, P. et Muñoz-Rodríguez, A.F., 2013.** The effects of heavy metals on germination and seedling characteristics in two halophyte species in Mediterranean marshes. Mar. Pollut. Bull., Vol. 70: 119–124. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.02.019.
- Marschner, H., 1995.** Mineral nutrition of higher plants. New York, Academic Press, Hartcourt Brace & Company.
- Marschner, H., 1985.** Mineral Nutrition of Higher Plants. Institute of Plant Nutrition University Hohenheim Germany.
- Martin, R.B., 1994.** Encyclopedia of inorganic chemistry. Ed: R. B. King. Wiley Interscience, Chichester, Vol. 2: 2194-2195.
- Martínez, F.D. et Walker, D.J., 2011.** The effects of soil amendments on the growth of *Atriplex halimus* and *Bituminaria bituminosa* in heavy metal-contaminated soils. Water, Air, Soil Pollution, doi: 10.1007/s11270-011-0839-0.
- Martinez, J.P., Silva, H., Ledent, J.F. et Pinto, M., 2007.** Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and Cell Vol of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). European journal of agronomy, Vol. 26 (1): 30-38.
- Martinez-Villegas, N., Flores-Velez, L.M. et Dominguez, O., 2004.** Sorption of lead in soil as a function of pH: a study case in Mexico. Chemosphere, Vol. 57: 1537-1542.

- Martinez, J.P., Ledent, J.F., Bajji, M., Kinet, J.M. et Lutts, S., 2003.** Effect of water stress on growth, Na⁺ and K⁺ accumulation and water use efficiency in relation to osmotic adjustment in two populations of *Atriplex halimus* L. *Plant growth regulation*, Vol. 41: 63-73.
- Martinez, C.E. et Motto, H.L., 2000.** Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. *Environmental Pollution*, Vol. 107: 153-158.
- Masingue, I., 2003.** Des plantes à l'assaut des métaux lourds. *Environnement*, Vol. 2: 10-11.
- Matysik, J., Alia, Bhalu, B. et Mohanty, P., 2002.** Molecular mechanisms of quenching of reactive oxygen species by proline under stress in plants. *Current science*, Vol. 82: 525-532.
- Mayer, A.M. et Poljakoff-Mayber, A., 1982.** The germination of seeds. Oxford. Paragons press, 211 p.
- Mays, P.A. et Edwards, G.S., 2001.** Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. *Ecol Eng.*, Vol. 16 (4): 487-500.
- Mazliak, P., 1982.** Physiologie végétale « Croissance et développement ». Vol. 2. Ed. Herman, 461 p.
- Mazoyer, S. et François, H., 1998.** La phytoremédiation des métaux lourds. Mémoire de DAA, Institut National Agronomique, Paris-Grignon.
- McCutcheon, S.C. et Schnoor, J.L., 2003.** Overview of phytotransformation and control of wastes. In: *Phytoremediation-Transformation and control of contaminants*, McCutcheon SC and Schnoor JL, Eds (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons), 3-58.
- McFarlane, J.C., 1995.** Anatomy and physiology of plant conductive systems. In: *Plant contamination-Modeling and stimulation of organic chemical processes*, Mc Farlane JC, Eds (Boca Raton, Florida: Lewis Publishers), 38-68.
- McFarland, M.L., Ueckert, D., Hons, F.M. et Hartmann, S., 1994.** Selective-placement burial of drilling fluids: effects on soil properties, buffalograss and fourwing salt-bush after 4 years. *J. Range Managem.*, Vol. 47: 475-480.
- McGrath, S.P., Dunham, S.J. et Corell, R.L., 2000.** Potential for Phytorextraction of Zinc and Cadmium from Soils Using Hyperaccumulator Plants. In TERRY, N. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. New York: Lewis Publishers, 109-128.
- McLaughlin, M.J., Zarcinas, B.A., Stevens, D.P. et Cook, N., 2000.** Soil testing for heavy metals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol. 31 (11-14): 1661-1700.
- Meagher, R.B. et Heaton, A.C.P., 2005.** Strategies for the engineered phytoremediation of toxic element pollution: mercury and arsenic. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, Vol. 32: 502-513.
- Meagher, R.B., 2001.** Pink water, green plants and pinks elephants. *Nature Biotechnology*, Vol. 19: 1120-1121.
- Meagher, R.B., 2000.** Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Curr Opin Plant Biol.*, Vol. 3: 153-162.
- Mehr, Z.S., khajeh, H., Bahabadi1, S.E. et Sabbagh, S.K., 2012.** Changes on proline, phenolic compounds and activity of antioxidant enzymes in *Anethum graveolens* L. under salt stress. *International journal of Agronomy and Plant Production*. ISSN 2051-1914, Vol. 3: 710-715.

- Mei, B., Puryear, J.D. et Newton, R.J., 2002.** Assessment of Cr tolerance and accumulation in selected plant species, *Plant and Soil*, Vol. 247: 223-231.
- Meinhart, H.Z., 1996.** Heavy metal detoxification in higher plants – a review. *Gene*, Vol. 179: 21-30.
- Mekliche, A., Boukecha, D. et Hanifi-Mekliche, L., 2003.** Etude de la tolérance à la sécheresse de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). I. effet de l'irrigation de complément sur les caractères phénologiques, morphologiques et physiologiques. *Annales de l'Institut National Agronomique, El-Harrach, Alger*, Vol. 24 (1-2): 97-110.
- Mellanby, K., 1976.** *Biologie de la pollution*. Ed. Librairie Vuibert. Paris, 71 p.
- Mench, M., Bussiere, S., Boisson, J., Castaing, E., Vangronsveld, J., Ruttens, A., De Koe, T., Bleeker, P., Assuncao, A. et Manceau, A., 2003.** Progress in remediation and revegetation of the barren Jales gold mine spoil after in situ treatment. *Plant and Soil*, Vol. 249: 187–202.
- Mench, M., Morel, J.L. et Guckert, A., 1987.** Metal binding properties of high molecular weight soluble exudates from maize (*Zea mays* L.) roots. *Biology and Fertility of Soils*, Vol. 3: 165-169.
- Mesnoui, M., 2016.** Stress abiotiques sur *Atriplex halimus* L: Effet des métaux lourds et caractérisation des biomarqueurs et bioindicateurs. Thèse de doctorat en sciences agronomiques Université Abdelhamid Ben Badis-Mostaganem. 20/10/2016, 96 p.
- Mesnoui, M. et Lotmani, B., 2015.** Effect of Some Heavy Metals on Germination and Early Seedling Growth of *Atriplex halimus* subsp. *Schweinfurthii*. *Am. J. Agric. Environ. Sci.*, Vol. 15: 2235–2240.
- Messaili, B., 1995.** *Systématiques des spermaphytes*. Office des publications universitaire, 91 p.
- Meyer, J., Michalke, K., Kouril, T. et Hensel, R., 2008.** Volatilisation of metals and metalloids: An inherent feature of methanoarchaea? *Systematic and Applied Microbiology*, Vol. 31: 81-87.
- Meyer, S., Carson, S.L. et Garvin, S.C., 1998.** Seed germination régulation and field seed bank carryover in shadscale (*Atriplex confertifolia* *Chenopodiaceae*); *Journal of Arid Environments*, Vol. 38: 255-267.
- Meyer, K., 1991.** La pollution des sols en Suisse. Rapport du P. N. R "Sol", Liebefield-Berne, 241 p.
- Meyers, D.E.R., Auchterlonie, G.J., Webb, R.I. et Wood, B., 2008.** Uptake and localisation of lead in the root system of *Brassica juncea*. *Environmental Pollution*, Vol. 153: 323-332.
- Mezni M., Bizid E. et Harnza M., 1999.** Effets de la salinité des eaux d'irrigation sur la survie et la croissance de trois variétés de luzerne pérenne. *Fourrages*, Vol. 158: 169-178.
- Mills, W.B., Liu, S. et Fong, F.K., 1991.** Literature review and model (COMET) for colloid/metals transport in porous media. *Ground Water*, Vol. 29: 199-208.
- Milner, M. et Kochian, L.V., 2008.** Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. *Annals of Botany*, Vol. 102: 3-13.
- Miquel, G., 2001.** Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. N° 261 SENAT. Office parlementaire des choix scientifiques e technologiques, 365 p.

- Miranda, M., Lopez-Alonso, M., Castillo, C., Hernandez, J. et Benedito, J.L., 2005.** Effects of moderate pollution on toxic and trace metal levels in calves from a polluted area of northern Spain. *Environment International*, Vol. 31: 543-548.
- Miranda, M.G. et Ilangovan, K., 1996.** Uptake of lead by *Lemma Gibba* L. : influence on specific growth rate and basic biochemical changes. *Bull. environ. Contam. Toxicol.*, 56-100.
- Mirsky, N. et Nitsa, A., 2001.** Naturally extracted and synthetic hypoglycemic or hypolipidemic compositions. Application N°. US 09/842971. doi: <http://www.freepatentsonline.com>.
- Mishra, A. et Choudhuri, M.A., 1998.** Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane deterioration mediated by lipoxygenase in rice *Biologia Plantarum*, Vol. 42 (1999): 409-415.
- Mishra, S., Singh, V., Srivastava, S., Srivastava, R., Srivastava, M.M., Dass, S., Satsangi, G.P. et Prakash, S., 1995.** Studies on uptake of trivalent and hexavalent chromium by maize (*Zea mays*). *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 33: 393-397.
- Misra, N. et Dwivedi, U.N., 2004.** Genotypic difference in salinity tolerance of green gram cultivars. *Plant Sci.*, Vol. 166: 1135-1142.
- Mobin, M. et Khan, N.A., 2007.** Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard (*Brassica juncea*) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress, *Journal of Plant Physiology*, Vol. 164: 601-610.
- Mohan, B.S. et Hosetti, B.B., 1998.** Lead toxicity to *Salvinia natans* grown in macrophyte ponds. *J. ecotoxic. env. monit.*, Vol. 8 (1): 3-4.
- Molinari, H.B., Correa, M., Celso, J., Daros, E., De Campos, M.K., De Carvalho, F., Jane Fiuzza, R., Portela, F.J., Bernalhok, C., Pereira, L.F. et Vieira, L.G.E., 2007.** Evaluation of the stress-inducible production of proline in transgenic sugarcane (*Saccharum* spp.): osmotic adjustment, chlorophyll fluorescence and oxidative stress. *Physiologia Plantarum.*, Vol. 130 (2): 218-229.
- Monneveux, P. et Nemmar, M., 1986.** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L) et chez le blé dur (*Triticum durum* DESF). Étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, Vol. 6, 583-590.
- Moosavi, S.A., Gharineh, M.H., Afshari, R.T. et Ebrahimi, A., 2012.** Effects of Some Heavy Metals on Seed Germination Characteristics of Canola (*Barassica napus*), Wheat (*Triticum aestivum*) and Safflower (*Carthamus tinctorious*) to Evaluate Phytoremediation Potential of These Crops. *J. Agric. Sci.*, Vol. 4: 11–19. doi: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v4n9p11>.
- Moreno, G., Gallardo, J.F., Ingelmo, F., Cuadrado, S. et Hernandez, J., 1996.** Soil water budget in four *Quercus pyrenaica* forests across a rainfall gradient. *Arid Soil Res Rehab*, Vol. 10: 67-86.
- Morera, M.T., Echeverria, J.C., Mazkieran, C. et Garrido, J.J., 2001.** Isotherms and sequential extraction procedures for evaluating sorption and distribution of heavy metals in soils. *Environmental Pollution*, Vol. 113: 135-144.
- Morin, S., Ghanim, M., Zeidan, M., Czosnek, H., Verbeek, M. et Van Den Heuvel, J.F.J. M., 1999.** A GroEL homologue from endosymbiotic bacteria of the whitefly *Bemisia tabaci* is implicated in the circulative transmission of Tomato yellow leaf curl virus. *Virology*, Vol. 256: 75-84.

- Morot-Gaudry, J.F., 2013.** Nutrition minérale des plantes: aspects moléculaires. Académie d'agriculture de France, 21 p.
- Morris, J.T., 1995.** The salt and water balance of intertidal sediments: results from North Inlet, South Carolina. *Estuaries*, Vol. 18: 556-567.
- Mouri, C.H., Benhassaini, H., Bendimered, F.Z. et Belkhodja, M., 2014-**Variation saisonnière de la teneur en proline et en sucres solubles chez l'oyat (*Ammophila arenaria* L. Link) provenant du milieu naturel de la côte ouest de l'Algérie. *Acta Botanica Gallica: Botany Letters*, Vol. 159 (1): 127-135.
- Mozafar, A. et Goodin, J.R., 1970.** Vesiculated hairs: a mechanism for salt tolerance in *Atriplex halimus* L. *Plant Physiology*, Vol. 45: 62-65.
- Mühlbachova, G., Contin, M. et De Nobili, M., 2004.** Coupled ICP-AES study of Pb and Zn complexation in long-term contaminated soils. EUROSOIL Freiburg, Germany: N°190.
- Mulas, M. et Mulas, G., 2004.** Potentialités d'Utilisation Stratégique des Plantes des Genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la Lutte contre la Désertification. Short and Medium-Term Environmental Action Programme (SMAP) février 2004, Vol. 9 (23): 38-54.
- Mulligan, C.N., Yong, R.N. et Gibbs, B.F., 2001.** Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, Vol. 60: 193-207.
- Murphy, A. et Taiz, L., 1995.** A new vertical mesh transfer technique for metal-tolerance studies in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, Vol. 108: 29-38.
- Muthukumarasamy, M., Gupta, S.D. et Pannerselvam, R., 2000.** Enhancement of peroxidase, polyphenol oxidase and superoxide dismutase activities by triadimefon in NaCl stressed *Raphanus sativus* L. *Biol. Plant.*, Vol. 43: 317-320.
- Naczka, M. et Shahidi, F., 2004.** Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*, Vol. 1054 (1-2): 95-111.
- Naderi, N., Mirzamasoumzadeh, B. et Aghaei, A., 2013.** Effects of different levels of Lead (Pb) on physiological characteristics of sugar beet. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences. IJACS.*, Vol. 5 (10): 1154-1157.
- Naidu, R., Bolan, N.S., Kookana, R.S., Tiller, K.G., 1994.** Ionic strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. *Eur. J. Soil Sci.*, Vol. 45: 419-429.
- Nakada, M., Fukaya, K., Takeshita, S. et Wada, Y., 1979.** The accumulation of heavy metals in the submerged plant (*Elodea nuttallii*). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 22: 21-27.
- Navarro, L., Dunoyer, P., Jay, F., Arnold, B., Dharmasiri, N., Estelle, M., Voinnet, O. et Jones, J.D.G., 2006.** A plant miRNA contributes to antibacterial resistance by repressing auxin signaling *Science*, Vol. 312: 436-439.
- Nazari-Dashlibrown, P., 1997.** Plantation of fodder shrubs in arid and semi-arid zones of Iran. *CIHEAM-Options Méditerranéennes*, 143-146.
- Nedelkoska, T.V. et Doran, P.M., 2000.** Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerescens*. *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 67: 607-615.
- Nedjraoui, D., 2001.** Country Pasture-Forage Resource Profiles. Algeria. FAO.
- Nedjraoui, D., 2001.** Université des Sciences et de la Technologie H. Boumediene. Profil fourrager de l'Algérie, 30 p.

- Nefzaoui, A., 2000.** Nutritive value of spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* var. *inermis*) and *Atriplex* (*Atriplex nummularia*) based diets for sheep. In: Gintzburger G., M. Bounejmate and A. Nefzaoui (Eds.). Fodder Shrub Development in Arid and Semi-arid Zones. Proceedings of the Workshop on Native and Exotic Fodder Shrubs in Arid and Semi-arid Zones, 27 October-2 November 1996, Hammamet, Tunisia. ICARDA, Aleppo (Syria), Vol. 2: 518-520.
- Nefzaoui, A., 1997.** The integration of fodder shrubs and cactus in the feeding of small ruminants in the arid zones of North Africa. Livestock feed resource within integrated farming systems. Second FAO, Electronic Conference September 1996–February 1997, 467–483.
- Nefzaoui, A. et Bensalem, H., 1996.** Spineless cactus: a strategic fodder for West Asia and North Africa arid zones. International Symposium Proceedings: Cactus pear and nopalitos processing and uses.
- Nefzaoui, A. et Chermiti, A., 1991.** Place et rôle des arbuste fourragers dans les parcours des zones arides et semi arides de la Tunisie. Options Méditerranéennes, Vol. 16: 119-125.
- Négre, R., 1961.** Petite flore des régions arides du Maroc occidental. Tome I. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris (France).
- Nehnevajova, E., 2006.** Non-Gmo approach for the improvement of heavy metal accumulation and extraction of high yielding crop species for efficient phytoextraction of contaminated soil Université Comenius Bratislava, Slovaquie et de nationalité slovaque, EPFL. Thèse de doctorat N°3414 La Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement.
- Neumann, D., Zurnieden, U., Lichtenberger, O. et Leopold, I., 1995.** How does *Armeria maritima* tolerate high heavy metal concentrations? J. Plant Physiol., Vol. 146: 704-717.
- Newman, L.A., Strand, S.E., Choe, N., Duffy, J., Ekuan, G., Ruzsai, M., Shurtleff, B.B., Wilmoth, J., Heilman, P. et Cordon, M.P., 1997.** Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. Environ. Sci. Technol., Vol. 31: 1062-1067.
- Ng-Timothy, J. et Tigchelaar, E.C., 1973.** Inheritance of low temperature seed sprouting in tomato. J. Amer. Soc. Hort. Sci., Vol. 98: 314–316.
- Niekerk, W., Sparks, C., Rethmani, N. et Coertze, R., 2004.** Minéral composition of certain *Atriplex* species and *Cassia sturtii*. South African Journal of Animal Science, 105-107.
- Nijveldt, R.J., Nood, E., Hoorn, D.E., Boelens, P.G., Norren, K. et Leeuwen, P., 2001.** Flavonoids: A review of probable mechanisms of action and potential applications. Am. J. Clin Nutr., Vol. 74: 418–425.
- Nimick, D.A. et Moor, J.M., 1991.** Prediction of water-soluble metal concentrations in fluvially deposited tailings sediments, Upper Clark Fork Valley, Montana, USA. Applied Geochem., Vol. 6: 635-646.
- Niu, X., Rsessan, R.A., Hasegawa, P.M. et Pardo, J.M., 1995.** Ion homeostasis in NaCl stress environments. Plant Physiology, Vol. 109 (3): 735-742.
- Noctor, G. et Foyer, C.H., 1998.** Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. Annu. Rev. Plant Biol., Vol. 49: 249–279.
- Novotny, V., 1995.** Diffuse sources of pollution by toxic metals and impact on receiving waters. In Heavy Metals: Problems and Solutions (W, Salomons, U. Frstner, and P. Mader, Eds.) Sprionger-Verlag, Berlin, 33-52.

- Nriagu, J.O., 1978.** Lead in the atmosphere. In: J. O. Nriagu (ed), The Biogeochemistry of Lead in the Environment, Part A: Ecological Cycles, Elsevier/North-Holland Biomedical Press, New York, 137-184.
- Nye, P.H., 1986.** Acid-base changes in the rhizosphere. In: Tinker, B., Laye, A., and Praeger P. H., (eds.). Advances in plant nutrition. Scientific, New York, 129–153
- Obroucheva, N.V., Bystrova, E.I., Ivanov, V.B., Antipova, O.V. et Seregin, I.V., 1998.** Root growth responses to lead in young maize seedlings. Plant and Soil, Vol. 200: 55-61.
- Ochatt, S.J., Marconi, P.L., Radice, S., Arnozis, P.A. et Caso, O.H., 1999.** In vitro recurrent selection of potato: production and characterization of salt tolerant cell lines and plants. Plant. Cell. Tiss. Org. Cult., Vol. 55: 01-08.
- Oliveira, R.S., Dodd, J.C. et Castro, P.M.L., 2001.** The mycorrhizal status of *Phragmites australis* in several polluted soils and sediments of an industrialised region of Northern Portugal. Mycorrhiza, Vol. 10: 241-247.
- Olympios, C.M., 1999.** Overview of Soil less culture: Advantages, Constraints and Perspectives for its use in Mediterranean countries. Cahiers Options Méditerranéennes, Vol. 31: 68-69.
- Orłowska, E., Zubek, S.Z., Jurkiewicz, A., Szarek-Lukaszewska, G. et Turnau, K., 2002.** Influence of restoration on *Arbuscular mycorrhiza* of *Biscutella laevigata* L. (*Brassicaceae*) and *Plantago lanceolata* L. (*Plantaginaceae*) from calamine spoil mounds. Mycorrhiza, Vol. 12: 153-160.
- Ortiz-Dorda, J., Martinez-Mora, C., Correal, E., Simon, B. et Cenis, J.L., 2005.** Genetic structure of *Atriplex halimus* populations in the mediterranean basin. Ann. Bot., Vol. 95 (27): 827–834.
- Osman, A.E. et Ghassali, F., 1997.** Effect of storage conditions and presence of fruiting bracts on the germination of *Atriplex halimus* and *Salsola vermiculata*. Expl. Agric., Vol. 33: 149-156.
- Osmond, C.D., Bjorkmann, O. et Anderson, D.J., 1980.** Physiological processes in plant ecology: Towards a synthesis with *Atriplex*. Berlin, Heidelberg, New york: Springer-verlag, 463 p.
- Ouadah, Y., 1982,** contribution à l'étude des principales essences d'intérêt fourragère des régions arides et semi-arides. Application a quelques espèces Th. ing. INA, 108 p.
- Overall, R.A. et Parry, D.L., 2004.** The uptake of uranium by *Eleocharis dulcis* (Chinese water chestnut) in the Ranger Uranium Mine constructed wetland filter. Environmental Pollution, Vol. 132: 307-320.
- Ozenda, P., 1991.** Flore et végétation du Sahara. Paris: Éd. du Centre National de la Recherche Scientifique, 660 p.
- Ozenda P., 1983.** Flore de Sahara, Deuxième édition, édition de centre national de la recherche scientifique Paris, 220-225.
- Page, A.L., Bingham, F.T. et Chang, A.C., 1981.** Cadmium in terrestrial plants. In Lepp, N. W. (Ed.) Effect of Heavy Metal Pollution on Plants. Vol. I. Effects of Trace Metals on Plant Function, Applied Science Publishers, London, U. K., 77 p.

- Pagliano, C., Raviolo, M., Dalla Vecchia, F., Gabbrielli, R., Gonnelli, C., Rascio, N., Barbato, R. et La Rocca, N., 2006.** Evidence for PSII donor-side damage and photoinhibition induced by cadmium treatment on rice (*Oryza sativa* L.). *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, 84: 70–78. doi:10.1016/j.jphotobiol.2006.01.012.
- Palmer, S. et Moy, G., 1991.** Environmental Pollution, Food Contamination and Public Health. *European Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 45: 144-146.
- Panda, S. K., 2003.** Heavy-metal phytotoxicity induces oxidative stress in a moss, *Taxithellium* sp. *Science*, Vol. 84 (5): 631-633.
- Papanastasis, V.P., Tsiouvaras, C.N., Dini-Papanastasi, O., Vaitis, T., Stringi, L., Ceret, C. G.F., Dupraz, C., Armand, D., Meuret, M. et Olea, L., 2002.** Selection and Utilization of Cultivated Fodder Trees and Shrubs in the Mediterranean Region. CIHEAM-Options méditerranéennes.
- Paquin R., 1986.** Effet de l'humidité du sol sur la teneur de la proline libre et des sucres totaux de la luzerne durcie au froid et à la sécheresse. *Can. Journal Plant Science*, Vol. 66: 95-101.
- Pardha Saradhi, P., Alia-Arora, S. et Prasad, K. V. S. K., 1995.** Proline accumulate in plants exposed to UV radiation and protects them against UV induced peroxidation. *Biochem. Biophys. Res. Commun*, Vol. 209: 1-5.
- Parent, C., Capelli, N. et Dat, J., 2008.** Reactive oxygen species, stress and cell death in plants. *Comptes rendus Biologie*, Vol. 331 (4): 255-261.
- Parida, A.K. et Das, A.B., 2005.** Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, Vol. 60: 324-349.
- Par-Smith, G.A., 1982.** Biogeography and evaluation of the shrubby Australian species of *Atriplex*. In: W. R. Barker and P. J. Greensdale (Eds.) *Evolution of the Flora and Fauna of Arid Australia*. Peacock, Freville, S. Australia, 221-299.
- Patra, M., Bhowmik, N., Bandopadhyay, B. et Sharma, A., 2004.** Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environ Exp Bot.*, Vol. 52: 199-223.
- Paulose, B., Datta, S.P., Rattan, R.K. et Chhonkar, P.K., 2006.** Effect of amendments on the extractability, retention and plant uptake of metals on a sewage-irrigated soil. *Environ. Pollut.*, Vol. 146: 19–24.
- Pearce, R.B., 1996.** Antimicrobial defences in the wood of living trees. *New Phytol.*, Vol. 132: 203–233. doi:10.1111/j.1469-8137.1996.tb01842.x.
- Pedro, G. et Delmas, A.B., 1970.** Les principes géochimiques de la distribution des éléments traces dans les sols. *Annales Agronomiques*, Vol. 21: 483-518.
- Pendias, H., 1984.** Trace elements in soil and plants. CRC Press. Boca Raton, 99-108.
- Peng, C.I., Chen, Y.K. et Leong, W.C., 2005.** Five new species of *Begonia* (*Begoniaceae*) from Taiwan. *Bot. Bull. Acad. Sin.*, Vol. 46: 255-272.
- Peralta, J.R., Gardea-Torresdey, J.L., Tiemann, K.J., Gomez, E., Arteaga, S., Rascon, E. et Parsons, J.G., 2001.** Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 66: 727–734. doi:http://dx. doi.org/10.1007/s001280069.

- Peralta-Videa, J.R., de la Rosa, G., Gonzalez, J.H. et Gardea-Torresdey, J.L., 2004.** Effects of the growth stage on the heavy metal tolerance of alfalfa plants. *Advances in Environmental Research*, Vol. 8: 679-685.
- Pereira, L.B., Mazzanti, C.M.A., Gonçalves, J.F., Cargnelutti, D., Tabaldi, L.A., Becker, A.G., Calgaroto, N.S., Farias, J.G., Battisti, V., Bohrer, D., Nicoloso, F.T., Morsch, V.M. et Schetinger, M.R.C., 2010.** Aluminum-induced oxidative stress in cucumber. *Plant Physio Biochem.*, 1-7.
- Pereira, B. et Sonnet, P., 2007.** La contamination diffuse des sols par les éléments traces métalliques en Région wallonne. Dossier scientifique dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon, Université catholique de Louvain, Faculté d'Ingénierie agronomique, biologique et environnementale, Unité des Sciences du sol.
- Pereira, L.B., Tabaldi, L.A., Gonçalves, J.F., Jucoski, J.O., Pauletto, M.M., Weis, S.N., Nicoloso, F.T., Borher, D., Rocha, J.B.T. et Schetinger, M.R.C., 2006.** Effect of aluminum on δ -aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) and the development of cucumber (*Cucumis sativus*). *Environ Exp Bot.*, Vol. 57: 106-115.
- Pérez-de-Luque, A., Gonzalez-Verdejo, C.I., Lozano, M.D., Dita, M.A., Cubero, J.I., Gonzalez-Melendi, P., Risueno, M.C. et Rubiales, D., 2006.** Protein cross-linking, peroxidase and beta-1, 3-endoglucanase involved in resistance of pea against *Orobanche crenata*. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 57: 1461–1469.
- Peterson, A.E., 1986.** Essential and toxic heavy metals in soil and plant tissue from municipal sewage sludge applications to cropland. *proc. of 13th Congress of Intl. Soil. Sei., Hamburg, Germany*, 425-427.
- Peuke, A.D. et Rennenberg, H., 2005.** Phytoremediation with transgenic trees. *Zeitschrift fur Naturforschung*, Vol. 60: 199-207.
- Phang, I.C., Leung, D.W.M., Taylor, H.H. et Burritt, D.J., 2011.** Correlation of growth inhibition with accumulation of Pb in cell wall and changes in response to oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant Growth Regul.*, Vol. 64: 17-25.
- Picard, J.F., Timbal, J. et Becker, M., 1982.** Larousse des arbres et arbuste, ed. Librairie Larousse, Paris, 266 p.
- Pichard, A., Bisson, M., Houeix, N., Gay, G., Lacroix G., Lefevre, J.P., Magaud, H., Migne, V., Morin, A. et Tissot, S., 2005.** Zinc et ses dérivés INERIS Institut national de l'environnement Industriel et des risques, 21 p.
- Pichard, A., Bisson, M., Hulot, C., Lacroix Lefèvre, J.P., Magaud, H., Oberson D., Geneste, Morin, A. et Pépin, G., 2002.** Plomb et ses dérivés INERIS Institut national de l'environnement Industriel et des risques, 19 p.
- Pickering, I.J., Wright, C., Bubner, B., Ellis, D., Persans, M.W., Yu, E.Y., George, G.N., Prince, R.C. et Salt, D.E., 2003.** Chemical form and distribution of selenium and sulfur in the selenium hyperaccumulator *Astragalus bisulcatus*. *Plant Physiol.*, Vol. 131: 1460-1467.
- Picot A., 2003.** Intoxication de l'organisme par les métaux lourds et autres toxiques le mercure, le plomb et le cadmium trois métaux traces toxiques Conférence ADNO 2003 Directeur Honoraire CNRS, Gif/Yvette, Paris, 2-13.
- Piechalak, A., Tomaszewska, B., Baralkiewicz, D. et Malecka, A., 2002.** Accumulation and detoxification of lead ions in legumes. *Phytochemistry*, Vol. 60: 153-162.

- Pierangeli, M.A.P., Guilherme, L.R.G., Curi, N., Silva, M.L.N., Oliveira, L.R. et Lima, J.M., 2001.** Lead adsorption/desorption in Brazilian oxisols as a function of pH. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Vol. 25: 269-277.
- Pilon-Smits, E. et Pilon, M., 2002.** Phytoremediation of metals using transgenic plants. *Crit Rev Plant Sci.*, Vol. 21: 439– 56.
- Pilon-Smits, E., 2005.** Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, Vol. 56: 15-39.
- Piotrowska, A., Bajguz, A., Godlewska-Zylkiewicz, B. et Zambrzycka, E., 2010.** Changes in growth, biochemical components, and antioxidant activity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (*Lemnaceae*) exposed to cadmium and lead. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 58: 594–604. doi:10.1007/s00244-009-9408-6.
- Piotto, B., Bartolini, G., Bussotti, F., García, A.A.C., Chessa, I., Ciccacese, C., Ciccacese, L., Crosti, R., Cullum, F.J., Noi, A.D., García-Fayos, P., Lambardi, M., Lisci, M., Lucci, S., Melini, M., Reinoso, J.C.M., Murranca, S., Nieddu, G., Pacini, E., Pagni, G., Patumi, M., García, F.P., Piccini, C., Rossetto, M., Tranne, G. et Tylkowski, T., 2003.** Fact sheets on the propagation of Mediterranean trees and shrubs from seed. Seed propagation of Mediterranean trees and shrubs. APAT-Agency for the protection of the environment and for technical services Via Vitaliano Brancati, 48-00144 Roma – Italy. April 2003.
- Pitt, J., 2004.** Current distribution and strategic management options for *Cenchrus ciliaris* L. (*Buffel grass*) in South Australia. *Plant Protection Quarterly*, Vol. 19 (2): 415-421.
- Pizet, Y., 1988.** Croissance, morphologie et dynamique de l'état physiologique des plants de Châtaignier (*Castania sativa* Miller). *Ann. Rech. Forest.*, Vol. 45 (1): 17-32.
- Pollard, A.J., Powell, K.D., Harper, F.A. et Smith, J.A.C., 2002.** The genetic basis of metal hyperaccumulation in plants. *CRC Crit Rev Plant Sci.*, Vol. 21: 539-566.
- Pollard, A.J. et Baker, A.J.M., 1997.** Deterrence of herbivory by zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens* (*Brassicaceae*). *New Phytologist*, Vol. 135: 655-658.
- Poskuta, J.W., Parys, E., Romanowska, E., Gajdzis-Gujdan, H. et Wróblewska, B., 1988.** The effects of lead on photosynthesis, ¹⁴C distribution among photoassimilates and transpiration of maize seedlings. " *Acta societatis botanicorum Poloniae*, Vol. 57: 149-155.
- Potters, G., Pasternak, T.P., Guisez, Y., Palme, K.J. et Jansen, M.A.K., 2007.** Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science*, Vol. 12, 98–105.
- Pottier, A., 1981.** Flore de la Tunisie. Angiospermes dicotylédones gamétopétales.
- Pouget M., 1971.** Etude agro-pédologique du bassin du Zahrez Gharbi. (Feuille Rocher de Sel). Etude D. E. M. R. H., Alger, 160 p.
- Pourrat, Y. et Dutuit, P., 1994.** Etude précoce des effets morphologiques et physiologiques du rapport sodium/calcium in vitro sur une population d'*Atriplex halimus*. Ed: AUPLEF-UREF. Paris, 283-295.
- Pourrut, B., 2008.** Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba* L. . Thèse doctorat, université de Toulouse, 69-84.
- Prasad, M.N.V., 2003.** Phytoremediation of metal-polluted ecosystems. Hype for commercialization. *Russian Journal of plant physiol.*, Vol. 50 (5): 764-780.

- Prasad, M.N.V. et Freitas, H.M.D.O., 2003.** Metal hyperaccumulation in Plants-Biodiversity Prospecting for Phytoremediation Technology. *Molecular Biology and Genetics*, Vol. 6: 25-42.
- Preeti, P. et Tripathi, A.K., 2011.** Effect of heavy metals on Morphological and Biochemical characteristics of *Albiza procera* (Roxb.) Benth. Seedlings. *International journal of onvermental sciens.*, Vol. 1 (5): 512-522.
- Proctor, J., 2003.** Vegetation and soil plant chemistry on ultramafic rock in the tropical Far East. *Persp. in Plant Ecol. Evol., and Syst.*, Vol. 6 (1-2): 105-124.
- Pulford, I.D. et Watson, C., 2003.** Phytoremediation of heavy metal contaminated land by trees. A review. *Environment International*, Vol. 29: 529-540.
- Quaghebeur, M. et Rengel, Z., 2003.** The distribution of arsenate and arsenite in shoots and roots of *Holcus lanatus* is influenced by arsenic tolerance and arsenate and phosphate supply. *Plant Physiol.*, Vol. 132: 1600-1609.
- Quezel, P. et Santa, S., 1962.** Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. C.N.R.S. Paris, Vol. 2: 1170-1174.
- Radosevich, S., Holt, J. et Ghera, C., 1997.** *Weed ecology: implications for management*. 2. ed. New York: Wiley, 588 p.
- Rahmoune, C., Maâlem, S. et Bennaceur, M., 2000.** Etude comparative de rendement en matière sèche et en matière azotée totale de trois espèces de plantes steppiques du genre *Atriplex*, 219-221.
- Ralinda, R. et Miller, P.G., 1996.** *Phytoremediation. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, TO-96-03, Pittsburgh PA*, 1-26.
- Ramade, F., 2000.** *Dictionnaire encyclopédique des pollutions*. Ed. Ediscience international. Paris, 690 p.
- Ramade, F., 1982.** *Elements d'écologie. Ecologie appliquée*. Ed. Mc Grow-Will. Paris, 452 p.
- Raskin, I., Smith, R.D. et Salt, D.E., 1997.** Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment, *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 8: 221-226.
- Raskin, I., Kumar, N.P.B.A., Dushenkov, S. et Salt, D.E., 1994.** Bioconcentration of heavy metal by plants. *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 5: 285-290.
- Reddy, C.N. et Patrick, W.H., 1977.** Effect of redox potential and pH on the cadmium and lead by rice plants. *J. Environ. Qual.*, Vol. 6: 259-262.
- Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Becquer, T., Echevarria, G. et Miranda, Z.J.G., 2007.** The Flora and Biogeochemistry of the Ultramafic Soils of Goiás State, Brazil. *Plant and Soil*, Vol. 293: 107-119.
- Reilley, K.A., Banks, M.K. et Schwab, A.P., 1996.** Organic chemicals in the environment: dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 25: 212-219.
- Reimann, C., 1992.** Sodium exclusion by *Chenopodium* species. *J. Exp. Bot.*, Vol. 43: 503-510.
- Reinoso, H., Sasa, L., Reginato, M. et Luna, V., 2005.** Histological alteration induced by sodium sulfate in the vegetative anatomy of *Prosopis strombulifera* (Lam.) Benth. *Word journal of agricultural sciences*, Vol. 1 (2): 109-119.

- Remon, E., 2006.** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques: vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution. Thèse de l'Université Jean Monnet, 166 p.
- Remon, E., Bouchardon, J. L., Cornier, B., Guy, B., Leclerc, J.C. et Faure, O., 2005.** Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution*, Vol. 137: 316-323.
- Rengel, Z., 1999.** Heavy Metals as Essential Nutrients. In: Prasad, M. N. V. & Hagemayer, J. (Eds.). *Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, 231-251.
- Rezazadeh, A., Ghasemzadeh, A., Brani, M. et Telmadarrehei, T., 2012.** Effect of salinity on phenolic composition and antioxidant activity of Artichoke (*Cynara scolymus* L.) leaves. *Research Journal of Medicinal Plant*, Vol. 6: 245-252.
- Richter, R. et Hlusek, B., 1986.** The effect of available Zn, Cd and Pb in soil on their concentrations in organs of root vegetables, proc. of 13th congress of Intl. Soil Sci. Soc. Hamburg, Germany, 447-448.
- Robert, M. et Juste, C., 1999.** Enjeux environnementaux et industriels-Dynamique des éléments traces dans l'écosystème Sol. In: « Spéciation des métaux dans le sol ». Les Cahiers du Club Crin, Paris, 15-37.
- Robinson, E., Dooley, T. et Williams, K., 1998.** UV-induced melanoma cell lines and their potential for proteome analysis: A review. *The J. Exp. Zoology*, Vol. 282: 48-53.
- Rodriguez, H.G., Roberts, J.K.M., Jordan, W.R. et Drew, M.C., 1997.** Growth, water relations, and accumulation of organic and inorganic solutes in roots of maize seedlings during salt stress. *Plant Physiology*, Vol. 113 (3): 881-893.
- Roehl, K.E. et Czurda, K., 1998.** Diffusion and solid speciation of Cd and Pb in clay liners. *Applied Clay Science*, Vol. 12: 387-402.
- Roels, H., Bruaux, P., Buchet, J.P., Claeys Thoreau, F., Lauwerys, R., Lafontaine, A., Hubermont, G. et Van Overschelde, J., 1976.** Impact of air pollution by lead on the heme biosynthetic pathway in school-age children. *Arch Environ Health*, Vol. 31 (6): 310-316.
- Romkens, P., Bouwman, L., Japenga, J. et Draaisma, C., 2002.** Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils. *Environmental Pollution*, Vol. 116: 109-121.
- Rondeau, H., 1972.** S.O.S. Biosphère. Pollution. Ed. Hurtubise. HMH. Montréal 126. Canada, 155 p.
- Roper, J.C., Dec, J. et Bollag, J., 1996.** Using minced horseradish roots for the treatment of polluted waters. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 25: 1242-1247.
- Rosas, M.R., 1989.** El genero *Atriplex* (*Chenopodiaceae*) en Chile. *Gayana Bot.*, Vol. 46 (1-2): 3-82.
- Rost, U., Joergensen, R.G. et Chander, K., 2001.** Effects of Zn enriched sewage sludge on microbial activities and biomass in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, Vol. 33: 633-638.
- Rousseaux, P., 1988.** Heavy metals in household refuse: origins, chemical forms. Contents. RID Programme on Recycling and utilization of waste. Ed. Commission des Communautés Européennes. DG XII, 123 p.

- Rubanza, C.D.K., Shem, M.N., Otsyina, R., Bakengesa, S.S., Ichinohe, T. et Fujihara, T.T., 2005.** Polyphenolics and tannins effect on in vitro digestibility of selected Acacia species leaves. *Anim Feed Sci Technol.*, Vol. 119: 129–142.
- Ruby, M.V., Schoof, R., Brattin, W., Goldade, M., Post, G., Harnois, M., Mosby, D.E., Casteel, S.W., Berti, W., Carpentier, M., Edwards, D., Cragin, D. et Chappell, W., 1999.** Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment. *Environmental Science and Technology*, Vol. 33: 3697-3705.
- Rueggsegger, A. et Brunold, C., 1992.** Effect of cadmium on γ -glutamylcysteine synthesis in maize seedlings. *Plant Physiology*, Vol. 99: 428-433.
- Rugh, C.L., Wilde, H.D., Stack, N.M., Thompson, D.M., Summers, A.O. et Meagher, R.B., 1998,** Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation, *Nature biotechnology*, Vol. 16: 925-928.
- Rugh, C.L., Wilde, H.D., Stack, N.M., Thompson, D.M., Summers, A O. et Meagher, R.B., 1996.** Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial mer A gene. *Proc Natl Acad Sci. USA*, Vol. 93: 3182-3187.
- Sabri, Z. et Touati, H., 2001.** Contribution à l'étude caryologique de trois populations d'*Atriplex halimus* L. dans le littoral Oranais. Mémoire de D.E.S. Université d'Oran Es-Sénia.
- Sahi, S.V., Bryant, N.L., Sharma, N.C. et Singh, S.R., 2002.** Characterization of a lead hyperaccumulator shrub, *Sesbania drummondii*. *Environ Sci Technol.*, Vol. 36: 4676-4680.
- Saidi, N., 2005.** Essais de phytoremédiation par vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*). Laboratoire des Géosciences Appliquée. Equipe : Pollution & Phytoremédiation. Faculté des Sciences. Kenitra. Maroc, 04 p.
- Sailaja, K. et Sujatha, B., 2013.** Impact of salt stress (NaCl) on pigments, phenols and flavonoids in C4 (*Sorghum bicolor*) and C3 (*Oryza sativa*) cultivars. *International Journal of Biological & Pharmaceutical Research*, Vol. 4 (5): 361-367.
- Sairam, R. K. et Tyagi, A., 2004.** Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science*, Vol. 86 (3): 407-421.
- Salo, L.F., Artiola, J.F. et Goodrich-Mahoney, J.W., 1996.** Plant species for revegetation of a saline flue gas desulfurization sludge pond. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 25: 802-808.
- Salt, D.E. et Kramer, U., 2000.** Mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. In: Raskin I, Ensley B (Eds) *Phytoremediation of Toxic Metals*. John Wiley and Sons Inc., New York, 231-246.
- Salt, D.E., Prince, R.C., Baker, A.J.M., Raskin, I. et Pickering, I.J., 1999.** Zinc ligands in the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* as determined using X-ray absorption spectroscopy. *Environ Sci Tech.*, Vol. 33: 713-717.
- Salt, D.E., Smith, R.D. et Raskin, I., 1998.** Les mécanismes de la phytoaccumulation cellulaire. La phytotolérance chez les plantes hyperaccumulatrices. I. *Phytoremediation. Annu. Rev. Plant. Physiol.*, Vol. 49: 643-668.
- Salt, D.E., Pickering, I.J., Prince, R.C., Gleba, D., Dushenkov, S., Smith, R.D. et Raskin, I., 1997.** Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian mustard. *Environ Sci Technol.*, Vol. 31: 1635-1644.

- Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I. et Raskin, I., 1995.** Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, Vol. 13: 486-474.
- Samarakoon, A.B. et Rauser, W.E., 1979.** Carbohydrate levels and phosphoassimilate export from leaves of *Phaseolus vulgaris* exposed to excess cobalt, nickel and zinc. *Plant Physiol.*, Vol. 63: 1165-1169.
- Sandermann, H., 1994.** Higher plant metabolism of xenobiotics; the "green liver" concept. *Pharmacogenetics*, Vol. 4: 225-241.
- Sandermann, H., 1992.** Plant metabolism of xenobiotics. *TIBS*, Vol. 17: 82-84.
- Sanders, J.R., McGrath, S.P. et Adams, T.M., 1986.** Zinc, copper and nickel concentrations in ryegrass grown on sewage sludge-contaminated soils of different pH. *J. Sci. Food Agr.*, Vol. 37: 961-968.
- Sanità di Toppi, L. et Gabbrielli, R., 1999.** Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 41: 105-130.
- Sasmaz, A., Obek, E. et Hasar, H., 2008.** The accumulation of heavy metals in *Typha latifolia* L. grown in a stream carrying secondary effluent. *Ecol Eng.*, Vol. 33 (3-4): 278-284.
- Sauge-Merle, S., 2003.** Optimisation des capacités d'accumulation de métaux lourds et de radionucléotides chez les microorganismes. *Appl & Environ. Microbiol.*, Vol. 69: 490-494.
- Sauve, S., McBride, M.B. et Hendershot, W.H., 1997.** Speciation of lead in contaminated soils. *Environmental Pollution*, Vol. 98: 149-155.
- Sayed, S.A., 1999.** Effects of lead and kinetin on the growth, and some physiological components of safflower. *Plant Growth Reg.*, 29-167.
- Sauvant, D. 1988.** La composition et l'analyse des aliments. In : Jarrige R (ed), *Alimentation des Bovins. Ovins et Caprins*, INRA, Paris, 305-314.
- Schat, H., Sharma, S.S. et Vooijs, R., 1997.** Heavy metal-induced accumulation of free proline in a metal-tolerant and a nontolerant ecotype of *Silene vulgaris*. *Physiologia Plantarum*, Vol. 101: 477-482.
- Schat, H. et Ten Bookum, W.M., 1992.** Metal-specificity of metal tolerance syndromes in higher plants. In: *The vegetation of ultramafic (Serpentine) soils*. A. Baker, J. Proctor and R. D. Reeves. Andover, Intercept, 337-351.
- Scheifler, R., Schwartz, C., Echevarria, G., De Vaufleury, A., Badot, P. M. et Morel, J.L., 2003.** « Nonavailable » Soil Cadmium Is Bioavailable to Snails: Evidence from Isotopic Dilution Experiments. *Environmental Science and Technology*, Vol. 37 (1): 81-86.
- Schneegurt, M.A., Jain, J.C., Menicucci Fr, J.A., Brown, S.A., Kemner, K.M. et Garofalo, D.F., 2001.** Biomass by products for the remediation of waste waters contaminated with toxic metals. *Environ Sci Technol.*, Vol. 35: 37-86.
- Schnoor, J.L., 2000.** Phytostabilization of metals using hybrid poplar trees. In I. Raskin & B. D. Ensley (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean-up the environment*. New York: Wiley, 133-150.
- Schnoor, J.L., Licht, L.A., Mc Cutcheon, S.C., Wolfe, N.L. et Carreira, L.H., 1995.** Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 29: 318-323.

- Schoenmuth, B.W. et Pestemer, W., 2004.** Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT)-Part 1: Literature overview and research concept. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 11: 273-278.
- Schreck, E., Bonnard, R., Laplanche, C., Leveque, T., Foucault, Y. et Dumat, C., 2012.** DECA: a new model for assessing the foliar uptake of atmospheric lead by vegetation, using *Lactuca sativa* as an example. *Journal of Environmental Management*, Vol. 112: 233-239.
- Schroll, R., Bierling, B., Cao, G., Dorfler, U. et Lahaniati, M., 1994.** Uptake pathways of organic chemicals from soil by agricultural plants; *Chemosphere*, Vol. 28: 297-303.
- Schwartz, C., Morel, J.L., Saumier, S., Whiting, S.N. et Baker, A.J.M., 1999.** Root development of the zinc-hyperaccumulator plant *Thlaspi caerulescens* as affected by metal origin, content and localization in soil. *Plant and Soil*, Vol. 208: 103-115.
- Schwitzguébel, J.P., 2002.** Hype or Hope: The potential of phytoremediation as an emerging green technology. *Federal Facilities Environmental Journal*, Vol. 10: 109-125.
- Selim, A.F.H., 2001.** Studies on the effect of lead and some agents for remediation of lead ions on the performance of carrot plant (*Daucus carota* L.). M. Sc. Thesis, Fac. Agric. Menufiya Univ., 121-125.
- Seregin, I.V., Shpigun, L.K. et Ivanov, V.B., 2004.** Distribution and toxic effects of Cadmium and Lead on maize roots. *Russian Journal of Plant Physiology*, Vol. 51 (4): 525-533.
- Seregin, I.V. et Ivanov, V.B., 2001.** Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, Vol. 48: 523-544.
- Seregin, I.V. et Ivanov, V.B., 1997.** Histochemical investigation of cadmium and lead distribution in plants. *Fiziol. Rast.*, Vol. 44: 915-921.
- Sengui, R. et Djennas, A., 2003.** Programme UICN – Cosmétologie au naturel programme UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) d’Afrique du nord, Ministère de l’Agriculture et du Développement Rurale, 6 p.
- Sgherri, C., Quartacci, M.F. et Navari-Izzo, F., 2007.** Early production of activated oxygen species in root apoplast of wheat following copper excess. *Journal of Plant Physiology*, Vol. 164: 1152-1160.
- Shah, K. et Dubey, R.S., 1998.** Effect of cadmium on proline accumulation and ribonuclease activity in rice seedlings: role of proline as a possible enzyme protectant. *Biol. Plant.*, Vol. 40: 121-130.
- Shahandeh, H. et Hossner, L., 2000.** Plant screening for chromium phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, Vol. 2: 31-51.
- Shallari, S., 1997.** Disponibilité du nickel du sol pour l'hyperaccumulateur *Alyssum murale*. Thèse de Doctorat de J'INPL, Vandoeuvre, 105 p.
- Shani, J., Ahronson, Z. et Sulman, F.G., 1972.** Insulin-potentiating effect of salt bush (*Atriplex halimus*) ashes. *Isr J Medsci.*, Vol. 8: 757-758.
- Shanker, A.K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H. et Avudainayagam, S., 2005.** Chromium toxicity in plants, *Environment International*, Vol. 31: 739-753.
- Shanks, J.V. et Morgan, J., 1999.** Plant "hairy root" culture. *Curr. Opin. Biotechnol.*, Vol. 10: 151-155.

- Sharma, N.C., Gardea-Torresdey, J. L., Parsons, J. et Sahi, S. V., 2004.** Chemical speciation and cellular deposition of lead in *Sesbania drummondii*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 23: 2068-2073.
- Sharma, P. et Dubey, R.S., 2005.** Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, Vol. 17 (1): 35-52.
- Sharma, S.S. et Dietz, K.J., 2006.** The significance of amino acids and amino-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. *J. Exp. Bot.*, Vol. 57: 711-726.
- Sharmila, P. et Pardha Saradhi, P., 2002.** Proline accumulation in heavy metal stressed plants: An adaptative strategy. In: *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. Prasad M. N. V. et Strzalka K. (Eds), 179-199.
- Shen, Y.G., Zhang, W.K., Yan, D.Q., Du, B.X., Zhang, J.S., Liu, Q. et Chen, S.Y., 2003.** Characterization of a DRE-binding transcription factor from a halophyte *Atriplex hortensis*. *Theoretical and Applied Genetics*, Vol. 107: 155–161.
- Shevyakova, N.I., Netronina, I.A., Aronova, E.E. et Kuznetsov, V.V., 2003.** Compartmentation of cadmium and iron in *Mesembryanthemum crystallinum* plants during the adaptation to cadmium stress. *Russ J. Plant Physiol.*, Vol. 50: 678-685. doi:http://dx.doi.org/10.1023/A:1025652510658.
- Shields, R. et Burnett, W., 1960.** Determination of protein bound carbohydrate in serum by a just modified anthrone method. *Anal. Chem.*, Vol. 32 : 885-886.
- Silvestre, J., 2008.** Etudes des effets de différents stress abiotiques sur des organismes chlorophylliens. Habilitation à Diriger les Recherches INP Toulouse, 80 p.
- Singh, V.P., Srivastava, P.K. et Prasad, S.M., 2012.** Differential effect of UV-B radiation on growth, oxidative stress and ascorbate-glutathione cycle in two cyanobacteria under copper toxicity. *Plant Physiol. Biochem.*, Vol. 61: 61–70. doi:10.1016/j. plaphy.2012.09.005.
- Singh, A.L., Basu, M.S. et Singh, N.B., 2004.** Mineral Disorders of Groundnut. National Research Center for Groundnut (ICAR), Junagadh, India, 85 p.
- Singh, R.P., Dabas, S., Choudhary, A. et Maheshwari, R., 1997.** Effect of lead on nitrate reductase activity and alleviation of lead toxicity by inorganic salts and 6-benzylaminopurine. *Biol. Plant.*, Vol. 40: 339-404.
- Singleton, V.L. et Ross, J.R., 1965.** Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic – phosphothungstic acid. *Am. J. Enol. Vitic*, Vol. 16 : 144–158.
- Sittig, M., 1975.** Pollution control in the plastics and rubber industry. Park Ridge, NJ: Noyes Data Corp., 305 p.
- Sivarakrishnan, S., Pattel, V., Flower, G. et Peacock, J., 1988.** Proline accumulation and nitrate reductase activity in contrasting sorghum lines during mid season drought stress. *Plant Physiol*, Vol. 74: 418-426.
- Smail Saadoun, N., 2005.** Réponse adaptative de l’anatomie des Chénopodiacées du Sahara algérien à des conditions de vie d’aridité extrême. *Science et changements planétaires. Sécheresse*, Vol. 16 (2): 121-124.
- Smirnoff, N., 2005.** Ascorbate, tocopherol and carotenoids: metabolism, pathway engineering and functions, in *Antioxidants and Reactive Oxygen Species in Plants*, ed Smirnoff N., editor. (Oxford: Blackwell publishing), 53–86.

- Smirnoff, N. et Cumbes, O.J., 1989.** Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. *Phytochem.*, Vol. 28: 1057-1060.
- Soheir, E.S., Khalil, M.Y. et Naguib, N.Y., 2002.** Investigation of the effect of some elements (B, Mo, Co and Pb) on growth, productivity and quality of *Cymbopogon citratus* L. *Ann. Agric. Sci.*, Vol. 47 (3): 911-912.
- Soltner, D., 1999.** Les bases de la production végétale. Tome III – la plante et son alimentation (2nd Ed.), Collection sciences et techniques agricoles, 304 p.
- Song, J., Zhao, F.J., Luo, Y.M., McGrath, S.P. et Zhang, H., 2004.** Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils. *Environ Pollut.*, Vol. 128: 307-315.
- Song, W.Y., Sohn, E.J., Martinoia, E., Lee, Y.J., Yang, M., Jasinski, C., Forestier, I., Hwang, Y. et Lee, J., 2003.** Engineering tolerance and accumulation of lead and cadmium in transgenic plants, in *Nat. Biotechnol.*, Vol. 21 (8): 914-919.
- Souayah, N., Khouja, M.L., Rejeb, M.N. et Bouzid, S., 1998.** Micropropagation d'un arbuste sylvo-pastoral, *Atriplex halimus* L. (*Chénopodiacées*), 131-135.
- Souza, L.A., Andrade, S.A.L., Souza, S.C.R. et Schiavinat, M.A., 2012.** *Arbuscular mycorrhiza* confers Pb tolerance in *Calopogonium mucunoides*. *Acta Physiol Plant.*, Vol. 34: 523-531.
- Sreenivasulu, N., Grimm, B., Wobus, U. et Weschke, W., 2000.** Differential response of antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*). *Physiologia Plantarum*, Vol. 109: 435-442.
- Srivastava, S.K., Singh, A.K. et Sharma, A., 1994.** Studies on the uptake of lead and zinc by lignin obtained from black liquor - a paper industry waste material. *Environ. Technol.*, Vol. 15: 353-361. doi: 10.1080/09593339409385438.
- Stark, J.M. et Redente, E.F., 1990.** Plant uptake and cycling of trace-elements on retorted oil-shale disposal piles. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 19: 495-501.
- Stiborova, M., Doubravova, M. et Brezinova, A.A.F., 1986.** Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Photosynthetica*, Vol. 20: 418-425.
- Stobart, A.K., Griffiths, W.T., Ameen-Bukhari, I. et Sherwood, R.P., 1985.** The effects of Cd²⁺ on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley. *Physiologia Plantarum*, Vol. 63: 293-298.
- Stohs, S.J. et Bagchi, D., 1995.** Oxidative mechanism in the toxicity of metal ions [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, Vol. 18: 321-326.
- Stolt, J.P., Sneller, F.E.C., Bryngelsson, T., Lundborg, T. et Schat, H., 2003.** Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 49: 21-28.
- Stoltz, E. et Greger, M., 2002.** Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings. *Environ. Exp. Bot.*, Vol. 47: 271-280.

- Strand, S.E., Newman, L., Ruszaj, M., Wilmoth, J., Shurtleff, B., Brandt, M., Choe, N., Ekuon, G., Duffy, J., Massman, J.W, Heilman, P.E. et Gordon, M.P., 1995.** Removal of trichloroethylene from aquifers using trees. Proceedings of the National Conference of the Environmental Engineering Division of the American Society of Civil Engineers.
- Sun, B., Kan, S.H., Zhang, Y.Z., Deng, S.H., Wu, J., Yuan, H., Qi, H., Yang, G., Li, L., Zhang, X.H., Xiao, H., Wang, Y.J., Peng, H. et Li, Y.W., 2010.** Certain antioxidant enzymes and lipid peroxidation of radish (*Raphanus sativus* L.) as early warning biomarkers of soil copper exposure. *J Haz Mat.*, Vol. 183: 833-838.
- Sun, B., Zhao, F.J., Lombi, E. et McGrath, S.P., 2001.** Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA. *Environmental pollution*, Vol. 113: 111-120.
- Sun, W.H.H., Lo, J.B., Robert, F.M., Ray, C. et Tang, C.S., 2004.** Phytoremediation of petroleum hydrocarbons in tropical coastal soils-I. Selection of promising woody plants. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 11: 260-266.
- Suresh, B. et Ravishankar, G. A., 2004.** Phytoremediation: A novel and promising approach for environmental clean-up. *Critical Reviews in Biotechnology*, Vol. 24 (2-3): 97-124.
- Suresh Kumar, P., Sagar, V.R. et Singh, U., 2008.** Effect of ripening stages on osmo-dehydrated guava slices. *J Food Sci Technol.*, Vol. 45 (6): 546-548.
- Susarla, S., Medina, V.F. et McCutcheon, S.C., 2002.** Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, Vol. 18: 647-658.
- Swain, T., 1986.** Plant flavonoids in biology and medicine. In: Cody V, Middleton E Jr, Harborne JB. eds. *Progress in clinical and biological research*. New York: Liss, 1-14.
- Szabados, L. et Savouré, A., 2009.** Proline: a multifunctional amino acid. Review. *Trends in Plant Science*, Vol. 15: 89-97.
- Tabaldi, L.A., Nicoloso, F.T., Castro, G.Y., Cargnelutti, D., Gonçalves, J.F., Rauber, R., Skrebsky, E.C., Schetinger, M.R.C., Morsch, V.M. et Bisognin, D.A., 2007.** Physiological and oxidative stress responses of four potato clones to aluminum in nutrient solution. *Braz J Plant Physio.*, Vol. 19 (3): 211-222.
- Tafforeau, M., 2002.** Etude des phases précoces de la transduction des signaux environnementaux chez le lin: une approche protéomique. Thèse de doctorat en biochimie végétale. Université de Rouen. France, 255 p.
- Taiz, L. et Zeiger, E., 2006.** *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 719 p.
- Takahama, U., 2004.** Oxidation of vacuolar and apoplastic phenolic substrate by peroxidase: physiological significance of the oxidation reactions. *Phytochem. Rev.*, Vol. 3: 207-219. doi:10.1023/B: PHYT.0000047805. 08470. e3.
- Talamali, A., Dutuit, P., Le Thomas, A. et Gorenflot, R., 2001.** Polygamie chez *Atriplex halimus* L. *Life sciences*, Vol. 324: 107-113.
- Tamas, L., Dudikova, J., Durcekova, K., Haluskova, L., Huttova, J., Mistrik, I. et Olle, M., 2008.** Alterations of the gene expression, lipid peroxidation, proline and thiol content along the barley root exposed to cadmium. *Journal of Plant Physiology*, Vol. 165: 1193-1203.
- Tatar, E., Mihucz, V.G., Varga, A., Zaray, G. et Fodor, F., 1998.** Determination of Organic Acids in Xylem Sap of Cucumber: Effect of Lead Contamination. " *Microchemical Journal*, Vol. 58 (3): 306-314.

- Tattini, M., Remorini, D., Pinelli, P., Agati, G., Saracini, E., Traversi, M. L. et Massai, R., 2006** Morpho-anatomical, physiological and biochemical adjustments in response to root zone salinity stress and high solar radiation in two Mediterranean evergreen shrubs, *Myrtus communis* and *Pistacia lentiscus*. *New Phytologist*, Vol. 170: 779–794.
- Taulavuori, K., Prasad, M.N.V., Taulavuori, E. et Laine, K., 2005.** Metal stress consequences on frost hardiness of plants at northern high latitudes: A review and hypothesis. *Environ Pollut.*, Vol. 135: 209-220.
- Tausz, M., Sircelj, H. et Grill, D., 2004.** The glutathione system as a stress marker in plant ecophysiology: is a stress-response concept valid? *Journal of Experimental Botany*, Vol. 55: 1955-1962.
- Tazisong, I.A., Senwo, Z.N., Taylor, R.W., Mbila, M.O. et Wang, Y., 2004.** Concentration and distribution of iron and manganese fractions in Alabama ultisols. *Soil Sci.*, Vol. 169: 49-96.
- Tessier, A. et Turner, D., 1995.** Metal speciation and bioavailability in aquatic systems. Chichester, John Wiley and Sons, 696 p.
- Thiebault, Comps, B. et Tessier, D.C., 1990.** Développement des axes des arbres: Pousse annuelle, Syllepsie et probepsie chez le Hêtre (*Fagus sylvatica*) can. *J. Bot.*, Vol. 68: 202-211.
- Thiery, L., Leprince, A.S., Lefebvre, D., Ghars, M.A., Debarbieux, E. et Savouré, A., 2004.** Phospholipase D is a Negative Regulator of Proline Biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*. *J. Biol. Chem.*, Vol. 279 (15): 14812-14818.
- Tiedeman, J.A. et Chouki, S., 1989.** Range management in Central Tunisia. Office of Livestock and Pastures, Ministry of Agriculture, Tunisia and Oregon State University, Corvallis OR (USA).
- Tilstone, G.H. et Macnair, M.R., 1997.** The consequence of selection for copper tolerance on the uptake and accumulation of copper in *Mimulus guttatus*. *Ann Bot.*, Vol. 80: 747-751.
- Timbrell, J.A., 1982.** Principles of biochemical toxicology. Taylor and Francis Ltd, Eds.
- Tollsten, L. et Muller, P., 1996.** Volatile organic compounds emitted from beech leaves. *Phytochem*, Vol. 43: 759-762.
- Tomé, F.V., Rodriguez, P.B. et Lozano, J.C., 2009.** The ability of *Helianthus annuus* L. and *Brassica juncea* to uptake and translocate natural uranium and ²²⁶Ra under different milieu conditions. *Chemosphere*, Vol. 74: 293-300.
- Tomulescu, I., Radoviciu, E., Merca, V. et Tuduce, A., 2004.** Effect of Copper, Zinc and Lead and Their Combinations on the Germination Capacity of Two Cereals. *Journal of agricultural sciences*, Vol. 15: 39-42.
- Tremel-Schaub, A. et Feix I., 2005.** Contamination des sols – Transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences, ADEME, 416 p.
- Treutter, D., 2006.** Significance of flavonoids in plant resistance. Springer-Verlag, *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 4: 147-157.
- Troll, W. et Lindsley J., 1955.** A photometric method for the determination of proline. *J. Biol. Chem.*, Vol. 215 : 655-660.

- Tung, G. et Temple, P.J., 1996.** Histochemical detection of lead in plant tissues. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 15 (6): 906-914.
- Turgut, C., Pepe, K.M. et Cutright, T.J., 2004.** The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. *Environ Pollution*, Vol. 131: 147-154.
- Turner, M.A. et Rust, R.H., 1971.** Effects of Chromium on growth and mineras nutrition of Soybeans. *Soil Science Society of American Proceedings*, Vol. 35: 551-755.
- Ueno, D., Iwashita, T., Zhao, F. et Ma, J.F., 2008.** Characterization of Cd translocation and identification of the Cd form in xylem sap of the Cdhyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant Cell Physiol.*, Vol. 49: 540-548.
- Ungar Irwin, A. et Ajmal Khan, M., 2001.** Effect of Bracteoles on Seed Germination and Dispersal of two Species of *Atriplex*. *Annals of Botany*, Vol. 87: 233-239.
- Urquhart, C., 1971.** Genetics of lead tolerance in *Festuca ovina*. *Heredity*, Vol. 26: 19-33.
- Uzu, G., Sobanska, S., Sarret, G., Muñoz, M. et Dumat, C., 2010.** Foliar Lead Uptake by Lettuce Exposed to Atmospheric Fallouts. *Environmental Science & Technology*, Vol. 44: 1036-1042.
- Vacchina, V., Mari, S., Czernic, P., Marques, L., Pianelli, K., Schaumlöffel, D., Lebru, M. et Lobinski, R., 2003.** Speciation of nickel in a hyperaccumulating plant by high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry and electrospray MS/MS assisted by cloning using yeast complementation. *Anal Chem.*, Vol. 75: 2740-2745.
- Vaithyanathan, S. et Singh, M., 1989.** Seasonal changes in tannin contents of some top feeds in arid region. *Indian J. Anim. Sci.*, Vol. 59: 1565-1567.
- Vajpayee, P., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Ali, M.B. et Singh, S.N., 2000.** Chromium (VI) accumulation reduces chlorophyll biosynthesis, nitrate reductase activity and protein content in *Nymphaea alba* L. *Chemosphere*, Vol. 41: 1075-1082.
- Valko, M., Rhodes, C.J., Moncol, J., Izakovic, M. et Mazur, M., 2006.** Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer. *Chem. Biol Interact.*, Vol. 160: 1-40.
- Van Heerden, J.M., Heydenrych, A.J. et Botha, J.C., 2000.** The influence of spacing on the production of Saltbush in the little Karoo region of the Western Cape. In: Gintzburger G., M. Bounejmate and A. Nefzaoui (Eds.). *Fodder Shrub Development in Arid and Semi-arid Zones. Proceedings of the Workshop on Native and Exotic Fodder Shrubs in Arid and Semi-arid Zones, 27 October-2 November 1996, Hammamet, Tunisia. ICARDA, Aleppo (Syria)*, Vol. 2: 364-365.
- Van Huysen, T., Terry, N. et Pilon-Smits, E.A.H., 2004.** Exploring the selenium phytoremediation potential of transgenic Indian Mustard overexpressing ATP sulfurylase or cystathionine- γ -synthase. *Int J Phytoremediation*, Vol. 6: 1-8.
- Vandecasteele, B., Samyn, J., De Vos, B. et Muys, B., 2008.** Effect of tree species choice and mineral capping in a woodland phytostabilisation system: A case-study for calcareous dredged sediment landfills with an oxidised topsoil. *Ecological Engineering*, Vol. 32: 263-273.
- Vavasseur A. et Richaud P., 2004.** Overexpression of AtHMA4 enhances root-to-shoot translocation of zinc and cadmium and plant metal tolerance. *FEBS Lett.*, Vol. 576: 306-312.

- Vavasseur, A., Peltier, G. et Bourguignon, J., 2003. Biodépollution, Bioremediation. Des plantes pour nettoyer les sols et les eaux. CLEFS CEA., Vol. 48: 85-88.
- Vazquez, M.D., Poschenrieder, C.H. et Barcelo, J., 1987. Chromium VI induced structural and ultrastructural changes in bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Annals of Botany*, Vol. 59: 427-438.
- Verbruggen, N., Villaroel, R. et Van Montagu, M., 1993. Osmoregulation of a pyrroline-5-carboxylate reductase gene in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.*, Vol. 103: 771-781.
- Verma, S. et Dubey, R. S., 2003. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, Vol. 164: 645-655.
- Viatcheslav Dushenkov, V., Nanda-Kumar, P.B.A., Motto, H. et Raskin, I., 1995. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science and Technology*, Vol. 29: 1239-1245.
- Vickerman, D.B., Shannon, M.C., Banuelos, G.S., Grieve, C.M. et Trumble, J.T., 2002. Evaluation of *Atriplex* lines for selenium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. *Environ. Pollut.*, Vol. 120: 463-473.
- Vilax, E.J., 1963. Les cahiers de la recherche agronomique N°17. Ed: INRAT-Rabat, 641 p.
- Vinogradov, A.P., 1959. The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils [2d ed., revised and enlarged]: New York, Consultants Bureau Enterprises, 209 p.
- Vodnik, D., Jentschke, G., Fritz, E., Gogala, N. et Godbold, D.L., 1999. Root-applied cytokinin reduces lead uptake and affects its distribution in Norway spruce seedlings. *Physiol Plantarum*, Vol. 106: 75-81. doi:10.1034/j.1399-3054.1999.106111.x.
- Vogel-Mikus, K., Drobne, D. et Regvar, M., 2005. Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf. (*Brassicaceae*) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia. *Environmental Pollution*, Vol. 133: 233-242.
- Voorhees, M.E., Uresk, D.W. et Trlica, M.J., 1991. Substrate relations for rillscale (*Atriplex suckleyi*) on bentonite mine soil. *J. Range Manage*, Watson, M.C., Banuelos, G.S., and Riley, J. J. Trace element, 1994, Vol. 44: 34-38.
- Voorhees, M.E., 1990. Forage quality of rillscale (*Atriplex suckleyi*) grown on amended bentonite mine spoil. *Great Basin Naturalist*, Vol. 50: 57-62.
- Wainwright, S.J., 1980. Plants in relation to salinity. *Adv Bo Res.*, Vol. 8: 221-222.
- Waisel, Y. et Pollaek, G., 1972. Salt sécrétion in *A-Litoralis* (*Gramineae*). *Physiol Plantarum*, Vol. 47: 177-184.
- Walker D.J. et Lutts S., 2014. The tolerance of *Atriplex halimus* L. to environmental stresses. *Emir. J. food. Agric.*, Vol. 26 (12): 1081-1090.
- Walker, D.J., Moñino, I., González, E., Frayssinet, N. et Correal, E., 2005. Determination of ploidy and nuclear DNA content in populations of *Atriplex halimus* (*Chenopodiaceae*). *Bot. J. Linn. Soc.*, Vol. 147: 441-448. doi:10.1111/j.1095-8339.2004.00379.x.
- Wang, D.J. et Evangelou, V.P., 1994. Metal tolerance aspects of plant cell walls and vacuoles. In: Pessaraki M (Ed) *Handbook of Plant and Crop Physiology*. Marcel Dekker, Inc, New York, 695-717.
- Wang, L.W. et Showalter, A.M., 2004. Cloning and salt-induced, ABA independent expression of choline mono-oxygenase in *Atriplex prostrata*. *Physiologia Plantarum*, Vol. 120: 405-412.

- Wang, W.X., Barak, T., Vinocur, B., Shoseyov, O. et Altman, A., 2003.** Abiotic resistance and chaperones: possible physiological role of SP1, a stable and stabilizing protein from *Populus*. In: Vasil IK (ed) Plant biotechnology 2000 and beyond. Kluwer, Dordrecht, 439–443.
- Wang, W.X., Vinocur, B., Shoseyov, O. et Altman, A., 2001.** Biotechnology of plant osmotic stress tolerance and physiological and molecular considerations. *Acta Hort.*, Vol. 560: 285–292. doi:10.17660/ActaHortic.2001.560.54.
- Wang, X., He, X., Williams, J.R., Izaurralde, R.C. et Atwood, J.D., 2005.** Sensitivity and uncertainty analysis of crop yields and soil organic carbon simulated with EPIC, *American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48 (3): 1041–1054.
- Wang, Y. et Greger, M., 2004.** Clonal differences in mercury tolerance, accumulation, and distribution in willow. *J Environ Qual*, Vol. 33 (5): 1779-1785.
- Wang, Z., Wang, J.W., Yu, N., Li, C.H., Luo, B., Gou, J.Y., Wang, L.J. et Chen, X.Y., 2006.** Cytoplasmic male sterility of rice with boro II cytoplasm is caused by a cytotoxic peptide and is restored by two related PPR motif genes via distinct modes of mRNA silencing. *Plant Cell.*, Vol. 18: 676–687.
- Watanabe, M.E., 1997.** Phytoremediation on the brink of commercialisation *Environmental science and Technology*, Vol. 31 (4): 182. -186.
- Webb, S.M., Gaillard, J.F., Ma, L.Q. et Tu, C., 2003.** XAS speciation of arsenic in a hyperaccumulating fern. *Environ Sci Technol.*, Vol. 37: 754-760.
- Weber, M., Harada, E., Vess, C., Roepenack-Lahaye, E. et Clemens, S., 2004.** Comparative microarray analysis of *Arabidopsis thaliana* and *Arabidopsis halleri* roots identifies nicotianamine synthase, a ZIP transporter and other genes as potential metal hyperaccumulation factors. *Plant Journal*, Vol. 37: 269-281.
- Wendy, A.P., Ivan, R., Baxter, Elizabeth L., Richards, John, L., Freeman, Angus, S. et Murphy, A., 2005.** Phytoremediation and hyperaccumulator plants. Peer, Wendy Ann Center for Phytoremediation, Purdue University, and West Lafayette, IN 47907 USA, 1 p.
- Wenzel, W.W., Bunkowski, M., Puschenreiter, M. et Horak, O., 2003.** Rhizosphere characteristics of indigenously growing nickel hyperaccumulator and excluder plants on serpentine soil. *Environmental Pollution*, Vol. 123: 131-138.
- Wenzel, W.W., Adriano, D.C., Salt, D. et Smith, R., 1999.** Bioremediation: A plant-microbe based remediation system. In *bioremediation of contaminated soils*. Agronomy Monograph. N°37.
- White, R.H., Weise, D.R. et Frommer, S., 1996.** Preliminary evaluation of the flammability of native and ornamental plants with the cone calorimeter. Papers presented at the twenty-first international conference on fire safety clarion hotel San Francisco international airport Millbrae, California USA January 8., Vol. 12: 256-265.
- Whiting, S.N., Reeves, R.D., Richards, D., Johnson, M.S., Cooke, J.A., Malaisse, F., Paton, A., Smith, J.A.C., Angle, J.S., Chaney, R.L., Ginocchio, R., Jaffré, T., Johns, R., McIntyre, T., Purvis, O.W., Salt, D.E., Schat, H., Zhao, F.J. et Baker, J.M., 2004.** Research priorities for conservation of metallophyte biodiversity and their potential for restoration and site remediation. *Restoration ecology*, Vol. 12 (1): 106-116.
- Whu, L.H., Luo, Y.M., Xing, X.R. et Christie, P., 2004.** EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk. *Agriculture Ecosystems & Environment*, Vol. 102: 307-318.

- Wierzbicka, M., 1998.** Lead in the apoplast of *Allium cepa* L. root tips--ultrastructural studies. *Plant Science*, Vol. 133: 105-119.
- Wierzbicka, M. et Obidzinska, J., 1998.** The effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species. *Plant Science*, Vol. 137 (2): 155-171.
- Wierzbicka, M., 1989.** Disturbances in cytokinesis caused by inorganic lead. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 29 (2): 123-133.
- Wilkins, D.A., 1978.** The measurement of tolerance to edaphic factors by mean of root growth. *New Phytol.*, Vol. 80: 623-633.
- Williams, T.P., Bubb, J.B. et Lester, J.N., 1994.** The occurrence and distribution of trace metals in halophytes. *Chemosphere*, Vol. 28: 1189-99.
- Wills, B.J., Begg, T.S.C. et Brosnan, M., 1990.** Forage shrubs for the south Island dry hill country: 1. *Atriplex halimus* L. (Mediterranean Saltbushes). *Proceedings of the New Zealand grass land association*. Eds. New Zealand, Vol. 52: 161-165.
- Wingler, A., 2002.** The function of trehalose biosynthesis in plants; *photochemistry*, Vol. 60: 437-440.
- Wittbrodt, P.R. et Palmer C.D., 1995.** Reduction of Cr(VI) in the presence of excess soil fulvic acid. *Environmental Science and Technology*, Vol. 29: 255-263.
- Wojcik, M. et Tukiendorf, A., 2004.** Phytochelatin synthesis and cadmium localization in wild type of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Growth Regulation*, Vol. 44: 71-80.
- Wolfe, N.L., Ou, T.Y. et Carreira, L., 1993.** Biochemical remediation of TNT contaminated soils; Rep. US Army Corps Eng. Glutathione conjugation and contaminant transformation; *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 30: 1413-18.
- Wolter, R., 1996.** Alimentation du cheval. 2^{ème} édition. Edition France Agricole, Paris, 320 p.
- Wong, M. H., 2003.** Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, Vol. 50: 775-780.
- Wozny, A. et Jerczynska, E., 1991.** The effect of Lead on early stages of *Phaseolus vulgaris* L. growth in vitro conditions. *Biologia Plantarum*, Vol. 33: 32-39.
- Wu, L., Zhou, H., Zhang, Q., Zhang, J., Ni, F. et Liu, C., 2010.** DNA methylation mediated by a microRNAs pathway. *Mol. Cell.*, Vol. 38: 465-475. doi:10.1016/j.molcel.2010.03.008.
- Xing, D.H., Lai, Z.B., Zheng, Z.Y., Vinod, K.M., Fan, B.F. et Chen, Z.X., 2008.** Stress-and pathogen-induced *Arabidopsis* WRKY48 is a transcriptional activator that represses plant basal defense. *Mol Plant*, Vol. 1: 459-470.
- Xiong, T.C., Ronzier, E., Sanchez, F., Corratgé-Faillie, C., Mazars, C. et Thibaud, J.B., 2014.** Imaging long distance propagating calcium signals in intact plant leaves with the BRET-based GFP-aequorin reporter. *Front Plant Sci.*, Vol. 5: 43-45.
- Xiong, L., Wang, R., Mao, G. et Koczan, J., 2006.** Identification of drought tolerance determinants by genetic analysis of root response to drought stress and abscisic acid. *Plant Physiol.*, Vol. 142: 1065-1074.
- Xiong, Z.T., 1997.** Bioaccumulation and physiological effects of excess lead in a roadside pioneer species *Sonchus oleraceus* L. *Environmental Pollution*, Vol. 97: 275-279.
- Yaakoub, F., 2006.** Thèse de magister évaluation in vitro de la dégradation des principaux fourrages des zones arides, université el hadj lakhdar batna option nutrition, 95 p.

- Yadav, V., Kumar, M., Deep, D.K., Kumar, H., Sharma, R., Tripathi, T., Tuteja, N., Saxena, A.K. et Johri, A.K., 2010.** A phosphate transporter from the root endophytic fungus *Piriformospora indica* plays a role in phosphate transport to the host plant. *J Biol Chem.*, Vol. 285: 26532–26544. doi: 10.1074/jbc.M110.111021.
- Yamasaki, H., Sakihama, Y. et Ikehara, N., 1997.** Flavonoidperoxidase reaction as a detoxification mechanism of plant cells against H₂O₂. *Plant Physiol.*, Vol. 115: 1405–1412.
- Yang, X.E., Feng, Y., He, Z.L. et Stoffella, P.J., 2005.** Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, Vol. 18: 339-353.
- Yaniv, Z., Dafni, A., Friedman, J. et Palevitch, D., 1987.** Plants used for the treatment of diabetes in Paletine. *J. ethnopharmacol.*, Vol. 19 (2): 145-151.
- Yeo, A.R., 1983.** Salinity Resistance: physiologies and prices. *Physiologia plantarum*, Vol. 58: 214-222.
- Yong Zhao, X.L., Zheng, T.C., Xia, X.C., He, Z.H., Liu, D.Q. et Yang, W.X., 2008.** Molecular mapping of leaf rust resistance gene *LrZH84* in Chinese wheat line Zhou 8425B. *Theor. Appl. Genet.*, Vol. 117: 1069–1075. doi:10.1007/s00122-008-0845-9.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q. et Ma, L.Q., 2006.** Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Floride site. *Science of the total environmental*, Vol. 368: 456-464.
- Yruela, I., 2005.** Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, Vol. 17: 147-156. doi:10.1590/S1677-04202005000100012.
- Yruela, I., Pueyo, J.J., Alonso, P.J. et Picorel, R., 1996.** Photoinhibition of photosystem II from higher plants: effect of copper inhibition. *J Biol Chem.*, Vol. 271: 27408-27415.
- Yu, X.Z. et Gu, J.D., 2006.** Uptake, metabolism, and toxicity of methyl tert-butyl ether (MTBE) in weeping willows. *Journal of Hazardous Materials in Press*.
- Yu, X.Z. et Cheng, J.M., 2003.** Effect of earthworm on bioavailability of Cu and Cd in soils (in Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, Vol. 23: 922–928.
- Zarnovican, R., 1983.** Production stationnelle dans les sapinières en Gaspésie, Québec. *Rapp. D'inf. Lav-x-64- C.R.F.L.*, 47 p.
- Zayed, A.M. et Terry, N., 2003.** Chromium in the environment: factors affecting biological remediation, *Plant and Soil*, Vol. 249: 139-156.
- Zayed, A., Lytle, C.M., Qian, J.H. et Terry, N., 1998.** Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. *Planta*, Vol. 206: 293-299.
- Zengin, F.K. et Kirbag, S., 2007.** Effects of copper on chlorophyll, proline, protein and abscisic acid level of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seedlings. *Journal of Environmental Biology*, Vol. 28 (3): 561-566.
- Zengin, F.K. et Munzuroglu, O., 2005.** Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. *Acta biologica cracoviensia Series Botanica*, Vol. 47 (2): 157–164.
- Zerrad, W., Hillali, S., Mataoui, B., El Antri, S. et Hmyene, A., 2006.** Étude comparative des mécanismes biochimiques de résistance au stress hydrique de deux variétés de blé dur. *Lebanese Science Journal*, Vol. 9 (2): 541-546.

- Zhang, X.H., Liu, J., Huang, H.T., Chen, J., Zhu, Y.N. et Wang, D.Q., 2007.** Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* Swartz. *Chemosphere*, Vol. 67: 1138-1143.
- Zhang, W.H., Cai, Y., Tu, C. et Ma, L.Q., 2002.** Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *The Science of Total Environment*, Vol. 300: 167-177.
- Zhao, F.J., Jiang, R.F., Dunham, S.J. et McGrath, S.P., 2006.** Cadmium uptake, translocation and tolerance in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *New Phytologist*, Vol. 172: 646-654.
- Zhao, F.J., Lombi, E., Brendon, T. et McGrath, S.P., 2000.** Zinc hyperaccumulation and cellular distribution in *Arabidopsis halleri*. *Plant Cell Environ*, Vol. 23: 507-514.
- Zheljzkov, V.D., Craker, L.E. et Xing, B., 2006.** Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 58 (1-3): 9-16.
- Zhishen, J., Mengcheng, T. et Jianming, W., 1999.** The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chem.*, Vol. 64 (4) : 555-559.
- Zhou, W. et Qiu, B., 2005.** Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of *Sedum alfredii* Hance (*Crassulaceae*). *Plant Science*, Vol. 169: 737-745.
- Zhu, D. et Scandalios, J.G., 1994.** Differential accumulation of manganese-superoxide dismutase transcripts in maize in response to abscisic acid and high osmoticum. *Plant Physiol*, Vol. 106: 173-178.
- Zhu, Y.Z., Pilon-Smits, E.A.H., Tarun, A.S., Weber, S.U., Jouanin, L. et Terry, N., 1999.** Cadmium tolerance and accumulation in Indian mustard is enhanced by overexpressing g-glutamylcysteine synthetase. *Plant Physiology*, Vol. 121: 1169-1177.
- Zid, E. et Boukheris, M., 1977.** Quelques aspects de tolérance de l'*Atriplex halimus* L. en chlorure de sodium, multiplication, composition minéraux. *Oecol. Plant.*, Vol. 12: 351-352.
- Zimdahl, R.L. et Hassett, J.J., 1977.** Lead in soil. In: Lead in environ-ment. (eds), Boggess WR and Wixson BG, National Science Foundation, Washington, D.C. USA. NSF/RA-770214, 93-98.
- Zoofouri, M.S., 1993.** Confruinfes du milieu et réponses de quelques espèces exotiques introduites en Tunisie présuhorienne. Thèse de doctorot, Sciences, Université Aix-Marseille, 111-200.
- Zou, T., Li, T., Zhang, X., Yu, H. et Luo, H., 2010.** Lead accumulation and tolerance characteristics of *Athyrium wardii* (Hook.) as a potential phytostabilizer. *Jounal of Hazardous Material*, Vol. 186: 683-689.
- Zu, Y.Q., Li, Y., Chen, J.J., Chen, H.Y., Qin, L. et Schvartz, C., 2005.** Hyperaccumulation of Pb, Zn, and Cd in hervaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China. *Environment International*, Vol. 31: 755-762.
- Zvereva, E.L. et Kozlov, M.V., 2007.** Facilitation of bilberry by mountain birch in habitat severely disturbed by pollution: Importance of sheltering. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 60: 170-176.

Annexe 01. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de germination des graines d'*Atriplex halimus*, mises en culture».

Tableau 01. Analyse de variance pour le paramètre «Taux de germination des graines d'*Atriplex halimus*, mises en culture ».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	73,438	15	4,896		
Variance facteur "Provenance"	23,188	3	7,729	1,846	0,19194
Variance résiduelle	50,25	12	4,188		

Annexe 02. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de levée des graines d'*Atriplex halimus*, mises en culture».

Tableau 02. Analyse de variance pour le paramètre «Taux de levée des graines d'*Atriplex halimus*, mises en culture ».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	1041,75	15	69,45		
Variance facteur "Provenance"	190,25	3	63,417	0,894	0,4743
Variance résiduelle	851,5	12	70,958		

Annexe 03. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus*, mises en culture».

Tableau 03. Analyse de variance pour le paramètre « Taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus*, mises en culture ».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	500	224	2,232		
Variance facteur "Provenance"	1,6	4	0,4	0,177	0,94787
Variance résiduelle	498,4	220	2,265		

Annexe 04. Traitement statistique des résultats du paramètre « Croissance des plantes d'*Atriplex halimus*, mises en culture».

Tableau 04. Analyse de variance pour le paramètre « Croissance des plantes d'*Atriplex halimus*, mises en culture ».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	371306,3	1399	265,408		
Variance facteur "Provenance"	478,063	3	159,354	9,173	0,00001
Variance facteur "durée"	342326,9	6	57054,48	3284,331	0
Variance "Provenance-durée"	4667,313	18	259,295	14,926	0
Variance résiduelle	23834	1372	17,372		

Tableau 05. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre « Croissance des plantes d'*Atriplex halimus*, mises en culture», exprimée en longueur des tiges (en cm), selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Sig	16,534	A	
2.0	Béni Saf	16,422	A	
4.0	Oued'Rhiou	15,793	A	
1.0	Kharouba	15,068		B

Tableau 06. Comparaison des moyennes de l'interaction "Provenance-Durée" pour le paramètre «Croissance des plantes d'*Atriplex halimus*, mises en culture », exprimée en longueur des tiges (en cm), selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes																
1.0	7.0	Kharouba JUIN	50,036	A																
2.0	7.0	Béni Saf JUIN	48,638	A																
3.0	7.0	Sig JUIN	48,08	A																
4.0	7.0	Oued'Rhiou JUIN	40,708		B															
2.0	6.0	Béni Saf MAI	30,572			C														
3.0	6.0	Sig MAI	30,536			C														
4.0	6.0	Oued'Rhiou MAI	29,098			C														
1.0	6.0	Kharouba MAI	26,304				D													
4.0	5.0	Oued'Rhiou AVR	20,006					E												
3.0	5.0	Sig AVR	19,44					E												
2.0	5.0	Béni Saf AVR	18,528					E												
1.0	5.0	Kharouba AVR	13,566						F											
4.0	4.0	Oued'Rhiou MAR	12,702						F											
3.0	4.0	Sig MAR	9,65																G	
2.0	4.0	Béni Saf MAR	9,286																G	
1.0	4.0	Kharouba MAR	7,99																G	
4.0	3.0	Oued'Rhiou FEV	5,372																	H
2.0	3.0	Béni Saf FEV	5,078																	H
3.0	3.0	Sig FEV	5,052																	H
1.0	3.0	Kharouba FEV	4,654																	H
3.0	2.0	Sig JAN	2,366																	I
1.0	2.0	Kharouba JAN	2,212																	I
2.0	2.0	Béni Saf JAN	2,194																	I
4.0	2.0	Oued'Rhiou JAN	1,948																	I
1.0	1.0	Kharouba DEC	0,716																	I
4.0	1.0	Oued'Rhiou DEC	0,716																	I
2.0	1.0	Béni Saf DEC	0,656																	I
3.0	1.0	Sig DEC	0,616																	I

Annexe 05. Croissance des plantes d'*Atriplex halimus*, après sept mois, exprimée en longueur moyenne des tiges (en cm).

Tableau 07. Croissance des plantes d'*Atriplex halimus*, après sept mois, exprimée en longueur moyenne des tiges (en cm) \pm Ecart-Type. Les lettres représentent les Groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Longueurs des tiges (en cm)	Provenance	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
	S1 (Décembre)	0,716 ^I \pm 0,13	0,656 ^I \pm 0,13	0,616 ^I \pm 0,05	0,716 ^I \pm 0,12
	S5 (Janvier)	2,212 ^I \pm 0,85	2,194 ^I \pm 0,31	2,366 ^I \pm 0,32	1,948 ^I \pm 0,36
	S9 (Février)	4,654 ^H \pm 1,00	5,078 ^H \pm 0,50	5,052 ^H \pm 0,46	5,372 ^H \pm 0,56
	S13(Mars)	7,99 ^G \pm 1,53	9,286 ^G \pm 0,76	9,65 ^G \pm 0,86	12,702 ^F \pm 1,85
	S17 (Avril)	13,566 ^F \pm 1,88	18,528 ^E \pm 1,61	19,44 ^E \pm 1,55	20,006 ^E \pm 1,48
	S21 (Mai)	26,304 ^D \pm 3,79	30,572 ^C \pm 3,14	30,536 ^C \pm 2,05	29,098 ^C \pm 2,03
	S25 (Juin)	50,036 ^A \pm 5,15	48,638 ^A \pm 5,57	48,08 ^A \pm 2,63	40,708 ^B \pm 3,98

Annexe 06. Traitement statistique des résultats du paramètre «Taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 08. Analyse de variance pour le paramètre «Taux de survie des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	95,76	39	2,455		
Variance facteur "Provenance"	1,066	4	0,267	1,806	0,19212
Variance facteur "Métal"	16,427	1	16,427	111,27	0,54458
Variance facteur "Concentration"	68,542	3	22,847	154,75	0,5489
Variance "Provenance-Métal"	0,542	4	0,136	0,918	0,48608
Variance "Provenance-Concentration"	1,758	12	0,146	0,992	0,50525
Variance "Métal-Concentration"	5,654	3	1,885	12,765	0,00054
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	1,772	12	0,148		
Variance résiduelle	95,76	39	2,455		

Annexe 07. Traitement statistique des résultats du paramètre «Longueur des racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 09. Analyse de variance pour le paramètre «Longueur des racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	1154,869	239	4,832		
Variance facteur "Provenance"	91,832	3	30,611	8,421	0,00004
Variance facteur "Métal"	76,826	2	38,413	10,568	0,00007
Variance facteur "Concentration"	73,881	3	24,627	6,775	0,00028
Variance "Provenance-Métal"	13,596	6	2,266	0,623	0,71348
Variance "Provenance-Concentration"	61,483	9	6,831	1,879	0,05681
Variance "Métal-Concentration"	62,158	6	10,36	2,85	0,01118
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	77,185	18	4,288	1,18	0,28091
Variance résiduelle	697,908	192	3,635		

Tableau 10. Comparaison des moyennes de l'interaction "Métal-Concentration" pour le paramètre «Longueur des racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2 F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0 4.0	Cr(VI) d3	13,725	A			
3.0 3.0	Cr(VI) d2	12,76	A	B		
3.0 2.0	Cr(VI) d1	12,345	A	B	C	
1.0 4.0	Pb d3	12,3	A	B	C	
2.0 2.0	Cr(III) d1	12,205	A	B	C	
2.0 3.0	Cr(III) d2	11,835		B	C	D
2.0 4.0	Cr(III) d3	11,69		B	C	D
3.0 1.0	Cr(VI) d0	11,02		B	C	D
2.0 1.0	Cr(III) d0	11,02		B	C	D
1.0 1.0	Pb d0	11,02		B	C	D
1.0 3.0	Pb d2	10,75			C	D
1.0 2.0	Pb d1	10,25				D

Annexe 08. Traitement statistique des résultats du paramètre «Longueur des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 11. Analyse de variance pour le paramètre «Longueur des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	22923,27	239	95,913		
Variance facteur "Provenance"	4191,832	3	1397,277	22,074	0
Variance facteur "Métal"	1700,646	2	850,323	13,434	0,00001
Variance facteur "Concentration"	1111,361	3	370,454	5,852	0,00086
Variance "Provenance-Métal"	596,666	6	99,444	1,571	0,15654
Variance "Provenance-Concentration"	806,082	9	89,565	1,415	0,18322
Variance "Métal-Concentration"	943,656	6	157,276	2,485	0,0244
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	1419,719	18	78,873	1,246	0,22806
Variance résiduelle	12153,31	192	63,298		

Tableau 12. Comparaison des moyennes de l'interaction "Métal-Concentration" pour le paramètre «Longueur des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2 F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0 4.0	Cr(VI)	66,97	A			
3.0 2.0	Cr(VI)	64,965	A	B		
3.0 3.0	Cr(VI)	64,295	A	B	C	
2.0 2.0	Cr(III)	59,81		B	C	D
2.0 3.0	Cr(III)	59,13		B	C	D
1.0 3.0	Pb d2	58,615		B	C	D
1.0 4.0	Pb d3	57,815		B	C	D
1.0 2.0	Pb d1	57,215			C	D
3.0 1.0	Cr(VI)	55,485				D
2.0 1.0	Cr(III)	55,485				D
1.0 1.0	Pb d0	55,485				D
2.0 4.0	Cr(III)	54,7				D

Annexe 09. Traitement statistique des résultats du paramètre «Croissance des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 13. Analyse de variance pour le paramètre «Croissance des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	2535,267	239	10,608		
Variance facteur "Provenance"	145,318	3	48,439	5,429	0,00146
Variance facteur "Métal"	259,063	2	129,531	14,517	0
Variance facteur "Concentration"	205,078	3	68,359	7,661	0,0001
Variance "Provenance-Métal"	34,742	6	5,79	0,649	0,69299
Variance "Provenance-Concentration"	48,978	9	5,442	0,61	0,78893
Variance "Métal-Concentration"	102,805	6	17,134	1,92	0,07873
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	26,122	18	1,451	0,163	0,99
Variance résiduelle	1713,162	192	8,923		

Tableau 14. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Croissance des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
2.0	Béni Saf	13,548	A	
4.0	Oued'Rhiou	12,697	A	B
1.0	Kharouba	11,723		B
3.0	Sig	11,653		B

Tableau 15. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Croissance des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes		
3.0	Cr(VI)	13,624	A		
2.0	Cr(III)	12,508		B	
1.0	Pb	11,085			C

Tableau 16. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Croissance des tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	d0	13,82	A	
2.0	d1	12,473		B
3.0	d2	12,06		B
4.0	d3	11,268		B

Annexe 10. Influence des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur l'élongation des tiges chez l'*Atriplex halimus*, en fonction du temps.

Tableau 17. Influence des métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur l'élongation des tiges chez l'*Atriplex halimus*, en fonction du temps ± Ecart-Type. Les lettres représentent les Groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	14,16 ^A ± 1,34	14,3 ^A ± 1,66	12,44 ^A ± 4,16	14,38 ^A ± 1,58
Pb	1000	10,34 ^B ± 1,46	12,02 ^B ± 2,62	10,9 ^B ± 1,72	11,42 ^B ± 2,84
	4000	7,8 ^B ± 1,84	11,58 ^B ± 1,57	10,62 ^B ± 2,23	11,24 ^B ± 0,68
	8000	7,58 ^B ± 2,79	10,98 ^B ± 1,11	8,46 ^B ± 1,39	9,14 ^B ± 0,36
Cr(III)	250	11,46 ^B ± 3,05	14,26 ^B ± 5,09	11,84 ^B ± 1,91	12,34 ^B ± 0,52
	500	11,22 ^B ± 2,72	14,18 ^B ± 3,38	11,7 ^B ± 1,33	12,26 ^B ± 2,78
	750	8,96 ^B ± 4,24	13,72 ^B ± 2,36	11,56 ^B ± 2,01	11,34 ^B ± 3,98
Cr(VI)	50	14,06 ^B ± 3,06	14,32 ^B ± 3,55	12,78 ^B ± 4,89	13,94 ^B ± 1,87
	100	13,46 ^B ± 4,74	14,36 ^B ± 2,47	12,5 ^B ± 2,80	13,8 ^B ± 1,14
	150	13,32 ^B ± 9,20	14,26 ^B ± 3,97	12,16 ^B ± 2,98	13,74 ^B ± 2,39

Annexe 11. Traitement statistique des résultats du paramètre Nombre des feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI)).

Tableau 18. Analyse de variance pour le paramètre «Nombre des feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	2894592	239	12111,26		
Variance facteur "Provenance"	70219,25	3	23406,42	1,839	0,13968
Variance facteur "Métal"	87269,5	2	43634,75	3,429	0,03361
Variance facteur "Concentration"	32992,75	3	10997,58	0,864	0,463
Variance "Provenance-Métal"	37366,75	6	6227,792	0,489	0,81728
Variance "Provenance-Concentration"	59998,25	9	6666,472	0,524	0,85693
Variance "Métal-Concentration"	44069,5	6	7344,917	0,577	0,75025
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	119117,5	18	6617,639	0,52	0,94651
Variance résiduelle	2443558	192	12726,87		

Tableau 19. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Nombre des feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Cr(VI)	400,038	A	
2.0	Cr(III)	370,6	A	B
1.0	Pb	353,913		B

Annexe 12. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en matière sèche (MS) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 20. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en matière sèche (MS) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	2894592	239	12111,26		
Variance facteur "Provenance"	70219,25	3	23406,42	1,839	0,13968
Variance facteur "Métal"	87269,5	2	43634,75	3,429	0,03361
Variance facteur «Concentration»	32992,75	3	10997,58	0,864	0,463
Variance "Provenance-Métal"	37366,75	6	6227,792	0,489	0,81728
Variance "Provenance-Concentration"	59998,25	9	6666,472	0,524	0,85693
Variance "Métal-Concentration"	44069,5	6	7344,917	0,577	0,75025
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	119117,5	18	6617,639	0,52	0,94651
Variance résiduelle	2443558	192	12726,87		

Tableau 21. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en matière sèche (MS) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Cr(VI)	400,038	A	
2.0	Cr(III)	370,6	A	B
1.0	Pb	353,913		B

Annexe 13. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière sèche (MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 22. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière sèche (MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	8137,487	239	34,048		
Variance facteur "Provenance"	153,009	3	51,003	2,991	0,03173
Variance facteur "Métal"	343,223	2	171,612	10,065	0,0001
Variance facteur «Concentration»	663,86	3	221,287	12,979	0
Variance "Provenance-Métal"	530,942	6	88,49	5,19	0,00007
Variance "Provenance-Concentration"	1310,31	9	145,59	8,539	0
Variance "Métal-Concentration"	570,294	6	95,049	5,575	0,00003
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	1292,215	18	71,79	4,21	0
Variance résiduelle	3273,635	192	17,05		

Tableau 23. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en matière sèche (MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Cr(VI)	40,572	A	
1.0	Pb	38,227		B
2.0	Cr(III)	37,88		B

Tableau 24. Comparaison des moyennes de l'interaction "Provenance-Métal" pour le paramètre «Teneur en matière sèche (MS) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1 F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0 3.0	Sig CrVI	44,981	A	
1.0 3.0	Kharouba CrVI	40,579		B
2.0 1.0	Béni saf Pb	39,371		B
4.0 3.0	Oued Rhiou CrVI	39,042		B
4.0 1.0	Oued Rhiou Pb	38,841		B
3.0 2.0	Sig CrIII	38,452		B
2.0 2.0	Béni saf CrIII	38,13		B
1.0 2.0	Kharouba CrIII	37,731		B
2.0 3.0	Béni saf CrVI	37,688		B
3.0 1.0	Sig Pb	37,381		B
1.0 1.0	Kharouba Pb	37,313		B
4.0 2.0	Oued Rhiou CrIII	37,207		B

Annexe 14. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière sèche (MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 25. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière sèche (MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	2580,27	239	10,796		
Variance facteur "Provenance"	31,774	3	10,591	0,96	0,41425
Variance facteur "Métal"	15,417	2	7,708	0,699	0,50307
Variance facteur «Concentration»	88,96	3	29,653	2,688	0,04693
Variance "Provenance-Métal"	15,79	6	2,632	0,239	0,96199
Variance "Provenance-Concentration"	174,734	9	19,415	1,76	0,07784
Variance "Métal-Concentration"	63,614	6	10,602	0,961	0,45372
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	71,654	18	3,981	0,361	0,99
Variance résiduelle	2118,327	192	11,033		

Tableau 26. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en matière sèche (MS) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F3	Libelles	Moyennes	Groupes
4.0	d3	20,43	A
1.0	d0	19,727	A
3.0	d2	19,046	A
2.0	d1	18,898	A

Annexe 15. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 27. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	5388,124	239	22,544		
Variance facteur "Provenance"	28,865	3	9,622	0,86	0,46503
Variance facteur "Métal"	16,005	2	8,002	0,716	0,49464
Variance facteur «Concentration»	341,167	3	113,722	10,168	0,00001
Variance "Provenance-Métal"	334,125	6	55,688	4,979	0,00011
Variance "Provenance-Concentration"	705,601	9	78,4	7,01	0
Variance "Métal-Concentration"	205,345	6	34,224	3,06	0,0071
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	1609,689	18	89,427	7,996	0
Variance résiduelle	2147,327	192	11,184		

Annexe 16. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 28. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	4808,908	239	20,121		
Variance facteur "Provenance"	92,491	3	30,83	7,095	0,00019
Variance facteur "Métal"	251,397	2	125,698	28,928	0
Variance facteur «Concentration»	581,668	3	193,889	44,621	0
Variance "Provenance-Métal"	20,755	6	3,459	0,796	0,57571
Variance "Provenance-Concentration"	397,565	9	44,174	10,166	0
Variance "Métal-Concentration"	1086,322	6	181,054	41,667	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	1544,418	18	85,801	19,746	0
Variance résiduelle	834,292	192	4,345		

Tableau 29. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en matière minérale (MM) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Kharouba	19,131	A	
2.0	Béni Saf	18,011		B
3.0	Sig	17,761		B
4.0	Oued'Rhiou	17,504		B

Tableau 30. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en matière minérale (MM) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Pb	19,535	A	
3.0	Cr(VI)	17,562		B
2.0	Cr(III)	17,209		B

Tableau 31. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en matière minérale (MM) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	19,899	A			
3.0	d2	18,964		B		
2.0	d1	17,818			C	
1.0	d0	15,727				D

Tableau 32. Comparaison des moyennes de l'interaction "Provenance-Concentration" pour le paramètre «Teneur en matière minérale (MM) dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1 F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes							
1.0 3.0	Kharouba d2	22,129	A							
2.0 4.0	Béni Saf d3	20,84	A	B						
4.0 4.0	Oued'Rhiou d3	20,404	A	B	C					
3.0 4.0	Sig d3	19,421		B	C	D				
1.0 4.0	Kharouba d3	18,931		B	C	D				
3.0 2.0	Sig d1	18,871		B	C	D				
4.0 3.0	Oued'Rhiou d2	18,711		B	C	D				
1.0 1.0	Kharouba d0	18,393			C	D	E			
4.0 2.0	Oued'Rhiou d1	17,765				D	E			
2.0 2.0	Béni Saf d1	17,563				D	E			
3.0 3.0	Sig d2	17,554				D	E			
2.0 3.0	Béni Saf d2	17,461				D	E			
1.0 2.0	Kharouba d1	17,072				D	E			
2.0 1.0	Béni Saf d0	16,18					E	F		
3.0 1.0	Sig d0	15,197						F		
4.0 1.0	Oued'Rhiou d0	13,137								G

Annexe 17. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 33. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière minérale (MM) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	3882,739	239	16,246		
Variance facteur "Provenance"	159,59	3	53,197	5,079	0,00225
Variance facteur "Métal"	74,549	2	37,275	3,559	0,02968
Variance facteur «Concentration»	1200,471	3	400,157	38,203	0
Variance "Provenance-Métal"	109,26	6	18,21	1,739	0,11313
Variance "Provenance-Concentration"	79,717	9	8,857	0,846	0,57605
Variance "Métal-Concentration"	133,275	6	22,212	2,121	0,05229
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	114,799	18	6,378	0,609	0,89043
Variance résiduelle	2011,078	192	10,474		

Tableau 34. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en matière minérale (MM) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Kharouba	20,214	A	
4.0	Oued'Rhiou	19,408	A	
2.0	Béni Saf	18,978	A	B
3.0	Sig	17,954		B

Tableau 35. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en matière minérale (MM) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Kharouba	20,214	A	
4.0	Oued'Rhiou	19,408	A	
2.0	Béni Saf	18,978	A	B
3.0	Sig	17,954		B

Tableau 36. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en matière minérale (MM) dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	21,984	A			
3.0	d2	20,296		B		
2.0	d1	18,268			C	
1.0	d0	16,005				D

Annexe 18. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière organique dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 37. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière organique dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	6291,518	239	26,324		
Variance facteur "Provenance"	133,443	3	44,481	3,956	0,00923
Variance facteur "Métal"	66,069	2	33,035	2,938	0,05394
Variance facteur «Concentration»	163,396	3	54,465	4,843	0,00301
Variance "Provenance-Métal"	118,234	6	19,706	1,752	0,11009
Variance "Provenance-Concentration"	2582,577	9	286,953	25,518	0
Variance "Métal-Concentration"	86,778	6	14,463	1,286	0,26466
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	981,921	18	54,551	4,851	0
Variance résiduelle	2159,099	192	11,245		

Tableau 38. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en matière organique (MM) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
4.0	Oued'Rhiou	59,067	A	
2.0	Béni Saf	58,922	A	
1.0	Kharouba	58,443	A	
3.0	Sig	57,174		B

Tableau 39. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en matière organique (MM) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	d0	59,138	A	
2.0	d1	58,915	A	
3.0	d2	58,531	A	
4.0	d3	57,023		B

Tableau 40. Comparaison des moyennes de l'interaction "Provenance-Métal-Concentration" pour le paramètre «Teneur en matière organique (MM) dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F1	F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes																
4.0	1.0	Oued'Rhi	65,348	A																
1.0	2.0	Kharouba	62,749		B															
3.0	3.0	Sig d2	62,334		B	C														
2.0	1.0	Béni Saf	61,805		B	C	D													
2.0	3.0	Béni Saf	60,796		B	C	D	E												
4.0	2.0	Oued'Rhi	59,296				C	D	E	F										
3.0	2.0	Sig d1	59,062				C	D	E	F										
2.0	4.0	Béni Saf	58,537					D	E	F	G									
1.0	1.0	Kharouba	57,816						E	F	G									
1.0	4.0	Kharouba	57,363						E	F	G									
4.0	4.0	Oued'Rhi	56,474							F	G									
1.0	3.0	Kharouba	55,844							F	G									
3.0	4.0	Sig d3	55,716							F	G									
4.0	3.0	Oued'Rhi	55,151									G								
2.0	2.0	Béni Saf	54,552																	
3.0	1.0	Sig d0	51,582																	
4.0	1.0	Oued'Rhi	65,348																	
1.0	2.0	Kharouba	62,749																	
3.0	3.0	Sig d2	62,334																	
2.0	1.0	Béni Saf	61,805																	
2.0	3.0	Béni Saf	60,796																	
4.0	2.0	Oued'Rhi	59,296																	
3.0	2.0	Sig d1	59,062																	
2.0	4.0	Béni Saf	58,537																	
1.0	1.0	Kharouba	57,816																	H
1.0	4.0	Kharouba	57,363																	H
4.0	4.0	Oued'Rhi	56,474																	H
1.0	3.0	Kharouba	55,844																	H
3.0	4.0	Sig d3	55,716																	H
4.0	3.0	Oued'Rhi	55,151																	H
2.0	2.0	Béni Saf	54,552																	H
3.0	1.0	Sig d0	51,582																	I

Annexe 19. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière organique dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 41. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière organique dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	4848,864	239	20,288		
Variance facteur "Provenance"	47,505	3	15,835	0,789	0,50415
Variance facteur "Métal"	50,257	2	25,128	1,252	0,28774
Variance facteur "Concentration"	25,704	3	8,568	0,427	0,73757
Variance "Provenance-Métal"	111,595	6	18,599	0,927	0,47759
Variance "Provenance-Concentration"	75,66	9	8,407	0,419	0,92386
Variance "Métal-Concentration"	125,089	6	20,848	1,039	0,40155
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	560,991	18	31,166	1,553	0,07567
Variance résiduelle	3852,065	192	20,063		

Annexe 20. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en matière organique dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 42. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en matière organique dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	3882,731	239	16,246		
Variance facteur "Provenance"	159,59	3	53,197	5,079	0,00225
Variance facteur "Métal"	74,548	2	37,274	3,559	0,02968
Variance facteur "Concentration"	1200,463	3	400,154	38,203	0
Variance "Provenance-Métal"	109,262	6	18,21	1,739	0,11312
Variance "Provenance-Concentration"	79,718	9	8,858	0,846	0,57604
Variance "Métal-Concentration"	133,276	6	22,213	2,121	0,05229
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	114,798	18	6,378	0,609	0,89043
Variance résiduelle	2011,077	192	10,474		

Tableau 43. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en matière organique dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Sig	82,046	A	
2.0	Béni Saf	81,022	A	B
4.0	Oued'Rhiou	80,592		B
1.0	Kharouba	79,786		B

Tableau 44. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en matière organique dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Cr(VI)	81,393	A	
1.0	Pb	81,1	A	B
2.0	Cr(III)	80,092		B

Tableau 45. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en matière organique dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
1.0	d0	83,995	A			
2.0	d1	81,731		B		
3.0	d2	79,704			C	
4.0	d3	78,016				D

Annexe 21. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en eau relative d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 46. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en eau relative d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	994,771	239	4,162		
Variance facteur "Provenance"	4,212	3	1,404	0,329	0,80727
Variance facteur "Métal"	0,654	2	0,327	0,077	0,92582
Variance facteur "Concentration"	2,331	3	0,777	0,182	0,90846
Variance "Provenance-Métal"	30,46	6	5,077	1,188	0,31389
Variance "Provenance-Concentration"	31,271	9	3,475	0,813	0,6058
Variance "Métal-Concentration"	30,067	6	5,011	1,173	0,32218
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	75,34	18	4,186	0,98	0,48515
Variance résiduelle	820,435	192	4,273		

Annexe 22. Teneurs moyennes en eau relative chez l'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressés au Plomb, Cr(III) et Cr(VI) \pm Ecart Type.

Tableau 47. Teneurs moyennes en eau relative chez l'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressés au Plomb, Cr(III) et Cr(VI).

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	81,698 \pm 1,811	80,441 \pm 0,648	81,341 \pm 0,977	80,562 \pm 0,580
Pb	1000	81,148 \pm 1,657	80,326 \pm 0,751	80,895 \pm 0,781	80,104 \pm 0,622
	4000	76,881 \pm 2,389	76,421 \pm 1,970	77,130 \pm 1,202	78,075 \pm 0,873
	8000	74,625 \pm 0,913	75,197 \pm 1,295	74,922 \pm 0,523	75,120 \pm 0,549
Cr III	250	80,344 \pm 1,186	80,469 \pm 1,280	80,194 \pm 0,637	81,022 \pm 1,123
	500	80,437 \pm 0,776	80,309 \pm 0,647	80,221 \pm 0,762	80,134 \pm 0,646
	750	79,882 \pm 1,443	78,926 \pm 0,869	79,028 \pm 0,864	78,340 \pm 1,222
Cr VI	50	80,497 \pm 1,133	80,583 \pm 0,797	80,793 \pm 0,548	79,980 \pm 0,872
	100	79,775 \pm 1,018	80,138 \pm 0,732	80,025 \pm 0,327	80,120 \pm 0,705
	150	79,570 \pm 0,532	79,400 \pm 0,461	79,005 \pm 0,728	79,054 \pm 0,695

Annexe 23. Quelques caractéristiques physico-chimiques des substrats (Sol) étudiés.

Tableau 48. Caractéristiques physico-chimiques des substrats (Sol).

Paramètres	Résultats
Texture	loam-argileux
Argile (%)	25,71
Limon fin (%)	3,99
Limon grossier (%)	31,26
Sable fin (%)	22,48
Sable grossier (%)	16,57
Calcaire total (%)	9,33
Carbone organique (%)	5,12
Matière organique (%)	2,59
Azote total (%)	0,09
pH-eau	7,73
Capacité d'échange cationique CEC (cmol/kg ⁻¹)	4
conductivité électrique élevée EC (ms/cm)	0,344
Cl (meq/l) Chlorure	14,925
CO ₃ ⁻² (meq/l) Carbonate	0
HCO ₃ ⁻¹ (meq/l) Bicarbonate	3
SO ₄ ⁻² (meq/l) Sulfate	29,78
Cuivre (ppm)	1,149
Plomb (ppm)	3,36
Chrome (ppm)	1,09

Annexe 24. Traitement statistique des résultats du paramètre « pH des substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 49. Analyse de variance pour le paramètre « pH des substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	31,697	239	0,133		
Variance facteur "Provenance"	0,25	3	0,083	15,006	0
Variance facteur "Métal"	0,331	2	0,166	29,814	0
Variance facteur "Concentration"	29,071	3	9,69	1743,314	0
Variance "Provenance-Métal"	0,059	6	0,01	1,758	0,10889
Variance "Provenance-Concentration"	0,096	9	0,011	1,922	0,05072
Variance "Métal-Concentration"	0,653	6	0,109	19,577	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	0,169	18	0,009	1,694	0,04303
Variance résiduelle	1,067	192	0,006		

Tableau 50. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «le pH des substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
2.0	Béni Saf	7,214	A		
1.0	Kharouba	7,193	A		
4.0	Oued'Rhiou	7,162		B	
3.0	Sig	7,129			C

Tableau 51. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «le pH des substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
2.0	Cr(III)	7,214	A		
3.0	Cr(VI)	7,185		B	
1.0	Pb	7,125			C

Tableau 52. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «le pH des substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
1.0	d0	7,591	A			
2.0	d1	7,382		B		
3.0	d2	7,054			C	
4.0	d3	6,671				D

Annexe 25. Mesures de pH dans le substrat après application des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les plantes d'*Atriplex halimus*.

Tableau 53. Mesures de pH dans le substrat après application des métaux (Pb, Cr(III) et Cr(VI)) sur les plantes d'*Atriplex halimus* ± Ecart-Type. Les lettres représentent les Groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	7,630 ^A ±0,053	7,602 ^A ±0,016	7,570 ^A ±0,026	7,562 ^A ±0,015
Pb	1000	7,260 ^D ±0,045	7,310 ^D ±0,035	7,190 ^D ±0,025	7,280 ^D ±0,041
	4000	6,926 ^G ±0,125	7,122 ^G ±0,067	6,872 ^G ±0,054	6,944 ^G ±0,102
	8000	6,660 ^H ±0,067	6,746 ^H ±0,082	6,642 ^H ±0,083	6,678 ^H ±0,077
Cr III	250	7,412 ^C ±0,078	7,454 ^C ±0,110	7,394 ^C ±0,046	7,370 ^C ±0,062
	500	7,182 ^E ±0,045	7,154 ^E ±0,053	7,158 ^E ±0,078	7,208 ^E ±0,100
	750	6,764 ^H ±0,067	6,768 ^H ±0,119	6,586 ^H ±0,117	6,608 ^H ±0,083
Cr VI	50	7,514 ^B ±0,062	7,478 ^B ±0,070	7,468 ^B ±0,078	7,454 ^B ±0,059
	100	7,034 ^F ±0,129	7,052 ^F ±0,144	6,908 ^F ±0,110	7,082 ^F ±0,088
	150	6,674 ^H ±0,096	6,678 ^H ±0,077	6,614 ^H ±0,074	6,636 ^H ±0,106

Annexe 26. Traitement statistique des résultats du paramètre « Quantités de Pb dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

Tableau 54. Analyse de variance pour le paramètre « Quantités de Pb dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	190728500	79	2414285		
Variance facteur "Provenance"	658208	3	219402,7	4,503	0,00639
Variance facteur "Concentration"	186268000	3	62089330	1274,274	0
Variance "Provenance-Concentration"	683920	9	75991,11	1,56	0,14629
Variance résiduelle	3118416	64	48725,25		

Tableau 55. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Quantités de Pb dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de NEWMAN- KEULS à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
2.0	Béni Saf	1636,251	A	
1.0	Kharouba	1583,014	A	
4.0	Oued'Rhiou	1469,925	A	B
3.0	Sig	1406,08		B

Tableau 56. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Quantités de Pb dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de NEWMAN- KEULS à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	3983,238	A			
3.0	d2	1559,52		B		
2.0	d1	550,629			C	
1.0	d0	1,884				D

Annexe 27. Traitement statistique des résultats du paramètre « Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

Tableau 57. Analyse de variance pour le paramètre « Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	2979135	79	37710,56		
Variance facteur "Provenance"	2253	3	751	0,518	0,6756
Variance facteur "Concentration"	2833956	3	944651,8	651,109	0
Variance "Provenance-Concentration"	50072,5	9	5563,611	3,835	0,00067
Variance résiduelle	92853,5	64	1450,836		

Tableau 58. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)», selon le test de NEWMAN- KEULS à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	502,307	A			
3.0	d2	358,863		B		
2.0	d1	183,215			C	
1.0	d0	0,536				D

Annexe 28. Traitement statistique des résultats du paramètre « Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

Tableau 59. Analyse de variance pour le paramètre « Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	70805,48	79	896,272		
Variance facteur "Provenance"	818,719	3	272,906	3,902	0,01267
Variance facteur "Concentration"	61835,3	3	20611,77	294,733	0
Variance "Provenance-Concentration"	3675,703	9	408,412	5,84	0,00001
Variance résiduelle	4475,75	64	69,934		

Tableau 60. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
4.0	Oued'Rhiou	44,6	A	
3.0	Sig	42,535	A	B
1.0	Kharouba	37,362		B
2.0	Béni Saf	37,313		B

Tableau 61. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Quantités de Cr dans les substrats (Sol) des plantes d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	75,916	A			
3.0	d2	53,423		B		
2.0	d1	31,935			C	
1.0	d0	0,536				D

Annexe 29. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Pb dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

Tableau 62. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Pb dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	820917,9	79	10391,37		
Variance facteur "Provenance"	15857,25	3	5285,75	11,554	0
Variance facteur "Concentration"	760569,9	3	253523,3	554,167	0
Variance "Provenance-Concentration"	15211,69	9	1690,188	3,695	0,00093
Variance résiduelle	29279,06	64	457,485		

Tableau 63. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Pb dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	245,825	A			
3.0	d2	160,659		B		
2.0	d1	39,623			C	
1.0	d0	0,134				D

Tableau 64. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en Pb dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
3.0	Sig	127,859	A		
4.0	Oued'Rhiou	118,222	A	B	
1.0	Kharouba	110,55		B	
2.0	Béni Saf	89,61			C

Annexe 30. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Pb dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

Tableau 65. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Pb dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	78,086	79	0,988		
Variance facteur "Provenance"	5,607	3	1,869	32,307	0
Variance facteur "Concentration"	54,239	3	18,08	312,505	0
Variance "Provenance-Concentration"	14,536	9	1,615	27,918	0
Variance résiduelle	3,703	64	0,058		

Tableau 66. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en Pb dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Kharouba	1,419	A	
3.0	Sig	1,373	A	
4.0	Oued'Rhiou	1,263	A	
2.0	Béni Saf	0,755		B

Tableau 67. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Pb dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
4.0	d3	1,975	A		
3.0	d2	1,957	A		
2.0	d1	0,875		B	
1.0	d0	0,003			C

Annexe 31. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Pb dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

Tableau 68. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Pb dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	29011,9	79	367,239		
Variance facteur "Provenance"	274,426	3	91,475	5,363	0,00246
Variance facteur "Concentration"	25984,77	3	8661,589	507,776	0
Variance "Provenance-Concentration"	1661,002	9	184,556	10,819	0
Variance résiduelle	1091,705	64	17,058		

Tableau 69. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en Pb dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Sig	20,763	A	
1.0	Kharouba	19,701	A	
4.0	Oued'Rhiou	19,026	A	
2.0	Béni Saf	15,799		B

Tableau 70. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Pb dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Plomb», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	48,041	A			
3.0	d2	17,961		B		
2.0	d1	9,263			C	
1.0	d0	0,024				D

Annexe 32. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

Tableau 71. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	38,601	79	0,489		
Variance facteur "Provenance"	0,168	3	0,056	1,165	0,33031
Variance facteur "Concentration"	35,225	3	11,742	244,727	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,138	9	0,015	0,32	0,96495
Variance résiduelle	3,071	64	0,048		

Tableau 72. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	1,787	A			
3.0	d2	1,192		B		
2.0	d1	0,608			C	
1.0	d0	0,003				D

Annexe 33. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

Tableau 73. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	0,218	79	0,003		
Variance facteur "Provenance"	0,007	3	0,002	3,625	0,01747
Variance facteur "Concentration"	0,153	3	0,051	83,582	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,019	9	0,002	3,533	0,00136
Variance résiduelle	0,039	64	0,001		

Tableau 74. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Sig	0,079	A	
1.0	Kharouba	0,073	A	B
4.0	Oued'Rhiou	0,069	A	B
2.0	Béni Saf	0,054		B

Tableau 75. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)», selon le test de **NEWMAN-KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,116	A			
3.0	d2	0,096		B		
2.0	d1	0,063			C	
1.0	d0	0				D

Annexe 34. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

Tableau 76. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	3,749	79	0,047		
Variance facteur "Provenance"	0,24	3	0,08	16,622	0
Variance facteur "Concentration"	2,888	3	0,963	200,07	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,313	9	0,035	7,219	0
Variance résiduelle	0,308	64	0,005		

Tableau 77. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Kharouba	0,322	A	
4.0	Oued'Rhiou	0,318	A	
3.0	Sig	0,273	A	
2.0	Béni Saf	0,186		B

Tableau 78. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(III)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,486	A			
3.0	d2	0,413		B		
2.0	d1	0,198			C	
1.0	d0	0,001				D

Annexe 35. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

Tableau 79. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	4,53	79	0,057		
Variance facteur "Provenance"	0,054	3	0,018	4,664	0,00533
Variance facteur "Concentration"	3,568	3	1,189	309,297	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,663	9	0,074	19,146	0
Variance résiduelle	0,246	64	0,004		

Tableau 80. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
4.0	Oued'Rhiou	0,338	A	
3.0	Sig	0,32	A	
1.0	Kharouba	0,299	A	B
2.0	Béni Saf	0,269		B

Tableau 81. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,581	A			
3.0	d2	0,393		B		
2.0	d1	0,248			C	
1.0	d0	0,003				D

Annexe 36. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

Tableau 82. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	0,008	79	0		
Variance facteur "Provenance"	0	3	0	1,233	0,30464
Variance facteur "Concentration"	0,005	3	0,002	40,399	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,001	9	0	1,649	0,11994
Variance résiduelle	0,002	64	0		

Tableau 83. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,02	A			
3.0	d2	0,015		B		
2.0	d1	0,007			C	
1.0	d0	0				D

Annexe 37. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

Tableau 84. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	0,499	79	0,006		
Variance facteur "Provenance"	0,015	3	0,005	4,327	0,0078
Variance facteur "Concentration"	0,352	3	0,117	101,026	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,058	9	0,006	5,586	0,00001
Variance résiduelle	0,074	64	0,001		

Tableau 85. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
4.0	Oued'Rhiou	0,117	A	
3.0	Sig	0,101	A	B
1.0	Kharouba	0,084		B
2.0	Béni Saf	0,083		B

Tableau 86. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en Cr dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées au Cr(VI)», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,173	A			
3.0	d2	0,141		B		
2.0	d1	0,071			C	
1.0	d0	0,001				D

Annexe 38. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en chlorophylle totale d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 87. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en chlorophylle totale d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	54,347	239	0,227		
Variance facteur "Provenance"	1,817	3	0,606	82,861	0
Variance facteur "Métal"	13,012	2	6,506	890,127	0
Variance facteur "Concentration"	8,805	3	2,935	401,54	0
Variance "Provenance-Métal"	1,057	6	0,176	24,112	0
Variance "Provenance-Concentration"	6,084	9	0,676	92,482	0
Variance "Métal-Concentration"	7,904	6	1,317	180,218	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	14,265	18	0,792	108,423	0
Variance résiduelle	1,403	192	0,007		

Tableau 88. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en chlorophylle totale d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Kharouba	2,766	A	
3.0	Sig	2,742	A	
2.0	Béni Saf	2,587		B
4.0	Oued'Rhiou	2,575		B

Tableau 89. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en chlorophylle totale d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))», selon le test de **NEWMAN- KEULS** à 5%.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
3.0	Cr(VI)	2,896	A		
2.0	Cr(III)	2,759		B	
1.0	Pb	2,348			C

Annexe 39. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 90. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	380,121	239	1,59		
Variance facteur "Provenance"	5,611	3	1,87	5,256	0,0018
Variance facteur "Métal"	2,748	2	1,374	3,861	0,02229
Variance facteur "Concentration"	214,296	3	71,432	200,747	0
Variance "Provenance-Métal"	9,537	6	1,59	4,467	0,00033
Variance "Provenance-Concentration"	9,464	9	1,052	2,955	0,00269
Variance "Métal-Concentration"	55,192	6	9,199	25,851	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	14,953	18	0,831	2,335	0,00245
Variance résiduelle	68,32	192	0,356		

Tableau 91. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
2.0	Cr(III)	11,273	A	
1.0	Pb	11,056		B
3.0	Cr(VI)	11,037		B

Tableau 92. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en sucres solubles dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
4.0	d3	12,69	A		
3.0	d2	10,826		B	
2.0	d1	10,816		B	
1.0	d0	10,156			C

Annexe 40. Teneurs moyennes en sucres solubles chez les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI).

Tableau 93. Teneurs moyennes en sucres solubles chez les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les Groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Sucres Solubles			
		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	9,839 ^{FG} ±0,914	10,038 ^{FG} ±0,060	10,347 ^{FG} ±0,070	10,402 ^{FG} ±0,105
Pb	1000	9,815 ^G ±0,156	9,619 ^G ±0,089	9,890 ^G ±0,165	9,780 ^G ±0,158
	4000	11,034 ^E ±1,598	9,609 ^E ±0,833	11,693 ^E ±0,064	12,089 ^E ±0,070
	8000	12,591 ^A ±0,895	12,989 ^A ±0,220	13,541 ^A ±0,091	13,614 ^A ±0,356
Cr III	250	11,546 ^D ±0,483	11,727 ^D ±0,082	11,868 ^D ±0,171	11,882 ^D ±0,112
	500	11,131 ^E ±0,160	10,889 ^E ±0,085	11,255 ^E ±0,175	10,888 ^E ±1,422
	750	11,849 ^C ±1,290	12,740 ^C ±0,209	12,646 ^C ±1,224	11,316 ^C ±1,324
Cr VI	50	11,147 ^E ±0,106	11,097 ^E ±0,086	11,235 ^E ±0,055	10,181 ^E ±1,341
	100	10,802 ^F ±0,061	10,052 ^F ±0,468	10,587 ^F ±0,159	9,880 ^F ±0,846
	150	12,779 ^B ±0,159	12,671 ^B ±0,106	12,522 ^B ±0,078	13,016 ^B ±0,191

Annexe 41. Traitement statistique des résultats du paramètre « Teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 94. Analyse de variance pour le paramètre « Teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	304,625	239	1,275		
Variance facteur "Provenance"	0,179	3	0,06	0,296	0,8302
Variance facteur "Métal"	46,754	2	23,377	116,238	0
Variance facteur "Concentration"	123,061	3	41,02	203,967	0
Variance "Provenance-Métal"	3,595	6	0,599	2,979	0,00846
Variance "Provenance-Concentration"	6,289	9	0,699	3,475	0,00058
Variance "Métal-Concentration"	77,454	6	12,909	64,188	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	8,681	18	0,482	2,398	0,00181
Variance résiduelle	38,614	192	0,201		

Tableau 95. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
1.0	Pb	4,625	A		
3.0	Cr(VI)	4,409		B	
2.0	Cr(III)	3,599			C

Tableau 96. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en sucres solubles dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
4.0	d3	5,238	A		
3.0	d2	4,237		B	
2.0	d1	4,155		B	
1.0	d0	3,215			C

Annexe 42. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 97. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	5,7	239	0,024		
Variance facteur "Provenance"	0,071	3	0,024	40,268	0
Variance facteur "Métal"	0,891	2	0,446	758,064	0
Variance facteur "Concentration"	2,132	3	0,711	1208,79	0
Variance "Provenance-Métal"	0,281	6	0,047	79,584	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,565	9	0,063	106,708	0
Variance "Métal-Concentration"	0,873	6	0,146	247,576	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	0,774	18	0,043	73,095	0
Variance résiduelle	0,113	192	0,001		

Tableau 98. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
3.0	Sig	0,719	A		
1.0	Kharouba	0,714	A		
4.0	Oued'Rhiou	0,701		B	
2.0	Béni Saf	0,675			C

Tableau 99. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
1.0	Pb	0,774	A		
2.0	Cr(III)	0,708		B	
3.0	Cr(VI)	0,625			C

Tableau 100. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en proline dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,82	A			
3.0	d2	0,742		B		
2.0	d1	0,684			C	
1.0	d0	0,562				D

Annexe 43. Teneurs moyennes en proline chez les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI).

Tableau 101. Teneurs moyennes en proline chez les feuilles d'*Atriplex halimus* L. cultivées dans les substrats stressées au Pb, Cr(III) et Cr(VI) ± Ecart-Type. Les lettres représentent les Groupes homogènes déterminés d'après l'ANOVA.

Traitement		Provenance			
Métal	[] (ppm)	Kharouba	Béni Saf	Sig	Oued'Rhiou
T	0	0,645 ^E ±0,013	0,545 ^E ±0,031	0,529 ^E ±0,009	0,531 ^E ±0,014
Pb	1000	0,592 ^D ±0,017	0,871 ^D ±0,027	0,758 ^D ±0,012	0,750 ^D ±0,007
	4000	0,984 ^A ±0,013	0,742 ^A ±0,050	0,998 ^A ±0,018	0,891 ^A ±0,015
	8000	0,734 ^B ±0,043	0,943 ^B ±0,032	0,902 ^B ±0,008	0,972 ^B ±0,011
Cr III	250	0,717 ^D ±0,025	0,785 ^D ±0,016	0,759 ^D ±0,011	0,718 ^D ±0,014
	500	0,889 ^D ±0,031	0,698 ^D ±0,017	0,888 ^D ±0,012	0,570 ^D ±0,011
	750	0,829 ^D ±0,031	0,795 ^D ±0,046	0,613 ^D ±0,028	0,812 ^D ±0,015
Cr VI	50	0,548 ^E ±0,035	0,498 ^E ±0,014	0,678 ^E ±0,017	0,534 ^E ±0,009
	100	0,534 ^E ±0,008	0,519 ^E ±0,031	0,537 ^E ±0,011	0,659 ^E ±0,044
	150	0,810 ^C ±0,064	0,616 ^C ±0,019	0,913 ^C ±0,012	0,907 ^C ±0,017

Annexe 44. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 102. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	1,395	239	0,006		
Variance facteur "Provenance"	0,064	3	0,021	26,596	0
Variance facteur "Métal"	0,264	2	0,132	164,407	0
Variance facteur "Concentration"	0,39	3	0,13	161,597	0
Variance "Provenance-Métal"	0,046	6	0,008	9,588	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,131	9	0,015	18,092	0
Variance "Métal-Concentration"	0,176	6	0,029	36,473	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	0,17	18	0,009	11,717	0
Variance résiduelle	0,154	192	0,001		

Tableau 103. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
4.0	Oued'Rhiou	0,602	A		
3.0	Sig	0,595	A	B	
1.0	Kharouba	0,587		B	
2.0	Béni Saf	0,559			C

Tableau 104. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
1.0	Pb	0,632	A		
3.0	Cr(VI)	0,572		B	
2.0	Cr(III)	0,554			C

Tableau 105. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en proline dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,637	A			
3.0	d2	0,611		B		
2.0	d1	0,561			C	
1.0	d0	0,535				D

Annexe 45. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 106. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	0,673	239	0,003		
Variance facteur "Provenance"	0,015	3	0,005	15,928	0
Variance facteur "Métal"	0,144	2	0,072	233,987	0
Variance facteur "Concentration"	0,241	3	0,08	260,542	0
Variance "Provenance-Métal"	0,011	6	0,002	6,029	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,076	9	0,008	27,283	0
Variance "Métal-Concentration"	0,065	6	0,011	35,258	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	0,062	18	0,003	11,167	0
Variance résiduelle	0,059	192	0		

Tableau 107. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
3.0	Sig	0,413	A		
4.0	Oued'Rhiou	0,408	A		
1.0	Kharouba	0,402		B	
2.0	Béni Saf	0,392			C

Tableau 108. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
1.0	Pb	0,437	A		
3.0	Cr(VI)	0,393		B	
2.0	Cr(III)	0,38			C

Tableau 109. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en proline dans les racines d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	0,45	A			
3.0	d2	0,405		B		
2.0	d1	0,398			C	
1.0	d0	0,361				D

Annexe 46. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 110. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	475,628	239	1,99		
Variance facteur "Provenance"	10,576	3	3,525	141,225	0
Variance facteur "Métal"	106,711	2	53,356	2137,494	0
Variance facteur "Concentration"	105,3	3	35,1	1406,148	0
Variance "Provenance-Métal"	15,339	6	2,557	102,42	0
Variance "Provenance-Concentration"	47,367	9	5,263	210,845	0
Variance "Métal-Concentration"	87,473	6	14,579	584,046	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	98,069	18	5,448	218,264	0
Variance résiduelle	4,793	192	0,025		

Tableau 111. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0	Sig	10,876	A			
4.0	Oued'Rhiou	10,584		B		
1.0	Kharouba	10,398			C	
2.0	Béni Saf	10,336				D

Tableau 112. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
1.0	Pb	11,119	A			
3.0	Cr(VI)	10,914		B		
2.0	Cr(III)	9,613			C	

Tableau 113. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0	d2	11,32	A			
4.0	d3	11,083		B		
2.0	d1	10,001			C	
1.0	d0	9,791				D

Annexe 47. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en phénols totaux dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 114. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	534,642	239	2,237		
Variance facteur "Provenance"	3,978	3	1,326	109,865	0
Variance facteur "Métal"	74,303	2	37,151	3078,318	0
Variance facteur "Concentration"	250,854	3	83,618	6928,468	0
Variance "Provenance-Métal"	10,595	6	1,766	146,311	0
Variance "Provenance-Concentration"	29,024	9	3,225	267,21	0
Variance "Métal-Concentration"	92,55	6	15,425	1278,097	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	71,021	18	3,946	326,927	0
Variance résiduelle	2,317	192	0,012		

Tableau 115. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0	Sig	3,916	A			
4.0	Oued'Rhiou	3,863		B		
1.0	Kharouba	3,797			C	
2.0	Béni Saf	3,578				D

Tableau 116. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
1.0	Pb	4,556	A			
2.0	Cr(III)	3,554		B		
3.0	Cr(VI)	3,256			C	

Tableau 117. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en phénols totaux dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	5,013	A			
3.0	d2	4,51		B		
2.0	d1	3,184			C	
1.0	d0	2,448				D

Annexe 48. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 118. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	199,103	239	0,833		
Variance facteur "Provenance"	1,317	3	0,439	19,953	0
Variance facteur "Métal"	50,49	2	25,245	1147,728	0
Variance facteur "Concentration"	64,613	3	21,538	979,174	0
Variance "Provenance-Métal"	3,785	6	0,631	28,677	0
Variance "Provenance-Concentration"	6,272	9	0,697	31,682	0
Variance "Métal-Concentration"	55,924	6	9,321	423,751	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	12,48	18	0,693	31,52	0
Variance résiduelle	4,223	192	0,022		

Tableau 119. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Sig	5,019	A	
4.0	Oued'Rhiou	4,969	A	
1.0	Kharouba	4,968	A	
2.0	Béni Saf	4,821		B

Tableau 120. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Pb	5,593	A	
2.0	Cr(III)	4,623		B
3.0	Cr(VI)	4,617		B

Tableau 121. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
4.0	d3	5,816	A		
3.0	d2	4,781		B	
2.0	d1	4,732		B	
1.0	d0	4,448			C

Annexe 49. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 122. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	7,606	239	0,032		
Variance facteur "Provenance"	0,155	3	0,052	6,407	0
Variance facteur "Métal"	1,631	2	0,815	100,84	0
Variance facteur "Concentration"	0,424	3	0,141	17,484	0
Variance "Provenance-Métal"	0,313	6	0,052	6,455	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,972	9	0,108	13,364	0
Variance "Métal-Concentration"	0,875	6	0,146	18,044	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	1,683	18	0,093	11,564	0
Variance résiduelle	1,552	192	0,008		

Tableau 123. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	Sig	0,921	A	
2.0	Béni Saf	0,897	A	B
4.0	Oued'Rhiou	0,864		B
1.0	Kharouba	0,858		B

Tableau 124. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
1.0	Pb	1,001	A	
3.0	Cr(VI)	0,827		B
2.0	Cr(III)	0,826		B

Tableau 125. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en flavonoïdes dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
4.0	d3	0,931	A		
2.0	d1	0,902	A	B	
3.0	d2	0,889		B	
1.0	d0	0,817			C

Annexe 50. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 126. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	137,092	239	0,574		
Variance facteur "Provenance"	6,988	3	2,329	249,453	0
Variance facteur "Métal"	35,05	2	17,525	1876,754	0
Variance facteur "Concentration"	30,508	3	10,169	1089,035	0
Variance "Provenance-Métal"	0,142	6	0,024	2,539	0,02176
Variance "Provenance-Concentration"	8,416	9	0,935	100,136	0
Variance "Métal-Concentration"	26,539	6	4,423	473,672	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	27,655	18	1,536	164,531	0
Variance résiduelle	1,793	192	0,009		

Tableau 127. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0	Sig	9,688	A			
4.0	Oued'Rhiou	9,61		B		
1.0	Kharouba	9,515			C	
2.0	Béni Saf	9,236				D

Tableau 128. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
1.0	Pb	9,987	A			
3.0	Cr(VI)	9,499		B		
2.0	Cr(III)	9,051				C

Tableau 129. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en tanins dans les feuilles d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
4.0	d3	10,064	A			
3.0	d2	9,578		B		
2.0	d1	9,269			C	
1.0	d0	9,137				D

Annexe 51. Traitement statistique des résultats du paramètre «Teneur en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

Tableau 130. Analyse de variance pour le paramètre «Teneur en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Probabilité
Variance totale	3,561	239	0,015		
Variance facteur "Provenance"	0,287	3	0,096	127,049	0
Variance facteur "Métal"	0,402	2	0,201	266,646	0
Variance facteur "Concentration"	0,746	3	0,249	329,892	0
Variance "Provenance-Métal"	0,106	6	0,018	23,408	0
Variance "Provenance-Concentration"	0,303	9	0,034	44,635	0
Variance "Métal-Concentration"	0,374	6	0,062	82,644	0
Variance "Provenance-Métal-Concentration"	1,197	18	0,066	88,175	0
Variance résiduelle	0,145	192	0,001		

Tableau 131. Comparaison des moyennes du facteur "Provenance" pour le paramètre «Teneur en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0	Sig	1,301	A			
1.0	Kharouba	1,279		B		
4.0	Oued'Rhiou	1,267			C	
2.0	Béni Saf	1,207				D

Tableau 132. Comparaison des moyennes du facteur "Métal" pour le paramètre «Teneur en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
1.0	Pb	1,318	A			
2.0	Cr(III)	1,255		B		
3.0	Cr(VI)	1,219			C	

Tableau 133. Comparaison des moyennes du facteur "Concentration" pour le paramètre «Teneur en tanins dans les tiges d'*Atriplex halimus*, traitées par les métaux lourds (Pb, Cr(III) et Cr(VI))».

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes			
3.0	d2	1,33	A			
4.0	d3	1,302		B		
2.0	d1	1,236			C	
1.0	d0	1,187				D

Annexe 52. Effet du Pb sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* L.

Planche 01. Effet du Pb sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Kharouba".



Photo 1.1. (Témoin) "Kharouba".



Photo 1.2. Effet du plomb sur la provenance "Kharouba" (1000 ppm).



Photo 1.3. Effet du plomb sur la provenance "Kharouba" (4000 ppm).



Photo 1.4. Effet du plomb sur la provenance "Kharouba" (8000 ppm).

Planche 02. Effet du Pb sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Béni Saf".



Photo 2.1. (Témoin) "Béni Saf".



Photo 2.2. Effet du plomb sur la provenance "Béni Saf" (1000 ppm).



Photo 2.3. Effet du plomb sur la provenance "Béni Saf" (4000 ppm).



Photo 2.4. Effet du plomb sur la provenance "Béni Saf" (8000 ppm).

Planche 03. Effet du Pb sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Sig".



Photo 3.1. (Témoin) "Sig".



Photo 3.2. Effet du plomb sur la provenance "Sig" (1000 ppm).



Photo 3.3. Effet du plomb sur la provenance "Sig" (4000 ppm).



Photo 3.4. Effet du plomb sur la provenance "Sig" (8000 ppm).

Planche 04. Effet du Pb sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Oued'Rhiou".



Photo 4.1. (Témoïn) "Oued'Rhiou".



Photo 4.2. Effet du plomb sur la provenance "Oued'Rhiou" (1000 ppm).



Photo 4.3. Effet du plomb sur la provenance "Oued'Rhiou" (4000 ppm).



Photo 4.4. Effet du plomb sur la provenance "Oued'Rhiou" (8000 ppm).

Annexe 53. Effet du Cr(III) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* L.

Planche 05. Effet du Cr(III) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Kharouba".



Photo 5.1. (Témoin) "Kharouba".



Photo 5.1. Effet du Cr(III) sur la provenance "Kharouba" (250 ppm).



Photo 5.2. Effet du Cr(III) sur la provenance "Kharouba" (500 ppm).



Photo 5.3. Effet du Cr(III) sur la provenance "Kharouba" (750 ppm).

Planche 06. Effet du Cr(III) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Béni Saf".



Photo 6.1. (Témoin) "Béni Saf".



Photo 6.1. Effet du Cr(III) sur la provenance "Béni Saf" (250 ppm).



Photo 6.2. Effet du Cr(III) sur la provenance "Béni Saf" (500 ppm).



Photo 6.3. Effet du Cr(III) sur la provenance "Béni Saf" (750 ppm).

Planche 07. Effet du Cr(III) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Sig".



Photo 7.1. (Témoin) "Sig".



Photo 7.1. Effet du Cr(III) sur la provenance "Sig" (250 ppm).



Photo 7.2. Effet du Cr(III) sur la provenance "Sig" (500 ppm).



Photo 7.3. Effet du Cr(III) sur la provenance "Sig" (750 ppm).

Planche 08. Effet du Cr(III) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Oued'Rhiou".



Photo 8.1. (Témoin) "Oued'Rhiou".



Photo 8.1. Effet du Cr(III) sur la provenance "Oued'Rhiou" (250 ppm).



Photo 8.2. Effet du Cr(III) sur la provenance "Oued'Rhiou" (500 ppm).



Photo 8.3. Effet du Cr(III) sur la provenance "Oued'Rhiou" (750 ppm).

Annexe 54. Effet du Cr(VI) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* L.

Planche 09. Effet du Cr(VI) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Kharouba".



Photo 9.1. (Témoin) "Kharouba".



Photo 9.1. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Kharouba" (50 ppm).



Photo 9.2. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Kharouba" (100 ppm).



Photo 9.3. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Kharouba" (150 ppm).

Planche 10. Effet du Cr(VI) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Béni Saf".



Photo 10.1. (Témoin) "Béni Saf".



Photo 10.1. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Béni Saf" (50 ppm).



Photo 10.2. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Béni Saf" (100 ppm).



Photo 10.3. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Béni Saf" (150 ppm).

Planche 11. Effet du Cr(VI) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Sig".



Photo 11.1. (Témoin) "Sig".



Photo 11.1. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Sig" (50 ppm).



Photo 11.2. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Sig" (100 ppm).



Photo 11.3. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Sig" (150 ppm).

Planche 12. Effet du Cr(VI) sur la croissance des plantes d'*Atriplex halimus* chez la provenance "Oued'Rhiou".



Photo 12.1. (Témoin) "Oued'Rhiou".



Photo 12.1. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Oued'Rhiou" (50 ppm).



Photo 12.2. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Oued'Rhiou" (100 ppm).



Photo 12.3. Effet du Cr(VI) sur la provenance "Oued'Rhiou" (150 ppm).